



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

**ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM
GERADOR TERMOELÉTRICO PARA COGERAÇÃO EM
AUTOMÓVEIS**

LEDSON PEDRO E SANTOS

**João Pessoa – Paraíba
Janeiro, 2020.**

LEDSON PEDRO E SANTOS

**ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM
GERADOR TERMOELÉTRICO PARA COGERAÇÃO EM
AUTOMÓVEIS**

Dissertação apresentada ao
curso de Pós-Graduação em engenharia
mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para a obtenção do grau de mestre.

Orientadores: Professor Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

João Pessoa - PB

Janeiro, 2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237e Santos, Ledson Pedro e.

ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR
TERMOELÉTRICO PARA COGERAÇÃO EM AUTOMÓVEIS / Ledson
Pedro e Santos. - João Pessoa, 2020.
124 f. : il.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos Santos.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Cogeração. 2. Eficiência Energética. 3.
Termogerador. I. Santos, Carlos Antônio Cabral dos
Santos. II. Título.

UFPB/BC

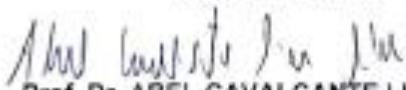
ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR TERMOELÉTRICO PARA COGERAÇÃO EM AUTOMÓVEIS

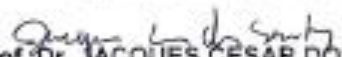
por

LEDSON PEDRO E SANTOS

Dissertação aprovada em 30 de janeiro de 2020


Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS
Orientador – UFPB


Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Examinador Interno – UFPB


Prof. Dr. JACQUES CESAR DOS SANTOS
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Lesso e Ana Lúcia, pelo incentivo e apoio incondicional.

Dedico também a minha vó Maria e a minha Tia Benedita pelo significado desse título na nossa família.

Dedico ao meu primo Paulo, que sua lembrança nunca me deixará esquecer-lo, e onde estiver sei que está orgulhoso por mim.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha existência, pela força, por me guiar e estar sempre presente em todos os momentos.

À minha família, pela formação ética, moral, ajuda e apoio a todos os instantes, de forma incondicional.

A meu orientador e Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos;

À CAPES, por ter concedido a bolsa de estudos no período a que tive direito.

ESTUDO DA APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR TERMOELÉTRICO PARA COGERAÇÃO EM AUTOMÓVEIS

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se o estudo da aplicação e do desenvolvimento de um gerador termoelétrico para cogeração com a energia proveniente do calor liberado pelo escapamento de automóveis, através do efeito seebeck. A atual situação da demanda energética, crescente, tem impulsionado buscas de novas formas de geração de energia para esta demanda juntamente com a crescente preocupação com preservação do meio ambiente e produção de energia elétrica a partir de uma diferença de temperatura, pode ser uma solução. A aplicação desse termogerador em um automóvel convencional gera um aumento na eficiência global do mesmo com a utilização da energia que vem de uma fonte térmica que seria perdida e também a possível aplicação desse termogerador em automóveis híbridos com a energia sendo gerada durante a utilização do motor a combustão dando uma maior autonomia do motor elétrico e ambos os casos reduzindo o consumo de combustível. Neste trabalho é feita a análise energética e seu possível aproveitamento em um termogerador juntamente com o estudo da geração termoelétrica pelo efeito seebeck em um protótipo de termogerador aplicável em um automóvel. Com base nas observações dos resultados obtidos na geração elétrica no protótipo e o valor de potência possível de ser aproveitada tem-se a conclusão que é possível fazer a geração na cogeração de 1,6W de potência a partir destas perdas térmicas com pouco investimento e assim uma maior eficiência no automóvel.

Palavras chave: Cogeração, Eficiência Energética, Termogerador.

STUDY OF APPLICATION AND DEVELOPMENT OF A THERMOELECTRIC GENERATOR FOR COGENERATION IN CARS

ABSTRACT

In this work, we present the application and development of a thermoelectric generator for cogeneration with heat energy released by car exhaust through the seebeck effect. The current situation of increasing energy demand has driven the search for new forms of energy generation to meet this demand with the use of environment conservation and the Seebeck effect which consists in the production of electricity from a different temperature mode. Applying this thermoelectric generator to a conventional car generates an overall increase in efficiency by reusing the energy that comes from a lost thermal source and it is also possible to apply this thermoelectric generator on the combustion engine hybrid cars giving greater engine autonomy and both cases resulting in reduction of fuel consumption. In this work, an analysis of the energy loss around the thermoelectric generator was made, with the study of the thermoelectric generation by the differential temperature around the prototype setting around automobiles and collected all the results. Based on the configurations of the results obtained for the electrical generation in the prototype and the potential value that can be measured, it can be concluded that it is possible to cogenerate from these thermal changes with small investment in the car.

Keywords: Cogeneration, Efficiency Energy, Thermoelectric Generator.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE EQUAÇÕES.....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVII
 CAPÍTULO I.....	 21
1. INTRODUÇÃO	21
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
1.4 JUSTIFICATIVA	24
 CAPÍTULO II.....	 25
2. ESTADO DA ARTE	25
2.1 INTRODUÇÃO.....	25
2.2 UTILIZAÇÃO DE MÓDULOS TERMOELÉTRICOS EM VEÍCULOS A COMBUSTÃO	26
 CAPÍTULO III	 29
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
3.1 COGERAÇÃO	29
3.1.1 DEFINIÇÃO DE COGERAÇÃO	29
3.1.2 HISTÓRICO DA COGERAÇÃO	29

3.1.3 COGERAÇÃO EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	31
3.1.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA COGERAÇÃO	32
3.2 EFEITOS TERMELÉTRICOS	33
3.2.1 INTRODUÇÃO.....	33
3.2.2 CONCEITO TERMOELÉTRICO	34
3.2.3 ANÁLISES DOS FENÔMENOS OCORRENTES NOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS.....	36
3.2.4 EFICIÊNCIA DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS	40
3.2.5 ANÁLISES DOS DISPOSITIVOS QUE UTILIZAM OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS.....	42
3.2.6 ESTUDO DAS ATUAIS APLICAÇÕES DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS.....	42
3.3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	44
3.3.1 INTRODUÇÃO.....	44
3.3.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLOS OTTO E DIESEL	45
3.3.3 COMBUSTÃO.....	47
3.3.4 POTÊNCIA GERADA EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	50
3.3.5 ENERGIA LIBERADA NO ESCAPAMENTO.....	51
3.3.6 EFICIÊNCIA TÉRMICA.....	53
3.4 BASE DE CÁLCULOS	54
3.4.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	54
3.4.2 PRINCÍPIO DE GERADORES ELÉTRICOS.....	59
CAPÍTULO IV	66
4. MATERIAIS E MÉTODOS	66
4.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	66
4.1.1 AUTOMÓVEIS.....	66
4.1.2 CÂMERA TERMOGRÁFICA	69

4.1.3 GERADOR TERMOELÉTRICO	73
4.1.4 ARDUINO.....	77
4.2 METODOLOGIA.....	80
4.2.1 PROCEDIMENTO DA ANÁLISE TERMOGRÁFICA	80
4.2.2 PROCEDIMENTO DA ANÁLISE DA TERMOGERAÇÃO.....	84
4.2.3 MONTAGEM DO TERMOGERADOR	85
4.2.4 FONTE DE CALOR DO TERMOGERADO.....	85
4.2.5 SISTEMA DE ARREFECIMENTO	85
4.2.6 LIGAÇÃO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS.....	86
4.2.7 ESCOLHA DA ASSOCIAÇÃO DOS MÓDULOS PARA ESTUDO	86
4.2.8 COLETA DOS VALORES DE CORRENTE E TENSÃO PARA VARIAÇÃO DE GRADIENTES TÉRMICOS	88
CAPÍTULO V	90
5. RESULTADOS	90
5.1 ANÁLISE DAS PERDAS ENERGÉTICAS.....	90
5.1.1 RESULTADOS DA ANÁLISE TÉRMICA	94
5.1.2 CÁLCULO DAS PERDAS NO ESCAPAMENTO	96
5.1.3 PERDA POR CONVECÇÃO	97
5.1.4 PERDAS POR RADIAÇÃO.....	101
5.2 ANÁLISE DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA	102
CAPÍTULO VI.....	114
6. CONCLUSÕES	114
6.1 DESENVOLVIMENTO FUTURO	115
7. REFERÊNCIAS.....	117
8. ANEXOS	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema convencional de geração de energia	31
Figura 2 - Sistema de cogeração de energia	31
Figura 3 - Demonstração do efeito Seebeck.....	37
Figura 4 - Demonstração do efeito Seebeck com semicondutores.....	37
Figura 5- Demonstrativo do Efeito Peltier.	39
Figura 6- Demonstrativo do Efeito Thomson.....	40
Figura 7- Ciclo real dos motores de ignição por centelha seus diagramas P-V	45
Figura 8 - Ciclo ideal dos motores de ignição por centelha seus diagramas P-V	46
Figura 9- Diagrama P-V do Ciclo Diesel	47
Figura 10- Diagrama de Grassmann aplicado a MCI.....	52
Figura 11- Gerador Ideal	59
Figura 12- Gerador de Tensão Real	60
Figura 13- Gerador Real.....	61
Figura 14- Curva característica Gerador de real.	62
Figura 15- Exemplo 3 geradores ligados em Série.....	63
Figura 16- Geradores Associados em Paralelo.....	64
Figura 17- Fiat Uno Mille Fire 1.0 Abastecendo o cilindro de GNV.	67
Figura 18- Ficha Técnica do uno mille Fire 1.0.	67
Figura 19- Fiat Siena Fire 1.0.....	68
Figura 20- Ficha Técnica do Siena mille Fire 1.0	68
Figura 21 - Câmera FLIR A55sc.....	69
Figura 22 - Detalhamento da câmera.	69
Figura 23- Representação esquemática funcionamento da coleta das imagens termográficas.	70
Figura 24 -Representação esquemática de uma situação geral de captação termográfica.....	71
Figura 25 - Imagem da abertura do programa da câmera térmica.....	71
Figura 26- Imagem do programa da câmera térmica	72
Figura 27- Imagem de aplicações termográficas.....	72

Figura 28- Imagem de aplicações termográficas.....	72
Figura 29: Imagem de aplicações termográficas.....	73
Figura 30- Imagem de aplicações termográficas.....	73
Figura 31- Termogerador Desmontado.	74
Figura 32- Termogerador Montado.....	74
Figura 33- Módulo Termoelétrico.....	75
Figura 34- Datasheet da célula Peltier.....	75
Figura 35- Reservatório térmico.....	76
Figura 36- Pasta Térmica.	76
Figura 37 - Arduino mega 2560.	78
Figura 38 - MAX6675.....	78
Figura 39 - ACS712	79
Figura 40- Câmera termográfica e computador instalados no momento das coletas.	81
Figura 41- Automóvel 01 no preparando pra coleta.....	81
Figura 42- Sistema de Exaustão do Automóvel 01.	82
Figura 43- Automóvel 02 preparando pra coleta.....	82
Figura 44- Sistema de exaustão do Automóvel 02.....	83
Figura 45- Termografia automóvel 01.	83
Figura 46- Termografia Automóvel 02.	84
Figura 47- Sistema de arrefecimento.....	86
Figura 48: Caso 1 – Seis módulos em série.....	87
Figura 49- Caso 2 – Dois grupos de três módulos em série e ligados em paralelo....	87
Figura 50 - Caso 03 – Três grupos de dois módulos em série e ligados em paralelo.	87
Figura 51 - Caso 4 – Seis módulos em Paralelo.....	88
Figura 52- Coleta dos dados da geração para gradiente térmico.....	89
Figura 53 - Início do Escapamento dos Automóveis 01 e 02.....	91
Figura 54- Parte 2 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.....	91
Figura 55- Parte 3 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.....	91
Figura 56- Parte 4 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.....	92
Figura 57- Parte 5 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.....	92
Figura 58 - Parte 6 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.....	93
Figura 59- Final do Escapamento dos Automóveis 01 e 02.....	93
Figura 60: Região estudada Automóvel 01	94

Figura 61: Região Estudada Automóvel 01. (Câmera Térmica).....	94
Figura 62: Região Estudada Automóvel 02.	95
Figura 63: Região Estudada Automóvel 02. (Câmera Térmica).....	95
Figura 64: Temperaturas Automóvel 01.	96
Figura 65: Diagrama com a disposição dos elementos que compõe o gerador termoelétrico.....	102
Figura 66: Reapresentação do Caso 01.	104
Figura 67: Reapresentação do Caso 02.	104
Figura 68: Gráfico das temperaturas - Caso1.....	106
Figura 69: Gráfico da Corrente- Caso1	106
Figura 70: Gráfico da Tensão - Caso1.....	107
Figura 71: Gráfico das temperaturas- Caso2.....	108
Figura 72: Gráfico da Corrente - Caso2	108
Figura 73: Gráfico da Tensão - Caso2.....	109
Figura 74: Corrente do Resistor.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição aproximada do ar seco.....	48
Tabela 2- Teste de cada módulo com $T_h = 30^\circ$	103
Tabela 3 - Teste para cada módulo com $T_h = 50^\circ$	103
Tabela 4- Valores para Avaliação do Experimento- Caso1.	107
Tabela 5: Valores para Avaliação do Experimento- Caso2.	109

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Variação de Tensão Elétrica.....	36
Equação 2 - Coeficiente de Seebeck	37
Equação 3 - Calor Absorvido na junção.....	38
Equação 4 - Energia Térmica libertada	39
Equação 5 - Figura de Mérito.....	40
Equação 6: Parâmetro Figura de Mérito.....	41
Equação 7: Razão ar-combustível	49
Equação 8- Equação de Lambda	50
Equação 9 - Energia Total recebido pelo motor, pelo combustível.	50
Equação 10 - Dissipação da energia do combustível.	51
Equação 11 - Quantidade de energia liberada no escapamento.	52
Equação 12 - Eficiência Térmica.	53
Equação 13- Eficiência térmica de cogeração.....	54
Equação 14 - Taxa de transferência de calor por condução.	55
Equação 15- Taxa de transferência de calor por Convecção.....	56
Equação 16- Número de Reynolds.....	57
Equação 17- Coeficiente Convectivo.....	57
Equação 18- Poder emissivo de um corpo negro.	58
Equação 19- Poder emissivo da superfície.....	58
Equação 20- Equação característica do Gerador.	61
Equação 21- Equação característica do Gerador com corrente nula.	62
Equação 22- Equação característica do Gerador com Tensão nula nos polos.	62
Equação 23- Tensão Equivalente	64
Equação 24- Resistência equivalente	64
Equação 25- Tensão equivalente em paralelo	65
Equação 26- Resistência equivalente em paralelo.	65
Equação 27- Transferência de Calor para coeficiente convectivo local.	97
Equação 28- Transferência de Calor para coeficiente convectivo médio.	97

Equação 29- Área da placa.	97
Equação 30- Fórmula de Nusselt pontual para escoamento Laminar.	98
Equação 31- Fórmula de Nusselt médio para escoamento Laminar	98
Equação 32- Fórmula de Nusselt para escoamento turbulento.	98
Equação 33- Coeficiente convectivo local.	99
Equação 34- Coeficiente convectivo médio.	99
Equação 35- Temperatura de Filme.	100
Equação 36- Fórmula de Reynolds	100
Equação 37- Fórmula Nusselt Médio	100
Equação 38- Transferência de Calor por Radiação.	101
Equação 39 – Fórmula para determinar a corrente.	109
Equação 40- Fórmula para determinar a resistência interna.	110
Equação 41- Eficiência de um termogerador.	111

LISTA DE SÍMBOLOS

$K \rightarrow$ Kelvin

$W \rightarrow$ Watt - Potência

$J \rightarrow$ Joule (Trabalho)

$Kg \rightarrow$ Quilograma (Massa)

$s \rightarrow$ Segundo

m - Metros

$\Delta V \rightarrow$ Variação de tensão elétrica

$\alpha \rightarrow$ Coeficiente de Seebeck

$T_1 \rightarrow$ Temperatura em que o material está submetido

$T_2 \rightarrow$ Temperaturas em que o material está submetido

$Q_p \rightarrow$ Calor associado;

$\pi \rightarrow$ Coeficiente de Peltier;

$Q_c \rightarrow$ Calor absorvido na junção;

$i \rightarrow$ Corrente elétrica

$T_f \rightarrow$ Temperatura da Fonte Fria

$T_q \rightarrow$ Temperatura da Fonte Quente

$T \rightarrow$ temperatura da junção

$\rho \rightarrow$ a resistividade eléctrica

$k \rightarrow$ condutividade térmica

$ZT \rightarrow$ Figura de Mérito

M_{Mar} → Massa molar de ar

$M_{Mcombustível}$ → Massa molar do combustível

λ → Lambda

Q_f → Energia total recebida pelo motor, pelo combustível

$\dot{m}$ → A vazão mássica de combustível

Q_{pi} → Poder calorífico do combustível

W_E → Energia útil (efetivo)

Q_{arr} → Energia perdida no sistema de arrefecimento do motor

Q_{ge} → Energia perdida na forma de calor pelo escapamento do motor,

Q_{rest} → Energia restante

e → A quantidade de energia liberada no escapamento;

ΔH → Variação de entalpia

$\dot{m}_{GASES}$ → Vazão mássica dos gases no escapamento

η → Eficiência térmica

W → Trabalho realizado, energia disponível

$\dot{m}_c$ → A vazão mássica de combustível consumida pelo motor

PCI → Poder calorífico inferior do combustível

E_2 → Energia gerada pelo sistema de cogeração

q_{cond} → Taxa de transferência de calor por condução

K → Condutividade térmica

A → Área através da qual o calor flui

ΔT → Diferença de temperatura

L → Espessura.

q_{conv} → Taxa de transferência de calor por convecção

$h \rightarrow$ Coeficiente de transferência de calor por convecção

$A \rightarrow$ Área de superfície pela qual o calor está sendo transferido

$T_s \rightarrow$ Temperatura da superfície

$T_\infty \rightarrow$ Temperatura do fluido

$Re \rightarrow$ Número de Reynolds

$u_\infty \rightarrow$ Velocidade cinemática do fluido

$L \rightarrow$ Comprimento da superfície pela qual o fluido escoar

$\nu \rightarrow$ Viscosidade

$Nu \rightarrow$ número de Nusselt

$K \rightarrow$ Condutividade térmica

$L \rightarrow$ comprimento da superfície

$E_n \rightarrow$ Poder emissivo de um corpo negro

$\sigma \rightarrow$ Constante de Stefan-Boltzmann

$T_s \rightarrow$ Temperatura absoluta na superfície

$E \rightarrow$ Poder emissivo da superfície

$\varepsilon \rightarrow$ Emissividade da superfície

$T_s \rightarrow$ Temperatura absoluta na superfície

$U \rightarrow$ Tensão

$r \rightarrow$ Resistência interna

$i_{cc} \rightarrow$ Corrente de curto circuito

$U_{equivalente} \rightarrow$ Tensão Equivalente

$R_{equivalente} \rightarrow$ Resistência Equivalente

$Sp1 \rightarrow$ Início da seção selecionada para medir a temperatura – Ponto 1.

$Sp2 \rightarrow$ Fim da seção selecionada para medir a temperatura – Ponto 2.

$Nu_x \rightarrow$ Transferência de Calor para coeficiente convectivo local.

$\overline{Nu}_x \rightarrow$ Transferência de Calor para coeficiente convectivo médio

$Re_x \rightarrow$ Número de Reynolds para coeficiente convectivo local.

$Pr \rightarrow$ Número de Prandtl

$P \rightarrow$ Perímetro

$L \rightarrow$ Comprimento

$D \rightarrow$ Diâmetro do cano

$R \rightarrow$ Raio do cano

$h_x \rightarrow$ Coeficiente convectivo local

$\bar{h}_L \rightarrow$ Coeficiente convectivo médio.

$v \rightarrow$ velocidade

$T_f \rightarrow$ Temperatura de Filme

$q_{rad} \rightarrow$ Transferência de Calor por Radiação.

$T_{viz} \rightarrow$ Temperatura da vizinhança

$q_{total} \rightarrow$ Perda energética

$T_h \rightarrow$ Temperatura da água dentro do reservatório térmico

$r_{interna} \rightarrow$ Resistência interna

$U_{Aberto} \rightarrow$ Tensão em aberto

$U_{cr} \rightarrow$ Tensão no circuito resistivo

$V_{série} \rightarrow$ Tensão em série

$V_{misto} \rightarrow$ Tensão em série e paralelo

$\eta_{01} \rightarrow$ Eficiência no caso 01.

$\eta_{02} \rightarrow$ Eficiência no caso 02.

$P_{resistencia} \rightarrow$ Potência consumida da resistência

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A situação de demanda energética juntamente com meio ambiente estão no centro das atenções quando se pensa no futuro da população mundial, podendo citar as causas como o crescimento populacional, o desenvolvimento industrial e a criação de equipamentos destinados ao conforto, que aumentam o consumo de energia e, na maioria das vezes, agredem o meio ambiente; porém juntamente com este aumento do consumo energético está a diminuição dos recursos não renováveis, que ainda podemos considerar como a principal fonte de energia do mundo, o que impulsiona cada vez mais pessoas e entidades a buscar e a investir em pesquisas para o desenvolvimento de novas formas de geração de energia e de melhoria da eficiência dos atuais sistemas.

Desde a segunda fase da revolução industrial no século XIX a forma mais utilizada de energia é a energia da combustão de derivados do petróleo em motores de combustão interna, motores estes que tem grande quantidade de aplicações desde geradores, compressores, até a maior aplicação em automóveis que serve para transporte de produtos ou pessoas.

Um grande problema mundial está ligado ao baixo rendimento dos motores de combustão interna, equipamentos de maior utilização, pelas perdas térmicas, a emissão de gases poluentes resultantes da combustão e a utilização de combustíveis de fonte não renovável em seu uso.

Porém um gerador termoelétrico de geração direta, sem movimentos rotativos, com a utilização de módulos termoelétricos possibilita a conversão de energia térmica em energia elétrica através do efeito seebeck, que utilizando a associação de semicondutores, pode ser utilizado nas fontes residuais de perdas térmicas dos motores de combustão interna, fazendo assim a cogeração em automóveis.

Os sistemas de cogeração oferecem energia e benefícios ambientais em relação aos sistemas elétricos e sistemas térmicos, já que há produção simultânea térmica e elétrica, com redução na produção do teor de poluentes ao usar combustíveis de queima mais limpa. Esses fatores fazem com que a eficiência energética e exergética melhorem com potencial para uma ampla gama de aplicações (FERNANDES, 2015).

Fazendo um estudo da aplicação de um gerador termoelétrico, pelo efeito seebeck, poderemos fazer a cogeração em motores dos automóveis, tem grande relevância por se tratar de uma possível fonte de energia alternativa e limpa, não gera poluentes, a partir de energia que seria desperdiçada. E esta aplicação pode ser, futuramente, estendida para além do ramo automobilístico e ser aplicada no ramo industrial, onde se observa também grandes perdas térmicas.

O resíduo térmico do funcionamento do equipamento principal acrescido do sistema de cogeração, no caso o motor de combustão com o gerador termoelétrico, não deixará de existir, mas terá um aproveitamento maior antes de ser liberado ao ambiente, fazendo assim um aumento no rendimento geral do automóvel.

1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem por objetivo geral fazer o estudo da aplicação e desenvolvimento de um gerador termoelétrico para cogeração de energia a partir da energia térmica liberada junta com os gases de escapes do motor de um automóvel, através do efeito termoelétrico conhecido por seebeck utilizando módulos termoelétricos convencionais. Os resultados e observações deste trabalho tem a intenção de dar base ao desenvolvimento, posteriormente, de um termogerador para cogeração a ser aplicado em um veículo convencional ou híbrido, aumentando assim sua eficiência.

Podendo assim, com a aprovação da aplicação desse termogerador em um automóvel convencional, gerar um aumento no rendimento global do mesmo com a utilização desta energia que vem de uma fonte térmica que seria perdida para substituição total ou parcial do alternador, ou utilizar a energia para acionar o sistema de ar condicionado, visto que ambos, normalmente, são ligados ao motor fazendo uma carga sobre o mesmo e elevando o consumo de combustível. A aplicação desse termogerador em automóveis híbridos - automóvel que possui motor a

combustão interna e motor elétrico - a energia pode ser gerada durante a utilização do motor a combustão e assim possibilitar uma maior autonomia na utilização do motor elétrico e um menor consumo de combustível.

Todo o programa pós-graduação desde as matérias bases, a elaboração da dissertação, toda a parte pratica de construção do protótipo e coletas de dados para fins de conclusão do trabalho ocorreu nas dependências da Universidade Federal da Paraíba - Campus I, João Pessoa.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo introduz o tema principal do trabalho demonstrando o que motivou este trabalho como também estabelece o objetivo desejado e justificado.

O segundo capítulo retrata o estado da arte com estudos sobre a utilização de módulos termoeletricos em veículos a combustão.

O terceiro introduz o conceito da cogeração, relatando um pouco da sua história, seus pontos relevantes, descreve também a energia disponível nos motores de combustão interna dos automóveis que possibilita a cogeração. O capítulo retrata a termoeletricidade, sua história e suas divisões, também explana sobre o efeito seebeck, suas utilizações, os módulos termoeletricos difundidos atualmente e finaliza com a demonstração da base de cálculos utilizada para determinar os resultados obtidos no trabalho.

No quarto capítulo serão descritos os equipamentos e procedimentos do trabalho, tanto produção do protótipo de simulação até as pesquisas e coletas de dados. Apresenta-se a metodologia para a análise termográfica realizada no trabalho e a metodologia para a análise da termogeração apresentada nesse trabalho.

No quinto capítulo serão apresentados os resultados obtidos pela coleta dos dados, as análises das perdas energéticas e da geração termoeletrica e discussões sobre esses resultados e análises.

No sexto capítulo será apresentada a conclusão geral do trabalho desenvolvido, demonstrando as características observadas do efeito seebeck e a viabilidade da cogeração em um automóvel e as relevâncias relacionadas a pesquisas.

Por fim, serão citadas as referências bibliográficas e os anexos necessários.

1.4 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de tecnologia de aplicação da cogeração em automóveis pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida do homem das grandes cidades, já que vai contribuir para a redução da emissão de poluentes e reduzindo o consumo de combustível, aspectos estes que justificam a importância da pesquisa aqui apresentada.

De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética, o consumo de energia no Brasil tende a crescer 3,7% ao ano até 2030 (CERATTO, 2013). Desta forma, faz-se necessário a constante ampliação da oferta de energia para acompanhar a crescente expansão da demanda de energia elétrica. Contudo, qualquer pesquisa na busca de novas fontes alternativas de energia irá contribuir para a sustentabilidade e inserção da confiabilidade do setor elétrico.

Assim é importante considerar a economia de combustível através da reutilização do calor liberado dos automóveis, aumentando assim a autonomia dos automóveis híbridos. Neste trabalho será mostrado a realização da cogeração para uma geração energética sem resíduo, sem ruídos e pequenos valores.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Segundo Nunes (2017) após um estudo bibliométrico na área da cogeração através do efeito Seebeck, identificou muitos estudos no exterior, porém sendo um assunto ainda pouco explorado no Brasil. Nunes diz que a cogeração de energia através do efeito Seebeck não é um tema muito abordado em artigos científicos brasileiros nas plataformas pesquisadas, apesar de apresentar grande potencial efetivo em cogeração de energia e relevante contribuição científica para publicações. No entanto, foram encontradas teses de mestrado contendo grandes pesquisas referentes ao assunto pesquisado.

A energia térmica que provém dos gases de escape dos motores a gasolina e a diesel passou por vários estudos, recentemente, e está sendo utilizada para a produção de energia elétrica. Os motores a combustão possuem um desperdício de calor liberado através dos gases de escape e do sistema de arrefecimento, com isso, tornou-se necessário encontrar uma solução para o reaproveitamento da energia que é desperdiçada, tanto por razões ambientais como por razões económicas, tendo em vista que o recurso natural para a produção de combustível é uma matéria-prima finita. (AFONSO, 2014)

No início do século XIX, teve início a necessidade de conseguir gerar energia elétrica diretamente através da energia térmica. Uma das formas de conseguir isto é através do efeito Seebeck. Este feito foi conseguido pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck, em 1820, que observou que seria possível conseguir uma diferença de potencial através de dois tipos de metais diferentes, quando sujeitos a uma diferença de temperatura entre as suas junções. Foi então aqui que se deu o grande passo para desenvolver e investigar os módulos termoelétricos (VELMRE, 2010).

2.2 UTILIZAÇÃO DE MÓDULOS TERMOELÉTRICOS EM VEÍCULOS A COMBUSTÃO

O aproveitamento da energia térmica desperdiçada vinda dos gases de escape é uma técnica relativamente recente. Observa-se o surgimento, no século passado, das pesquisas de gerador termoeletrico utilizado para reaproveitamento de energia térmica em automóveis e produzindo energia elétrica, mesmo sem muito conhecimento ainda sobre o assunto.

Após a segunda metade do século XX, foram desenvolvidos protótipos de geradores termoeletricos por marcas conceituada como a Porsche, a implementar o sistema no seu modelo 944, Nissan Motors, e a Universidade de Clarkson em colaboração com a General Motors (GM). A produção de energia elétrica nos geradores desenvolvidos por estas marcas situa-se entre os valores de 30 Watts e 1000 Watts quer nos motores a gasolina quer nos motores a diesel (SAQR E MUSA, 2009).

No ano de 1987 no U.S. Department of Energy's, foi iniciado o desenvolvimento e implementação de projetos de maior importância, com o desenvolvimento e construção de um gerador termoeletrico com 1kW de potência para motores a diesel. Foi construído um gerador termoeletrico com uma potência de 200 watts, sendo este apresentado no decorrer do ano de 1991, este gerador pretendia aproveitar o calor gerado nos gases de escape (energia térmica) de um caminhão e converter esta temperatura liberada em energia elétrica, de modo a ser aproveitada pelos componentes elétrico. Com a intenção de realizar esse feito e diminuir o consumo de combustível do veículo e emissão de gases poluentes para a atmosfera (SAQR E MUSA, 2009).

A Nissan Research Center, em 1998, projetou, um gerador termoeletrico, constituído por 72 módulos termoeletricos cuja construção era de silício germânio. Este gerador foi testado num motor a gasolina com 3000cc de cilindrada onde se conseguiu gerar cerca de 35.5 watts de energia elétrica (SOUSA, 2011). Inserido no programa Freedom Car Office do U.S. Department of Energy's, começou-se o desenvolvimento de um gerador termoeletrico de produção de energia elétrica de elevada eficiência, em novembro de 2004, pela BSST, onde possuía uma equipe constituída por técnicos da BMW, Visteon e Marlow Industries (LAGRANDEUR,2006).

Este sistema visava a redução do consumo de combustível através da redução de trabalho pelo alternador do veículo, pois grande parte da energia produzida por este, com a utilização do sistema desenvolvido, seria reduzida. O veículo usado para implementação e testes deste sistema foi um BMW modelo 530i a gasolina com 3000cc de cilindrada, no qual os resultados obtidos conseguiram provar uma economia de cerca 10% de consumos de combustível e uma capacidade máxima de gerar energia na ordem de 1 quilowatt de energia elétrica (LAGRANDEUR,2006).

A BSST, BMW, Visteon e Marlow Industries, em 2005, publicaram na DEER Conference os resultados obtidos no estudo para implementação de um gerador termoeletrico num BMW série 5, com motor de cilindrada 3000 cc, sendo capaz de gerar 500W elétricos com uma diferença de temperatura de 207°C. O consórcio de empresas prevê atingir 1kW de energia elétrica pretendendo comercializar o gerador termoeletrico nos próximos anos (LANDIM, 2008). Os autores afirmam conseguirem uma poupança até 10% no uso de combustível. A Volkswagen e a Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV) têm a intenção de implementar um gerador termoeletrico num Volkswagen Golf capaz de alimentar todos os dispositivos eletrônicos do automóvel. Outros fabricantes de automóveis, como a Honda, estão estudando e testando geradores termoeletricos nos seus automóveis. Apesar dos grandes avanços nas últimas décadas neste campo, a energia elétrica produzida é apenas suficiente para alimentar os dispositivos do automóvel (MARTINS, 2011).

Combinando a recuperação de calor do escapamento de automóvel com as perdas do sistema de refrigeração seria possível gerar quantidades significativas de energia elétrica. Alguns trabalhos indicam que utilizando conversores termoeletricos com uma eficiência de 5% seria possível aumentar em 6% (1% do sistema de refrigeração e 5% do escapamento) a energia elétrica num automóvel híbrido (MARTINS, 2011).

Em 2008, a Volkswagen apresentou, em Berlim, no Thermoelektrik-Eine Chance Für Die Atomobillindustrie, um veículo protótipo equipado com um gerador termoeletrico capaz de gerar 600 watts de energia elétrica através da energia térmica desperdiçada nos gases de escapes. A marca conseguia cobrir, com isso, cerca de 30% da energia elétrica que o veículo necessitava, refletindo-se numa diminuição de cerca de 5% no consumo dos Módulos termoeletricos de Bi2TE3 foram utilizados pela Ford para desenvolver também um sistema de geradores termoeletricos, que produziam uma potência de 500 watts, sendo este gerador implementado num Ford Fusion (GREEN CAR, 2009).

Em 2010, a General Motors implementou no modelo Suburban da Chevrolet um gerador termoelétrico desenvolvido pela empresa, este gerador conseguia uma redução dos consumos na ordem dos 5% sem nunca serem divulgadas as potências geradas e a que temperaturas estas eram geradas. Uma inovação da General Motors seria o modo como era implementado no escape do veículo o gerador, uma vez que o tubo de escape apresentava uma bifurcação a meio que levava os gases de escape para a zona do gerador.

Nesta bifurcação, existia uma válvula *bypass* para limitar a passagem dos gases de escape e consequentemente do calor, para evitar danos no gerador por excesso de temperatura (KUMAR, 2013) (MEISNER, 2011).

Ultimamente tem-se pesquisas de controle de temperatura para termogeração em cargas térmicas variáveis na utilização de automóveis por meio de configuração de armazenamento de vapor controlado. Para obter mesma utilização da energia térmica e de forma não variável. Há pesquisas também sobre materiais e modificadores nos módulos termoelétricos para obter melhores rendimento unidos com pesquisas na área térmica. (BRITO, 2016).

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 COGERAÇÃO

3.1.1 DEFINIÇÃO DE COGERAÇÃO

A cogeração é usualmente entendida como um processo de produção e utilização simultânea de diferentes formas de energia, a partir de uma mesma fonte de energia primária, como a biomassa, gás natural ou derivados de petróleo. Ou seja, um sistema de cogeração consegue produzir uma maior quantidade de energia útil reaproveitando a energia (na forma de calor) que antes era jogada fora. Isso significa um maior rendimento global com um menor custo de energia (SANTOS, 2008; NOVO, 2008).

As tecnologias de cogeração utilizam de componentes relacionados a conversão, recuperação e manejo de energia. Entre essas tecnologias, os impulsores que convertem a energia térmica ou química em energia elétrica desempenham um papel fundamental; pois eles são os componentes principais de qualquer sistema de cogeração e, em certa medida, eles determinam as possibilidades e a disponibilidade de aproveitamento da energia que seria perdida.

A racionalidade da cogeração reside, essencialmente, na economia de recursos energéticos frente a uma configuração convencional que produza as mesmas quantidades de calor útil e trabalho, este geralmente convertido energia elétrica ou mecânica (BARJA, 2006).

Em outras palavras, podemos dizer que a cogeração é uma solução de engenharia, que pode aumentar a eficiência do processo de produção de energia (BRANDÃO, 2004).

3.1.2 HISTÓRICO DA COGERAÇÃO

Não se sabe ao certo quando foi inventado o primeiro sistema de cogeração de energia, mas existem relatos que indicam que essa técnica de reaproveitamento de energia já era utilizada desde a Idade Média. Esse dispositivo produzia trabalho mecânico aproveitando o calor contido nos gases de escape de fornos, através de um equipamento similar a uma turbina, que ficava disposto na chaminé de exaustão (FERNANDES, 2015).

Os sistemas de cogeração passaram séculos sem sofrer nenhum avanço tecnológico significativo. Esse cenário só começou a mudar com a invenção da máquina a vapor, que possibilitou novas aplicações para a cogeração, a principal delas era o uso do calor rejeitado para calefação (principalmente nos países da Europa onde os invernos eram mais rigorosos) (CAVALCANTE, 2015).

Durante o início do século XX a maior geração de eletricidade provinha do uso de caldeiras a carvão e turbinas a vapor, com o uso do vapor de escape em aplicações industriais. Nos Estados Unidos, aproximadamente 58% do total de energia para uso local produzida por usinas de energia era cogerada (ONOVWIONA; UGURSAL, 2006).

Segundo Onovwiona e Ugursal (2006), a redução dos custos da eletricidade, o incremento de políticas de regulamento de geração de eletricidade, os baixos custos dos combustíveis e os avanços em tecnologia foram os fatores do declínio da cogeração: representando, nos Estados Unidos, só 15% do total da capacidade de geração de eletricidade em 1950 e caindo para 5% em 1974.

Diante da crise do petróleo em 1973, os sistemas de cogeração receberam maior atenção devido ao seu baixo consumo de combustível e emissões ambientais, sendo notavelmente impulsados pela publicação em 1978 do PURPA (“Public Utilities and Regulatory Policies Act”), o estabeleceu que o desenho e a operação desse tipo de sistemas é mais eficiente do que os sistemas de geração de eletricidade e energia térmica separados (ORLANDO, 1996).

Atualmente o aumento do número de sistema de cogeração vem juntamente com a preocupação relacionada à escassez de combustíveis não renováveis, com o meio ambiente e principalmente com a instabilidade das grandes hidrelétricas, que está ligada a condições ambientais.

Um exemplo mais recente de cogeração e de grande influência na atualidade é a geração de energia pelas usinas de açúcar, que antes só se preocupavam com a produção de

açúcar e hoje também se preocupam com a produção energia elétrica gerada a partir de turbinas acionadas pelo vapor gerado nas caldeiras, que excede o necessário para a produção do açúcar, e a fonte combustível das usinas, em plena moagem, é o bagaço da cana. Esta geração de energia possibilita as usinas uma autossuficiência energética e ainda a possibilidade de vender energia.

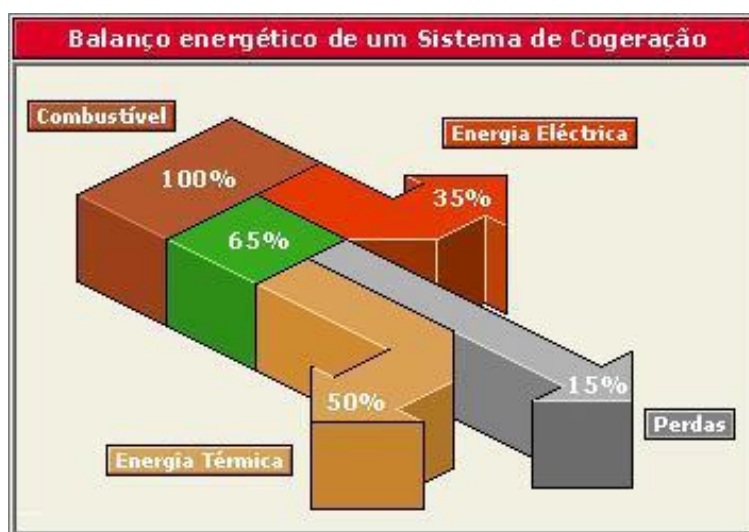
A modificação na política de produção energética das usinas termoeletricas a partir da cogeração e mostrado nas figuras 1 e 2.

Figura 1 - Sistema convencional de geração de energia



Fonte: MARÇAL, *et al* (2010)

Figura 2 - Sistema de cogeração de energia



Fonte: MARÇAL, *et al* (2010).

3.1.3 COGERAÇÃO EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores são uma tecnologia de comprovada eficiência, disponíveis numa ampla gama de tamanhos (variando de dezenas de kilowatts a mais de 10MW) e podem ser acionados com uma ampla variedade de combustíveis; tornando-os adequados para numerosas aplicações de cogeração no setor residencial, comercial e institucional, assim como para pequenas cargas industriais (ORLANDO, 1996).

Os motores alternativos de combustão interna são divididos por seu método de ignição: ignição por centelha (Otto) e ignição por compressão (Diesel). Os motores de ignição por centelha são os mais adequados para aplicações menores de cogeração, com um sistema de recuperação capaz de produzir água quente ou vapor. Em aplicações de cogeração os motores de ignição por centelha estacionários são principalmente movidos a gás natural, embora possam ser configurados para funcionar com propano, gasolina ou gás de aterro. Os motores diesel são usados principalmente para cogeração de grande escala, embora também possam ser utilizados para cogeração de pequena escala. Os motores diesel são movidos a diesel ou óleo pesado (ONOVWIONA; UGURSAL, 2006).

Os motores de combustão interna obtêm eficiências entre 25% a 45%, sendo os motores diesel mais eficientes devido a sua maior razão de compressão. A eficiência de motores de centelha de grande porte pode atingir valores iguais aos de motores diesel do mesmo tamanho. Uma pesquisa entre fabricantes indica que a eficiência total dos sistemas de cogeração com motor de combustão interna varia entre 85% a 90% com pouca variação devido ao tamanho do sistema (ONOVWIONA; UGURSAL, 2006).

3.1.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA COGERAÇÃO

A cogeração tem diversas vantagens que atraem pesquisas e até empresas para esta alternativa, a principal delas é aumento do rendimento, o que gera um retorno financeiro quando analisado a relação quantitativa entre energia gerada por combustível consumido, o que também ajuda a preservação do meio ambiente.

A cogeração é uma ótima alternativa para ajudar a diminuir o nível de poluição da atmosfera, pois se utilizamos menos combustível para gerar uma mesma quantidade de energia, significa que menos resíduos contaminantes (provenientes da queima de combustíveis fósseis) estão sendo emitido, isso contribui para evitar o aquecimento global. Essa redução é ainda maior

quando ao invés de utilizarmos como combustível algum derivado de petróleo, utilizamos algum tipo de biomassa (ALBUQUERQUE, 2016).

Mas nem tudo nos sistemas de cogerações são vantagens. Deve-se fazer o levantamento dos custos de aplicação e economias geradas com o sistema juntamente com a viabilidade financeira para a modificação necessária do sistema original da implantação desse sistema.

Em alguns casos, essa mudança pode estar dando prejuízos ao usuário. Nessa análise econômica devem ser considerados alguns pontos como: incentivos fiscais; retorno financeiro; preço e disponibilidade do combustível escolhido; custo para a produção das energias térmica e elétrica; custo de instalação, operação e manutenção da planta de cogeração e as tarifas de energia elétrica praticada pelas concessionárias (SANTOS, 2008).

3.2 EFEITOS TERMOELÉTRICOS

3.2.1 INTRODUÇÃO

Termoeletricidade é toda energia elétrica produzida a partir da energia térmica, calor, podendo ser esta transformação direta ou indireta. A produção indireta de energia termoeleétrica, que tem grande capacidade de geração, normalmente funciona utilizando calor em caldeira para gerar vapor e assim acionar turbinas, que por sua vez acionam geradores rotacionais. A produção direta se dá por efeitos termoeletricos, que tem pequena capacidade de geração, porém funcionam diretamente com o gradiente térmico.

O efeito termoeletrico é a conversão da diferença de temperatura em tensão elétrica e vice-versa. Os principais efeitos termoeletricos para este trabalho são o efeito Seebeck, o efeito Peltier e o efeito Thomson.

O dispositivo termoeletrico cria uma tensão elétrica quando há diferença de temperatura entre seus lados. Quando o contrário acontece, aplicando-lhe uma tensão elétrica, também se cria uma diferença de temperatura, observando este efeito nas partículas elétricas notando que quando é aplicada um gradiente de temperatura ou de tensão em um condutor ou semicondutor os elétrons se movimentam seguindo uma tendência e assim gerando um movimento de tensão ou uma diferença de temperatura.

3.2.2 CONCEITO TERMOELÉTRICO

O conceito de termoeletricidade resulta da junção de duas palavras: “termo” que significa temperatura e “eletricidade” (do grego *elétron*, “âmbar”) que é um termo geral que engloba uma grande variedade de fenómenos resultantes da presença e do fluxo da carga eléctrica (PINTO, 2017).

Os primeiros fenómenos relacionados com a termoeletricidade foram descobertos no século XIX, por T. J. Seebeck. A ligação de dois elementos condutores, ligados aos terminais de um galvanómetro e sujeito a uma variação de temperatura, provoca o surgimento de uma diferença de potencial, indicada no galvanómetro. Ao conjunto dos elementos ligados e sujeitos a uma variação de temperatura, foi dado o nome de termopar (Thomas Seebeck nasceu em 1770 e morreu em 1831).

Thomas Seebeck nasce no seio de uma abastada família de mercadores alemães sedeados em Reval. Estuda medicina na Universidade de Göttingen, licenciando-se em 1802. Porém, prefere continuar a aprender física em vez de exercer a carreira de médico (PINTO, 2017).

Em 1823, Thomas Seebeck relatou diversas experiências que tinha realizado e que relacionavam a temperatura com as propriedades eléctricas dos condutores. Notou que, ao aquecer uma das junções de dois materiais condutores, que formam um circuito fechado, em forma de anel, conseguia desviar uma agulha magnética, situada perto do anel (PIEDADE P. M., 1997).

Anos depois, o francês Jean Peltier, que era relojoeiro, verificou o efeito contrário ao de Seebeck, utilizou uma montagem idêntica, mas inverteu o procedimento. Em vez de aplicar uma variação de temperatura no termopar, foi aplicada uma corrente eléctrica no local do galvanómetro tendo verificado que o termopar sofria uma variação de temperatura. Peltier teve alguma dificuldade em efetuar uma relação entre a corrente eléctrica e o calor absorvido e libertado, nos lados do condutor, dada a dissipação por efeito de Joule.

Jean Charles Athanase Peltier nasceu em França, em 1785. Teve numerosos estudos dedicados, em grande parte, à eletricidade atmosférica, os relâmpagos, intensidade luminosa das descargas atmosféricas, temperatura da água e também o estudo do ponto de ebulição em grandes altitudes. Mas o seu nome ficará sempre associado ao efeito térmico, num circuito

elétrico, a sua grande descoberta experimental conhecida por efeito Peltier (COMMUNICATIONS, 2010).

Nem Peltier nem Seebeck verificaram um relacionamento entre as experiências que realizaram. Apenas Willian Thomson, em 1855, aplicando os conceitos termodinâmicos existentes na época, relacionou os resultados das experiências dos cientistas através dos coeficientes denominada depois de Seebeck e Peltier. Tendo também descoberto a existência de um terceiro fenómeno, aplicado a um condutor homogêneo que ficou conhecido por efeito de Thomson que consiste na reversibilidade de aquecimento ou arrefecimento quando existe simultaneamente um fluxo de corrente eléctrica e um gradiente de temperatura.

Os Efeitos termoelétricos estiveram no seu auge, na década de 60, quando se pensava que em breve todas as aplicações de refrigeração iriam ser substituídas por dispositivos utilizando o Efeito *Peltier*. Nas últimas quatro décadas não houve grande desenvolvimento na área. O coeficiente de desempenho dos dispositivos para arrefecimento por Efeito Peltier está ainda 4 a 5 vezes abaixo do coeficiente dos sistemas de refrigeração convencionais, o que reduziu bastante o interesse décadas atrás. Com o aparecimento de novos materiais e novos processamento, a termoelectricidade tem despertado o interesse em investigações científicas e na indústria (MARTINS, *et al* 2011).

No entanto, as pesquisas vêm sendo orientada no sentido de encontrar novos materiais de elevado desempenho principalmente aos materiais de nanoestruturas ou na melhoria de desempenho dos módulos termoelétricos convencionais que tem como principal objetivo a refrigeração em aplicações domésticas e a geração de energia na utilização de resíduos térmicos nas indústrias e nos automóveis. Comercialmente, encontram-se para aquisição produtos utilizando o efeito *Peltier*, como por exemplo, os bebedouros, adegas, incubadoras, caixa para transporte de órgãos, camarás para armazenagem de vacinas, refrigeradores farmacêutico portáteis, entre outros. Porém a utilização dos módulos termoelétricos está limitada a pequenos volumes ou refrigeração localizada devido a sua viabilidade técnica e econômica (NASCIMENTO, 2012).

A equipe de pesquisa gerenciada pelo Doutor Evgenii Levin descobriu que ao adicionar o equivalente a 1% de cerio ou itérbio ao composto Bi_2Te_3 , os módulos termoelétricos melhoraram o desempenho em até 25% (ISMAIL, 2009).

Os estudos ainda não explicam o porquê de tal melhoramento, porém os cientistas teorizam que a quantidade mínima de elemento aplicado é suficiente para afetar a estrutura cristalina da liga, fazendo com que aperfeiçoe o efeito *Seebeck*. Os estudos estão ainda mais concentrados por este resultado, pois o Doutor Evgenii garante que quando descobrirem a real causa deste efeito poderá ser encontrado formas para ampliá-lo ainda mais, ou ainda, de procurar por outros elementos ou compostos que são capazes de aumentar ainda mais os efeitos termoelétricos (NASCIMENTO, 2012). As pesquisas continuam e tem como objetivo final descobrir a estrutura cristalina de um material termoeletrico ideal, onde se considera como ideal uma eficiência em média de 20%, nível que, segundo especialistas, viabilizara aplicações industriais, domésticas e automotiva em grande escala. Os resultados recentes obtidos por estes estudos motivam novas pesquisas, novos projetos e novas descobertas.

3.2.3 ANÁLISES DOS FENÔMENOS OCORRENTES NOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

I. Efeito Seebeck

O efeito Seebeck consiste na geração de uma diferença de potência a partir de uma diferença de temperatura (Gradiente Térmico), foi descoberto, em 1821 por Thomas Seebeck acidentalmente, ao verificar que dois condutores de materiais metálicos diferentes, unidos em suas pontas, e com uma diferença de temperatura entre eles, faziam com que uma agulha que estava entre os mesmos fosse deslocada (ALVES, 2008).

Entre os anos 1822 e 1823, Thomas Seebeck publicou seus resultados afirmando que condutores ou semicondutores diferentes produzem uma tensão elétrica quando suas extremidades unidas são submetidas a um gradiente de temperatura (MARTINS, *et al* 2011).

A geração de tensão elétrica a partir de um condutor ser exposto a um gradiente de temperatura é chamada a efeito Seebeck. A eficiência é dada pelo coeficiente de Seebeck (α), e é determinado pela taxa de espalhamento e a densidade dos elétrons de condução sendo definido como a relação entre a tensão elétrica gerada para a diferença de temperatura (UCHIDA, 2008).

Equação 1 - Variação de Tensão Elétrica

$$\Delta V = \alpha(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Onde:

- ΔV é a variação de tensão elétrica
- α é o Coeficiente de *Seebeck* (2) [V/K]; e
- T_1 e T_2 são as temperaturas em que o material está submetido [K].

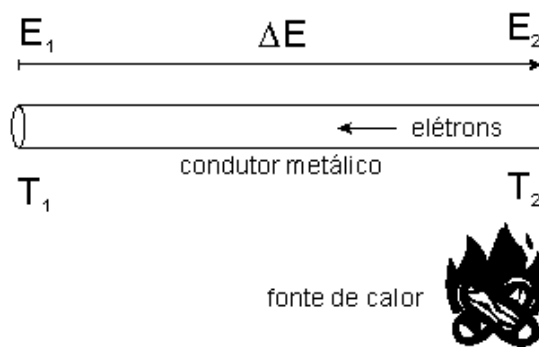
Podemos encontrar o valor do coeficiente de seebeck a partir de (2).

Equação 2 - Coeficiente de Seebeck

$$\alpha = \frac{\Delta V}{T_1 - T_2} \quad (2)$$

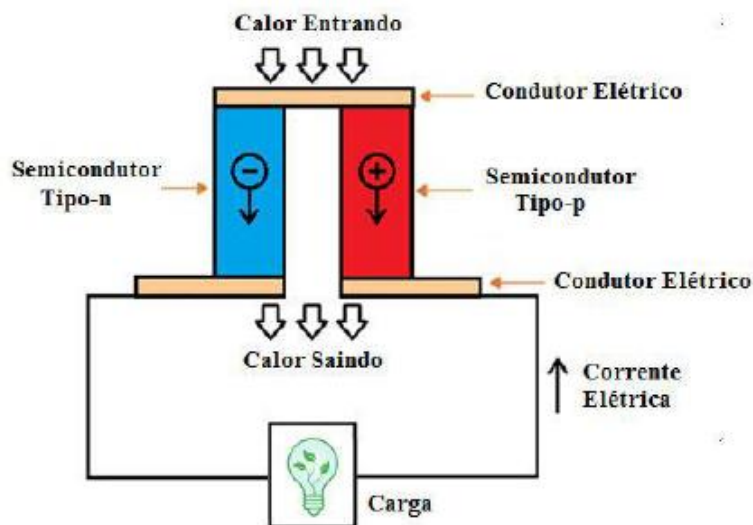
Um bom material termoelétrico tem um Coeficiente de *Seebeck* (α) entre 100mV/K e 300mV/K. Assim, para atingir alguns Volt de tensão são necessários muitos pares termoelétricos ligados em serie (UCHIDA, 2008).

Figura 3 - Demonstração do efeito Seebeck.



Fonte: KAKIMOTO, 2013.

Figura 4 - Demonstração do efeito Seebeck com semicondutores



Fonte: MARTINS, 2011.

II. Efeito Peltier

O efeito *Peltier* foi descoberto alguns anos mais tarde que o efeito Seebeck, em 1834, quando um físico francês chamado Jean Charles Athanase Peltier, descobriu o efeito inverso ao efeito *Seebeck*, ou seja, quando uma corrente elétrica flui no circuito composto por uma junção bimetálica, faz com que a junção dos metais resfrie ou aqueça em função do sentido da corrente (MARTINS, 2011).

O efeito Peltier é o mais utilizado e mais disseminado tanto no ambiente comercial, com aplicação em sistemas de refrigeração, como no ambiente acadêmico para pesquisas e inovações. Com isso, facilmente encontra-se módulos Peltier no mercado, que funcionam gerando um gradiente térmico a partir de uma alimentação elétrica.

O calor absorvido na junção (Q_c) e a potência térmica transmitida dada em [W], por meio de uma espessura (m) de área (m^2), submetida a um gradiente de temperatura (ΔT) em [$^{\circ}C$] e uma condutividade térmica (k) (MARTINS, 2011).

A energia térmica dissipada/absorvida é proporcional à corrente elétrica que percorre o sistema, sendo possível assim definir o calor associado pelo efeito com a seguinte equação:

Equação 3 - Calor Absorvido na junção.

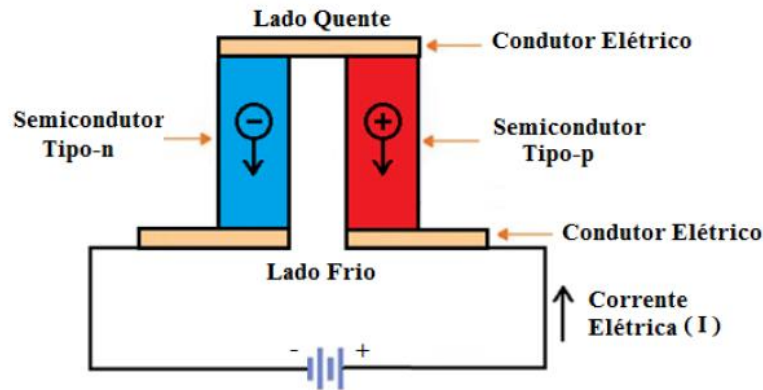
$$Q_c = \pi I \quad (3)$$

Onde:

- Q_c e o calor absorvido na junção;
- π e o coeficiente de *Peltier* [V]; e
- I e a corrente elétrica [A].

Destaca-se que a quantidade de calor fornecido é proporcional a corrente que circula pelos condutores. Sendo a polaridade e a amplitude da tensão aplicada depende do gradiente de temperatura (ΔT) e dos materiais usados em sua confecção (BASTOS, 2010).

Figura 5- Demonstrativo do Efeito Peltier.



Fonte: MARTINS, 2011.

III. Efeito Thomson

O efeito *Thomson* foi descoberto em 1851 por William Thomson. Este efeito provou que um material condutor pode irradiar ou absorver calor do meio exterior, quando submetido a uma corrente elétrica e apresenta uma diferença de temperatura em suas extremidades (MOURA, 2010). O calor irradiado ou absorvido no efeito Thomson é de proporções bem inferiores ao efeito *Peltier*, por isso geralmente é desprezado (ALVES, 2008).

O coeficiente de *Thomson* relaciona o calor com a corrente elétrica e a diferença de temperatura entre a Temperatura da Fonte Fria (T_f) e a Temperatura da Fonte Quente (T_q), correlacionando as grandezas e provando que o Coeficiente *Peltier* (π) está diretamente relacionado com o Coeficiente *Seebeck* (α) (MOURA, 2010). A equação a seguir apresenta esta relação.

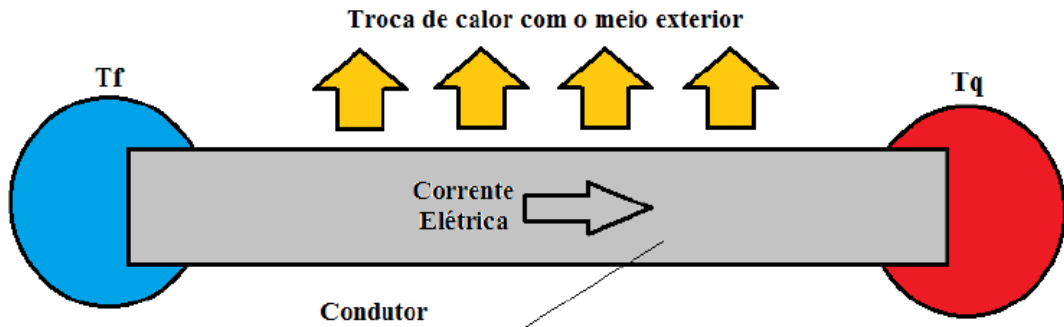
Equação 4 - Energia Térmica libertada

$$\pi = \alpha T \quad (4)$$

Onde:

- T é a temperatura da junção [K]; e
- π a energia térmica libertada ou absorvida por unidade de tempo em função da corrente elétrica (coeficiente *Peltier*) [V].

Figura 6- Demonstrativo do Efeito Thomson.



Fonte: MOURA, 2010.

IV. Efeito Joule

O efeito Joule ou efeito térmico é um efeito comumente utilizado na física que é até uma lei física que expressa a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo. A maior representação desse efeito está na utilização dos resistores que é um dispositivo que transforma a energia elétrica integralmente em calor através da passagem da corrente elétrica.

3.2.4 EFICIÊNCIA DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

A eficiência de conversão de energia térmica em energia elétrica dos módulos termoeletrônicos está correlacionada à Figura de Mérito que é uma medida que relaciona três tipos de grandezas: propriedades elétricas, propriedades de transporte térmico do material e a temperatura absoluta de funcionamento. Um bom material termoeletrônico possui um alto valor de figura de mérito.

Definida como a capacidade dos materiais termoeletrônicos de transformar energia térmica em energia elétrica, para determinada temperatura, integrando o coeficiente de Seebeck α , a resistividade elétrica ρ , e a condutividade térmica k . É representada pela letra Z e é medido em K^{-1} .

Equação 5 - Figura de Mérito

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} \quad (5)$$

A figura de mérito não é constante com a temperatura. Também é encontrado na literatura referência ao parâmetro figura de mérito (ZT – adimensional), calculado a uma determinada temperatura pela equação seguinte (GONÇALVES, 2008).

Equação a seguir determina a Figura de Mérito para um material termoelétrico para uma determinada temperatura.

Equação 6: Parâmetro Figura de Mérito

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} T \quad (6)$$

A origem de “figura de mérito” foi representada no estudo teórico conduzido por Edmund Altenkirch, entre 1909 e 1911, que mostrou que os parâmetros mais importantes na comparação entre vários materiais termoelétricos eram o coeficiente de Seebeck, e as condutividades térmicas e elétrica (esta última inversa da resistividade elétrica, utilizada na fórmula de cálculo de ZT).

O valor da figura de mérito para os mais variados materiais foi quase sempre inferior a unidade à temperatura ambiente (GONÇALVES, 2008). Têm sido desenvolvidas pesquisas no sentido de aumentar o valor de ZT , considerando-se a unidade como um valor para um bom material termoelétrico. Esta característica, ZT , é considerada quando na fase de desenho de qualquer dispositivo termoelétrico, é necessário tomar a decisão sobre o material a utilizar. Como pode ser visualizado na equação de cálculo da figura de mérito, este é dependente de três fatores:

- Coeficiente de Seebeck
- Resistividade elétrica
- Condutividade térmica

Um material para ser bom do ponto de vista termoelétrico terá que possuir um elevado coeficiente de Seebeck e uma condutividade térmica e resistividade elétrica baixa. A correlação entre estas três variáveis são difícil de encontrar num só material. Normalmente, um material que seja bom condutor da eletricidade (resistividade elétrica baixa) é também um bom condutor térmico. São exemplos os metais.

3.2.5 ANÁLISES DOS DISPOSITIVOS QUE UTILIZAM OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

I. Módulo Termoelétrico

Os módulos termoelétricos são capazes de operarem como geradores de gradiente de temperatura ou como geradores de energia elétrica em corrente contínua (SANTOS, 2010). Cada junção é constituída por materiais semicondutores um do tipo-p e outro do tipo-n. Os mesmos são ligados em série, agrupados em pares e envolvidos por uma capa cerâmica. As placas cerâmicas possuem condutores de cobre que permitem unir os materiais eletricamente em série e termicamente em paralelo (BASTOS,2010).

II. Termopar

Os termopares são umas das poucas aplicações do efeito Seebeck utilizadas atualmente. Entretanto, poucos dos usuários de termopar sabem do efeito que possibilita a medição da temperatura. Um termopar é composto por dois condutores metálicos distintos, o metal puro ou ligas homogêneas. Os dois metais são soldados numa extremidade que vai ao local onde se deseja fazer a medição de temperatura e a outra extremidade dos condutores e utilizada para a medição (CAVALCANTE, 2015).

Ao visualizar o funcionamento do termopar, percebe-se que ele utiliza o efeito Seebeck para determinar a temperatura de um objeto, a partir da comparação com a temperatura de um ambiente de referência que é o próprio equipamento. Nos termopares o efeito Seebeck não é utilizado com a intenção de gerar energia, mas, sim, de gerar uma diferença de potencial devido ao gradiente, e assim conseguir determinar a temperatura do objeto desejado.

3.2.6 ESTUDO DAS ATUAIS APLICAÇÕES DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

Nos dias atuais tem-se discutido muito sobre fontes de energias limpas e renováveis, consequentemente, a energia proveniente do fenômeno termoelétrico surgiu como uma alternativa dentre as possibilidades. Logo, a utilização de módulos termoelétricos apresenta certas vantagens, como uma alta durabilidade, grande precisão e volume reduzido, além de ser uma excelente forma de captação de energia térmica residual, ou seja, e uma cogeração de energia limpa (ISMAIL,2009).

O efeito Peltier é utilizado em pastilhas, também conhecidas como módulos de Peltier para diversos fins, tais como a refrigeração de componentes eletrônicos, já que podem, sem a necessidade de muito espaço, trocar calor com o ambiente continuamente sem a necessidade de gases ou equipamentos que poluam o meio ambiente, apenas necessitando de uma fonte elétrica de corrente contínua e dissipadores.

Chamada de pastilha devido a seu formato, usualmente, retangular e achatado, é constituída de duas "chapas" de material isolante, normalmente cerâmico, com uma malha de material condutor na superfície interna de cada chapa. Entre as duas malhas de condutores, estão localizadas diversos pares de semicondutores de tipo "*n*" e "*p*", que dão início ao efeito Peltier, transformando energia elétrica, proveniente de uma fonte, em energia térmica e, graças ao posicionamento e ordenação dos pares, absorvendo calor em uma chapa e dissipando calor em outra.

Os pares de semicondutores "tipo-*n*" e "tipo-*p*" possuem propriedades específicas que, se posicionados de maneira correta, permitem direcionar adequadamente o fluxo de elétrons e calor por entre seus terminais positivos e negativos. Em um semicondutor do tipo-*n*, o calor é absorvido próximo ao terminal negativo e rejeitado próximo ao terminal positivo, já em um semicondutor do tipo-*p* o processo se dá de maneira inversa, absorvendo calor próximo ao terminal positivo e rejeitando-o próximo ao terminal negativo.

Dessa maneira, é possível perceber que, arranjando ambos semicondutores em pares ordenados, seus efeitos se completam, ampliando sua magnitude e continuidade. Em uma pastilha de Peltier, se faz extremamente necessário utilizar dissipadores na chapa que irá fornecer calor ao meio, isso porque caso o calor gerado não consiga ser dissipado para o ambiente, será então para a própria pastilha, encaminhando o sistema a um equilíbrio térmico, reduzindo drasticamente a vida útil da pastilha.

Em alguns projetos é possível encontrar pastilhas empilhadas convergindo seus lados que dissipam calor com o lado absorvente de outra pastilha, com isso, é possível ampliar o poder de refrigeração na primeira pastilha.

Já o efeito Seebeck é muito utilizado para a construção de termômetros em que se mede diferença de temperatura através de um voltímetro calibrado para este fim.

Outra aplicação deste mesmo efeito é a construção de pilhas atômicas (Gerador termoelétrico de radioisótopos) para produzir pequenas potências, mas pode ser usado também

na cogeração com a utilização dos módulos ou pastilhas termoelétricas que se assemelham as pastilhas Peltier, porém na função inversa.

Podendo assim aumentar a eficiência de uma caldeira ou máquina térmica a partir da aplicação de um sistema de cogeração de energia, com a utilização dos módulos para transformar calor desperdiçado no sistema de exaustão da caldeira em energia elétrica útil. Os módulos termoelétricos são dispositivos geradores de energia em estado sólido, ou seja, não precisam efetuar movimentos para gerar energia. Característica que o torna em um gerador de baixo custo tornando o seu uso viável economicamente para o reaproveitamento de calor e à cogeração de energia.

3.3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

3.3.1 INTRODUÇÃO

Os automóveis convencionais tem sua propulsão por motores de combustão interna que é uma máquina térmica, o qual transforma a energia proveniente de uma reação química do combustível em energia mecânica. Essa energia é proveniente de uma reação exotérmica de um combustível junto a oxigênio dentro das fronteiras do sistema.

Nos motores de combustão interna o fluido de trabalho, combustível, não tem um ciclo termodinâmico completo, ele é expelido do motor como gases, com menor energia química, conhecido como gases de exaustão, e não retorna ao estado inicial o que o caracteriza como ciclo termodinâmico aberto. O ciclo aberto é a característica de todos os motores de combustão interna.

O estudo do desempenho de um motor de combustão interna tem uma elevada complexidade e normalmente necessita de uma simulação computacional. Para uma análise termodinâmica, normalmente, faz-se uma simplificação no sistema dos motores de combustão interna. A simplificação consiste em empregar uma análise de ar-padrão com as seguintes considerações:

- Considerar uma quantidade fixa de ar modelado como gás ideal;
- Considerar o processo de combustão como uma transferência de calor;
- Não considerar os processos de admissão e descarga como no motor real;

- Considerar que todos os processos são internamente reversíveis.

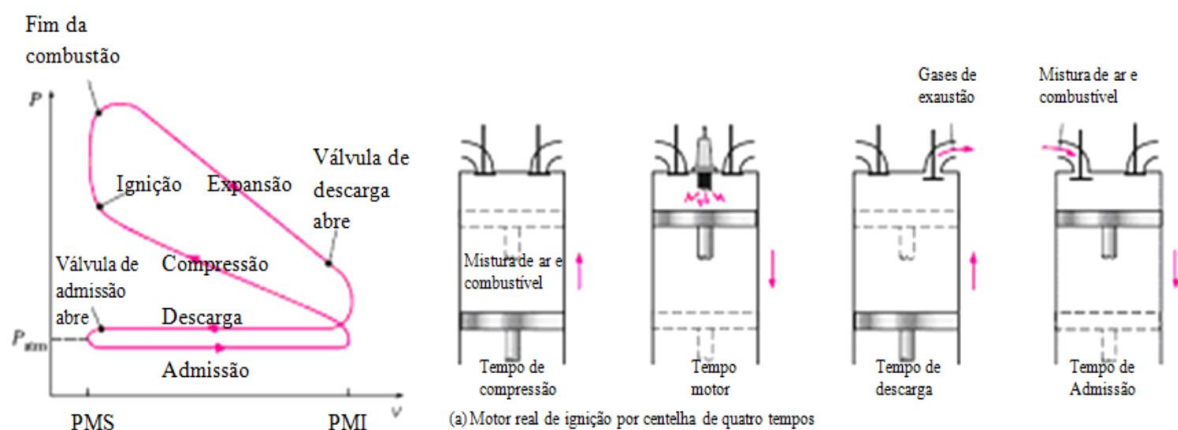
Os motores de combustão mais utilizados são em automóveis são os motores Ciclo Otto e o Ciclo Diesel. Onde os que funcionam segundo a aspiração da mistura ar-combustível são os de Ciclo Otto e posteriormente promovem a combustão pela queima da mistura através de uma faísca, e os motores que aspiram apenas o ar e, logo após a compressão, e pulverizado o combustível que logo promove a queima devido ao elevado calor e pressão gerados pela compressão do ar de admissão são os de Ciclo Diesel. Os estão mais detalhados a seguir.

3.3.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLOS OTTO E DIESEL

I. Ciclo Otto

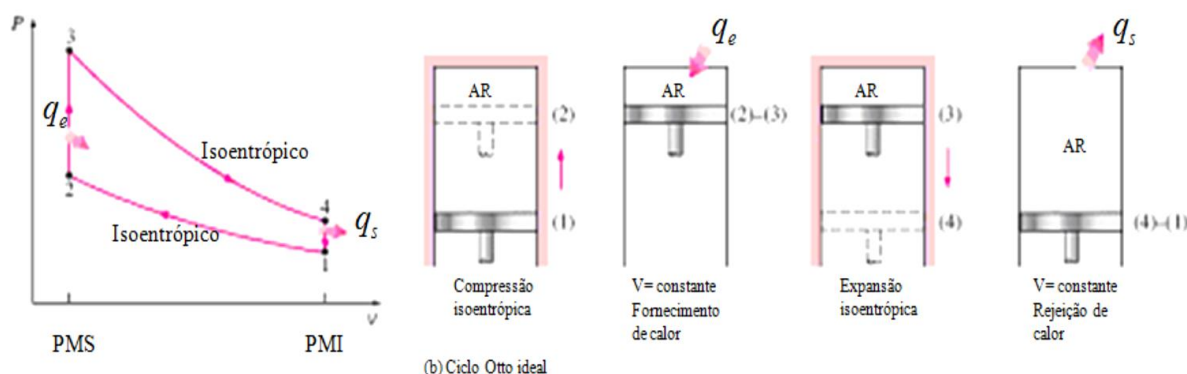
O ciclo Otto tem a combustão iniciada por uma descarga elétrica de alta tensão, chama de centelha. Na maioria dos motores de ignição por centelha, o pistão executa quatro cursos completos e o eixo de manivelas realiza duas revoluções completa para cada ciclo termodinâmico, determinando como motores de quatro tempos. Os quatro tempos do motor de combustão interna do ciclo Otto real e ideal e seus respectivos gráficos de Pressão X Volume são mostrados na Figura 4.1 e 4.2, a seguir;

Figura 7- Ciclo real dos motores de ignição por centelha seus diagramas P-V



Fonte: CENGEL E BOLES, 2011.

Figura 8 - Ciclo ideal dos motores de ignição por centelha seus diagramas P-V



Fonte: CENGEL E BOLES, 2011.

1. Tempo de Compressão, com a válvula de admissão e de descarga fechadas e o pistão estando no PMI o pistão move-se para cima, comprimido a mistura de ar e combustível, atingindo a posição PMS;
2. Tempo de Expansão, com o pistão no PMS, a vela solta faísca, a mistura sofre ignição, aumentando a pressão, a temperatura do sistema e os gases à alta pressão forçam o pistão para baixo, forçando o eixo de manivelas a girar, produzindo trabalho;
3. Tempo de Exaustão, com o pistão no PMI o mesmo move-se para cima mais uma vez, expulsando os gases de exaustão através da válvula de descarga;
4. Tempo de Admissão, com o pistão no PMS o mesmo move-se para baixo admitindo a mistura de ar e combustível através da válvula de admissão (CENGEL e BOLES, 2011).

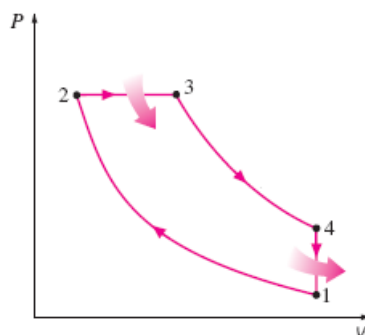
Há uma complexidade de fazer uma análise termodinâmica do ciclo de quatro tempo dos motores de combustão interna, mas para simplificar utiliza-se a hipótese do padrão a ar.

II. Ciclo Diesel

O ciclo Diesel tem a combustão iniciada pela alta pressão a qual o combustível é injetado, chamado assim de ignição por compressão. Nos motores de ignição por compressão, o ar é comprimido até que a temperatura relacionada a pressão esteja acima da temperatura de auto-ignição do combustível, e a combustão é iniciada à medida que o combustível é injetado nesse ar quente. Como apenas o ar é comprimido durante o tempo de compressão, torna impossível a ocorrência de auto-ignição, essa característica permite que os motores do ciclo diesel operem a taxas de compressão muito mais altas. Logicamente no motor diesel não existe uma vela de ignição, no lugar desse dispositivo existe um injetor de combustível que tem a capacidade de injetar o combustível a alta pressão.

O processo de combustão nos motores do ciclo Diesel ocorre em um intervalo mais longo devido que a injeção de combustível começa quando o pistão se aproxima do ponto morto superior (PMS) e perdurar até a primeira parte do tempo de expansão. Com isso o processo de combustão do ciclo Diesel ideal é considerado como um processo de fornecimento de calor à pressão constante, diferenciando do processo de combustão do ciclo Otto que é fornecimento de calor a volume constante. Já que os outros tempos do ciclo diesel são iguais ao o ciclo Otto.

Figura 9- Diagrama P-V do Ciclo Diesel



Fonte: CENGEL E BOLES, 2011

1. Compressão isentrópica (1-2)
2. Fornecimento de calor a pressão constante (2-3)
3. Expansão isentrópica (3-4)
4. Rejeição de calor a volume constante (4-1)

Comparando os dois tipos de motores citados, o motor Diesel tem uma relação de compressão maior que o motor Otto. O motor Diesel também queima melhor o combustível, desde que trabalhe a baixa revolução por minuto. A eficiência térmica do motor diesel é aproximadamente 40%. (CENGEL, BOLES; 2011).

3.3.3 COMBUSTÃO

A combustão é a rápida oxidação dos elementos do combustível com o ar resulta em uma liberação de energia térmica e os produtos de combustão, gases, são formados. Em reações químicas a massa é conservada, assim, toda a massa dos produtos é igual à massa dos reagentes, normalmente com o volume específico bem maior. A massa total de cada elemento químico

deve ser a mesma em ambos os lados da equação, muito embora os elementos existam como compostos químicos distintos na forma de reagentes e produtos. No entanto, o número de moles dos produtos pode ser diferente do número de moles dos reagentes.

I. Combustíveis

Os combustíveis são normalmente hidrocarbonatos líquidos, exceto o Gás natural Veicula (GNV), derivados do petróleo através de processos de destilação. Como exemplo tem-se a gasolina, o óleo diesel e o querosene. A maioria dos combustíveis líquidos é mistura de hidrocarbonetos cuja composição é, via de regra, fornecida em termos de frações mássicas. De modo a simplificar os cálculos em combustão, a gasolina pode ser modelada como uma octana, C_8H_{18} .

O gás natural, hidrocarbonatos gasosos, consiste em uma série de diferentes hidrocarbonetos, sendo metano (CH_4) o principal, são obtidos de poços de gás natural ou são produzidos em certos processos químicos. As composições de combustíveis hidrocarbonatos gasosos são dadas em termos de frações molares.

II. Ar de combustão

Para que ocorra a combustão no motor necessita-se de oxigênio. Esse não precisa ser puro, mas tem que está na quantidade recorrente ao balanceamento estequiométrico da reação de combustão, sabendo se também que o oxigênio puro somente é utilizado em aplicações especiais como o corte e a soldagem. Na maioria das aplicações em combustão, o ar fornece o oxigênio necessário. A composição de uma amostra típica de ar seco é fornecida pela tabela 2.5, segundo Moran & Shapiro (2014).

Tabela 1- Composição aproximada do ar seco.

Componente Fração molar (%)

Nitrogênio -----	78,08
Oxigênio -----	20,95
Argônio -----	0,93
CO₂ -----	0,03
Outros -----	0,01

Fonte: Moran & Shapiro (2014).

Para os cálculos de combustão, o seguinte modelo é utilizado visando a uma simplificação.

- Os componentes do ar, exceto o oxigênio, são agrupados juntamente com o nitrogênio. Com isso, o ar é considerado como 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio.
- O ar está considerado sem vapor d'água. Quando o ar úmido estiver associado à combustão, o vapor d'água presente deve ser considerada ao se escrever a equação de combustão.
- Admitiremos também que o nitrogênio presente no ar de combustão não sofre uma reação química, ou seja, o nitrogênio é considerado inerte.

III. Razão ar-combustível

A razão ar-combustível é basicamente a relação entre as quantidades de ar e a quantidade de combustível na reação de combustão. Esta razão pode ser escrita em uma base molar, pela quantidade de moles, ou em uma base mássica, a quantidade mássica de ar e de combustível.

Equação 7: Razão ar-combustível

$$\frac{\text{Massa de ar}}{\text{Massa de combustivel}} = \frac{\text{moles de ar}}{\text{moles de combustivel}} \left(\frac{MMar}{MMcombustivel} \right) \quad (7)$$

IV. Ar teórico

Considera-se com a quantidade de ar, mínima, que fornece oxigênio suficiente para combustão completa de todo o combustível, fazendo a equalização da reação e estabilizando os produtos que contem carbono, hidrogênio e enxofre.

Normalmente, a quantidade de ar fornecida é um pouco maior que a quantidade de ar teórico. A quantidade de ar que é de fato fornecida é comumente expressa em percentagem de ar teórico, ou como uma percentagem de excesso ou uma percentagem de deficiência de ar. Assim, 150% de ar teórico é equivalente a 50% de excesso de ar e 80% de ar teórico é o mesmo que 20% de deficiência de ar.

A relação da mistura ar-combustível empregada com a mistura ar-combustível estequiométrica (Ar teórico) admitida para o melhor rendimento do motor e representada pela letra grega lambda, definida:

Equação 8- Equação de Lambda

$$\lambda = \frac{\text{Mistura ar-combustível empregada}}{\text{Ar-combustível Teórico}} \quad (8)$$

Assim a mistura pode ser classificada da seguinte forma:

- $\lambda < 1,0$ - Mistura rica (deficiência de ar)
- $\lambda = 1,0$ - Mistura estequiométrica
- $\lambda > 1,0$ - Mistura pobre (excesso de ar)

V. Produtos de combustão

Na combustão completa para um hidrocarboneto normalmente os principais produtos possíveis são CO₂, H₂O, N₂, outros elementos inerte presente no ar ou no combustível e o O₂ caso esteja ocorrendo com excesso de ar. Se o combustível for especificado e se a combustão for completa, as respectivas quantidades de produtos podem ser determinadas pela aplicação do princípio da conservação de massa à equação química.

3.3.4 POTÊNCIA GERADA EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

De acordo com Martins (2006), a energia recebida pelo motor de combustão interna, a partir do combustível, pode ser calculada pelo produto da vazão mássica do combustível pelo poder calorífico do mesmo, como na equação abaixo:

Equação 9 - Energia Total recebido pelo motor, pelo combustível.

$$\dot{Q}_f = \dot{m} \times Q_{pi} \quad (9)$$

Onde:

- $\dot{Q}_f \rightarrow$ Energia total recebida pelo motor, pelo combustível (KW);
- $\dot{m} \rightarrow$ A vazão mássica de combustível (Kg/s);
- $Q_{pi} \rightarrow$ Poder calorífico do combustível (KJ/Kg).

Sendo essa energia fornecida pelo combustível (Q_f) transformada em Energia útil (efetivo) (WE), outra parte é perdida no sistema de arrefecimento do motor (Q_{arr}) outra parte dessa energia é perdida na forma de calor pelo escapamento do motor (Q_{ge}), e o restante é perdido para o ambiente pelas trocas térmicas no arrefecimento do óleo (havendo radiador de óleo), na convecção e na radiação (Q_{rest}).

Equação 10 - Dissipação da energia do combustível.

$$Q_C = W_e + Q_{arr} + Q_{ge} + Q_{rest} \quad (10)$$

Segundo Martins (2006), valores frequentes referentes a essa dissipação da energia do combustível em condição de plena carga, encontram-se dispostos da seguinte forma:

Motor de Ignição por centelha:

- $W_e \rightarrow$ entre 25% e 35%;
- $Q_{arr} \rightarrow$ entre 20% e 35%;
- $Q_{ge} \rightarrow$ entre 25% e 45%;
- $Q_{rest} \rightarrow$ entre 3% e 10%.

Motor de Ignição por compressão:

- $W_e \rightarrow$ entre 30% e 45%;
- $Q_{arr} \rightarrow$ entre 15% e 30%;
- $Q_{ge} \rightarrow$ entre 20% e 35%;
- $Q_{rest} \rightarrow$ entre 2% e 6%.

3.3.5 ENERGIA LIBERADA NO ESCAPAMENTO

Podemos dizer que boa parte da energia do combustível que não é transferida as rodas de um automóvel, com motor de combustão interna, e dissipada nos gases de escapes sobre a forma de calor que normalmente é perdida para o meio ambiente.

Segundo Albuquerque (2016), como resultado de seu trabalho a energia liberada no escapamento deve ser maior 56,48 KW (que equivale aproximadamente a 18,09% em um motor com uma eficiência teórica 25,64%) já que não conseguiu atingir a temperatura de trabalho real do motor que é maior que 375°C, atingida na sua análise.

De acordo com Albuquerque (2016), utilizando a temperatura dos gases de escapamento na saída do motor é possível calcular a quantidade de energia que é liberada no escape pela seguinte equação:

Equação 11 - Quantidade de energia liberada no escapamento.

$$e = \Delta H * \dot{m}GASES \quad (11)$$

Onde,

- $e \rightarrow$ A quantidade de energia liberada no escapamento (W);
- $\Delta H \rightarrow$ Variação de entalpia (J/Kg);
- $\dot{m}GASES \rightarrow$ Vazão mássica dos gases no escapamento (Kg/s).

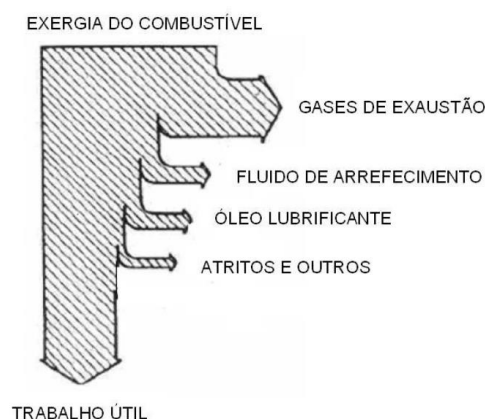
O valor da Variação de entalpia podendo ser calculado com auxílio das tabelas termodinâmicas para a combinação dos componentes e facilitadas com auxílio de *software* de soluções.

A importância de saber a quantidade de energia disposta no escapamento é a possibilidade quantitativa de utilizá-la em um sistema de cogeração e um conceito bastante útil nesse momento é o potencial exergético dos automóveis.

A exergia, diferentemente da energia, não é conservada. Em cada parte do sistema existe um potencial exergético. O diagrama que representa a exergia em cada parte do sistema é chamado de diagrama de Grassmann (KOTAS, 1985).

O diagrama de Grassmann aplicado a motores de combustão interna é mostrado na figura 10, abaixo.

Figura 10- Diagrama de Grassmann aplicado a MCI.



Fonte: (CARVALHO, 2011).

Carvalho (2011) realizou Análise da Exergia em Partes do Sistema do motor de combustão interna (MCI) de ignição por centelha (Ciclo Otto) e utilizando como combustível a Gasolina Comum Brasileira, obtendo valores de energia liberada pelos gases de exaustão em percentual em relação à exergia química do combustível, relacionada às rotações, dispondo da seguinte forma:

- 1500 RPM → 21,1%;
- 2000 RPM → 23,85%;
- 2500 RPM → 23%.

A exergia nos gases de exaustão nos automóveis, normalmente, não é aproveitada, sendo esses gases apenas lançados ao meio ambiente nas formas de calor e pressão. Existem, no entanto, muitas possibilidades de aproveitamento da exergia nos processos dos MCI, tanto provindas dos gases de exaustão como no sistema de arrefecimento (CARVALHO, 2011).

3.3.6 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência é o principal fator propulsor e medidor da cogeração desde a história, que se busca a maior eficiência de todos os sistemas e nas últimas décadas a busca da maior eficiência vem sendo impulsionada pela crise econômica e a crise de recursos naturais, que ainda é a principal fonte de energia mundial, e o melhor rendimento significa menos consumo com mesmo resultado. Mas também a eficiência ou rendimento é o principal parâmetro de comparação de um sistema sem cogeração e um com cogeração.

A eficiência é basicamente a relação da energia de saída do sistema em estudo pela energia fornecida ao sistema, no caso dos automóveis é a relação entre o trabalho real produzido pelas rodas e o valor da energia fornecida pelo combustível. Que pode ser calculada pela seguinte fórmula:

Equação 12 - Eficiência Térmica.

$$\eta = \frac{W}{PCI \times \dot{m}_c} \quad (12)$$

Onde:

- $\eta \rightarrow$ Eficiência térmica;
- $W \rightarrow$ Trabalho realizado, energia disponível;
- $\dot{m}c \rightarrow$ A vazão mássica de combustível consumida pelo motor;
- $PCI \rightarrow$ Poder calorífico inferior do combustível.

A eficiência térmica de um sistema de cogeração deve ser maior do que a eficiência do motor sem a cogeração, visto que uma parcela de energia adicional será produzida, sem custo de combustível, além do trabalho real produzido normalmente. Logo, essa eficiência pode ser calculada da seguinte forma:

Equação 13- Eficiência térmica de cogeração.

$$\eta = \frac{W + E2}{\dot{m}c \cdot PCI} \quad (13)$$

Onde:

- $\eta \rightarrow$ Eficiência térmica;
- $W \rightarrow$ Trabalho realizado;
- $\dot{m}c \rightarrow$ A vazão mássica de combustível consumida pelo motor;
- $PCI \rightarrow$ Poder calorífico inferior do combustível;
- $E2 \rightarrow$ Energia gerada pelo sistema de cogeração.

3.4 BASE DE CÁLCULOS

3.4.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre dois meios, obrigatoriamente irá ocorrer uma transferência de calor. De acordo com Incropera (2014), transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. O calor flui das temperaturas mais altas para as temperaturas mais baixas, sempre nesse sentido, até atingirem o equilíbrio térmico. Após adquirirem a mesma temperatura, a transferência de calor entre eles deixa de ocorrer.

Os três principais objetivos do estudo da transferência de calor são:

- Determinar a Taxa de transferência de calor de um sistema;
- Determinar o tempo de aquecimento ou de arrefecimento;
- Determinar a variação de temperatura.

Existem três modos básicos de transferência de calor, são eles: Condução, convecção e radiação. Em um processo de transferência de calor, geralmente os três modos estão presentes simultaneamente, embora em intensidades diferentes. Nos próximos tópicos vamos falar um pouco de cada um desses modo separadamente, mostrando as características particulares e as fórmulas para calcular a quantidade de calor que está sendo transferida por cada processo.

I. Transferência de Calor Por Condução

Condução é o processo de transmissão de calor que ocorre dentro de uma substância ou entre substâncias que se encontram em contato, e esse modo de transferência de energia, que pode ser em um sólido ou em um fluido estacionário, ocorre entre as partículas mais energéticas em direção às menos energéticas devido as interações envolvidas entre essas partículas.

Pela lei de Fourier, pode-se calcular a quantidade de energia que está sendo transferida por unidade de tempo no processo de condução. Essa taxa de transferência de calor por condução é dada pela seguinte equação:

Equação 14 - Taxa de transferência de calor por condução.

$$q = \frac{-K.A.\Delta T}{L} \quad (14)$$

Onde:

$q \rightarrow$ Taxa de transferência de calor por condução (W);

$K \rightarrow$ Condutividade térmica ($W/(m.K)$);

$A \rightarrow$ Área através da qual o calor flui (m^2);

$\Delta T \rightarrow$ Diferença de temperatura (K);

$L \rightarrow$ Espessura.

II. Transferência de Calor Por Convecção

Transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície e um fluido adjacente em movimento, existindo assim um gradiente de temperatura entre eles. Esse movimento se associa tanto para difusão (movimento molecular aleatório) quanto para o movimento global do fluido (movimento macroscópico).

Segundo Incropera (2014) a natureza do escoamento do fluido para a transferência de calor por convecção pode ser classificada da seguinte forma:

- Convecção forçada: quando o movimento do fluido é causado por meios externos, ou seja, quando utilizamos equipamentos para aumentar a velocidade do fluido, como um ventilador por exemplo.
- Convecção natural: Quando o escoamento do fluido é proporcionado apenas por forças de empuxo, devido a diferença de densidade causada pela diferença de temperatura no fluido.

A equação apropriada para calcular a taxa de transferência de calor por convecção é conhecida como lei do resfriamento de Newton:

Equação 15- Taxa de transferência de calor por Convecção.

$$q = h \cdot A \cdot (T_S - T_\infty) \quad (15)$$

Onde:

$q \rightarrow$ Taxa de transferência de calor por convecção (W);

$h \rightarrow$ Coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$);

$A \rightarrow$ Área de superfície pela qual o calor está sendo transferido (m^2);

$T_S \rightarrow$ Temperatura da superfície (K);

$T_\infty \rightarrow$ Temperatura do fluido (K).

Para calcular a taxa de transferência de calor por convecção, existe a dificuldade em determinar o valor do coeficiente de convecção, pois o mesmo depende de várias variáveis como: das condições da camada limite; da geometria da superfície; da natureza do escoamento do fluido e das propriedades físicas do fluido (densidade, viscosidade, condutividade térmica, calor específico). Após encontradas essas variáveis, podemos identificar qual a correlação que poderemos utilizar para calcular o valor do coeficiente convectivo e com isso encontrar o valor da taxa de transferência de calor por convecção.

Para encontrar o coeficiente convectivo precisa-se primeiramente encontrar valor do número de Reynolds.

Equação 16- Número de Reynolds.

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot L}{\nu} \quad (16)$$

Onde:

$Re \rightarrow$ Número de Reynolds (adimensional);

$u_{\infty} \rightarrow$ Velocidade cinemática do fluido (m/s);

$L \rightarrow$ Comprimento da superfície pela qual o fluido escoar (m);

$\nu \rightarrow$ Viscosidade (m^2/s).

Calculado o valor do número de Reynolds, pode-se determinar se o escoamento é laminar ou turbulento. Considerando que as superfícies dos equipamentos do sistema de trigeração do IES podem ser consideradas como superfícies planas, Incropera (2014) afirma que se o valor do número de Reynolds for menor do que $5 \cdot 10^5$ o escoamento é considerado laminar, caso contrário o escoamento será considerado turbulento.

Utilizando a tabela de correlações A1 localizada em Anexo, pode-se identificar qual a correlação usar para que possa calcular o número de Nusselt.

Após o cálculo o número de Nusselt, finalmente encontra-se o valor do coeficiente convectivo e com ele encontrar a taxa de transferência de calor por convecção.

Equação 17- Coeficiente Convectivo.

$$h = \frac{Nu \cdot K}{L} \quad (17)$$

Onde:

$h \rightarrow$ Coeficiente convectivo ($W/(m^2 \cdot K)$);

$Nu \rightarrow$ número de Nusselt (adimensional)

$K \rightarrow$ Condutividade térmica ($W/(m \cdot K)$);

$L \rightarrow$ comprimento da superfície (m).

As propriedades do ar necessárias para o cálculo do coeficiente convectivo (como a viscosidade cinemática, condutividade térmica e o número de Prandtl), podem ser encontradas na tabela A2 localizada em Anexo. Essas propriedades devem ser avaliadas na temperatura do filme, que é a média entre as temperaturas da superfície e do fluido.

III. Transferência de Calor Por Radiação

Toda superfície que esteja acima de zero Kelvin emite energia na forma de ondas eletromagnéticas. Com isso, mesmo na ausência de um meio, duas substâncias que estejam a diferentes temperaturas, existirá uma transferência de calor por radiação entre elas (DONOSO, 2019).

Pode-se dizer que a taxa de radiação emitida por unidade de área da superfície recebe o nome de poder emissivo. Para uma determinada temperatura, o maior valor possível para o poder emissivo é quando se considera que essa superfície seja um corpo negro (uma superfície idealizada). Através da lei de Stefan-Boltzmann podemos calcular esse poder emissivo.

Equação 18- Poder emissivo de um corpo negro.

$$E_n = \sigma \cdot T_s^4 \quad (18)$$

Onde:

$E_n \rightarrow$ Poder emissivo de um corpo negro (W/m^2);

$\sigma \rightarrow$ Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$);

$T_s \rightarrow$ Temperatura absoluta na superfície (K).

O cálculo do poder emissivo de uma superfície real, deve ser feito primeiramente entendendo o conceito da propriedade chamada de *emissividade*, que é uma razão entre a radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um corpo negro a mesma temperatura (INCROPERA, 2014). Logo, para o cálculo do poder emissivo de uma superfície real deve-se utilizar o produto entre o valor dessa emissividade e o poder emissivo do corpo negro para a mesma temperatura, descrito na equação abaixo:

Equação 19- Poder emissivo da superfície.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (19)$$

Onde:

$E \rightarrow$ Poder emissivo da superfície (W/m^2);

$\varepsilon \rightarrow$ Emissividade da superfície ($0 \leq \varepsilon \leq 1$);

$\sigma \rightarrow$ Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$);

$T_s \rightarrow$ Temperatura absoluta na superfície (K).

3.4.2 PRINCÍPIO DE GERADORES ELÉTRICOS

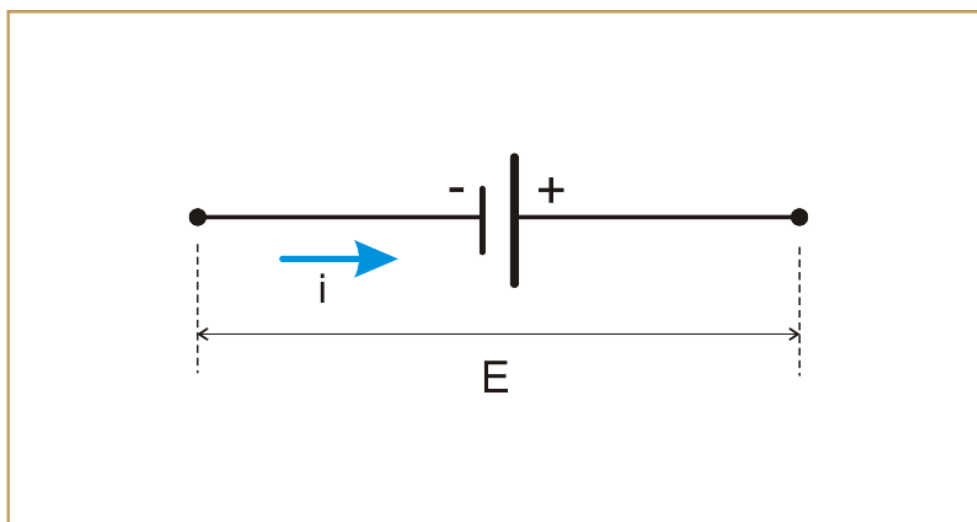
I. Definição de Gerador

Geradores são dispositivos que convertem algum tipo de energia em energia elétrica. Um gerador tem dois polos, um positivo e um negativo, que mantém a tensão nos seus terminais, a observação desta tensão permite a classificação em dois grupos: os geradores Ideais e geradores Reais.

- **Gerador Ideal**

Em um gerador ideal não existem perdas, variação de tensão, logo toda a energia não elétrica é convertida em energia elétrica, contudo na prática estes geradores não existem. Esses geradores tem a tensão interna do gerador verificada nos polos e é chamada de força eletromotriz (E) e o seu valor depende da construção do gerador.

Figura 11- Gerador Ideal



Fonte: Site Os Fundamentos da Física¹

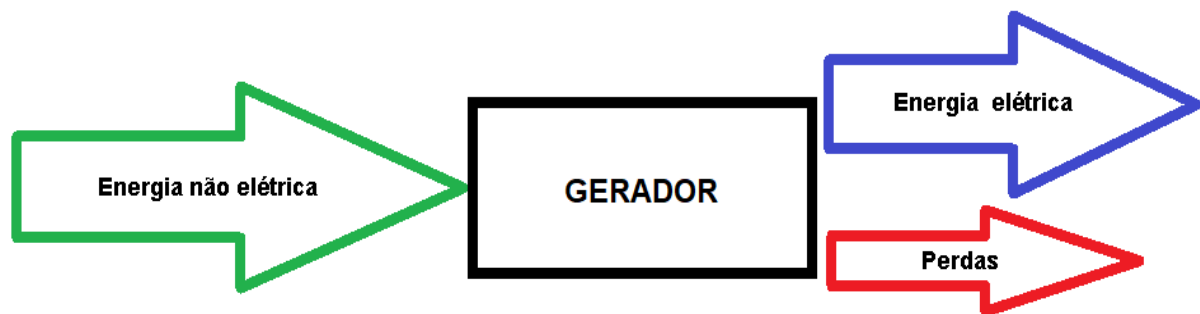
¹ Disponível em: < http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2013/08/cursos-do-blog-eletricidade_28.html >
Acesso dia 18 de dezembro de 2019.

Nesta classificação não existem perdas porque esses geradores não tem resistência interna, como consequência além de não ter perdas internas, a tensão nos polos nesses geradores não varia da corrente, desta forma a curva característica no gráfico Tensão x Corrente é uma linha reta.

- **Gerador Real**

Os geradores existentes são da classe dos geradores reais pois existem perdas internas e o valor da tensão varia dependente da corrente, isto se dá porque uma parte da energia do gerador é usada para fazer o gerador funcionar, energia essa que é perdida na forma de calor e a parte excedente é a convertida em energia elétrica.

Figura 12- Gerador de Tensão Real

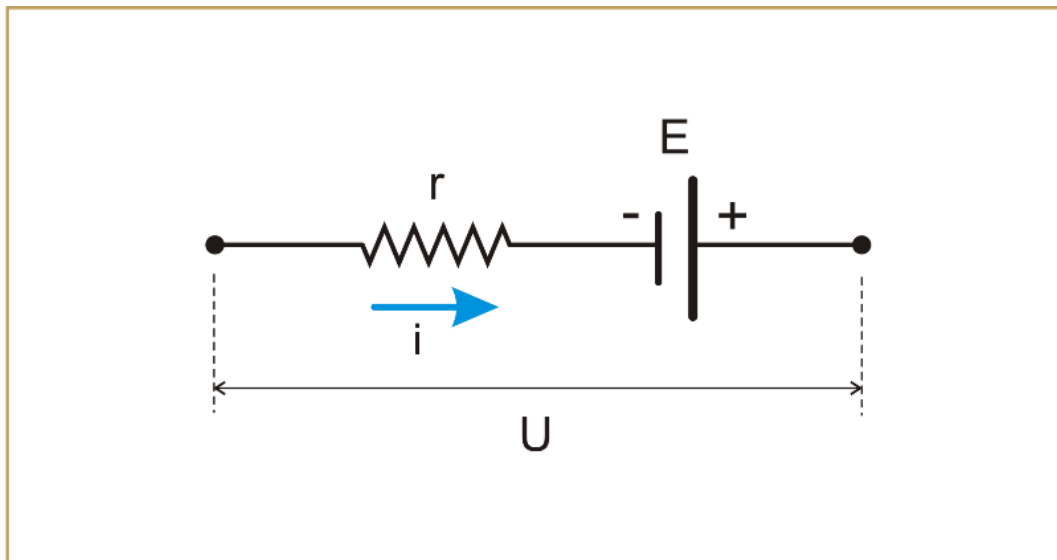


Fonte: Próprio autor

Nos geradores de tensão real o valor nos seus terminais diminui com o aumento da intensidade da corrente, isso ocorre pelo fato do gerador possuir uma resistência interna que provoca queda de tensão interna, ou seja, uma parte da energia é utilizada para vencer essa resistência.

Na representação de um gerador real considera-se a existência da resistência interna e inclui uma resistência em serie com a tensão gerada internamente na representação.

Figura 13- Gerador Real



Fonte: Site Os Fundamentos da Física.²

- **Equação do Gerador**

A tensão entre os polos de um gerador real é igual à tensão de um gerador ideal, que é força eletromotriz E , menos a tensão retida na resistência interna, que igual ao produto da corrente pela resistência interna. assim, podemos escrever a chamada equação característica do gerador:

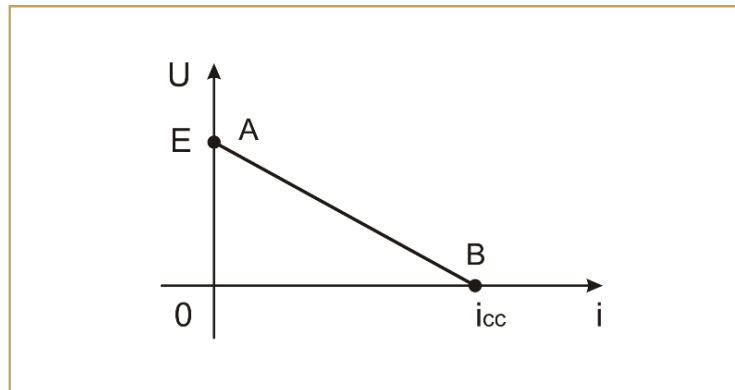
Equação 20- Equação característica do Gerador.

$$U = E - r \times i \quad (20)$$

A partir desta equação fica possível determinar a curva característica desse gerador no gráfico Tensão x Corrente onde mostra a variação da tenção disponível com o aumento da corrente mostrada na figura 14.

² Disponível em: http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2013/08/cursos-do-blog-eletricidade_28.html. Acesso dia 18 de dezembro de 2019.

Figura 14- Curva característica Gerador de real.



Fonte: Site Os Fundamentos da Física³

Com o gráfico Tensão x Corrente tem dois pontos importantes de se observar são os pontos A e B. Que são, respectivamente, Gerador em Aberto e Gerador em curto circuito.

Um gerador está em circuito aberto quando não está ligado em nenhum circuito elétrico externo, assim não tem passagem de corrente elétrica pelo gerador, significando valor de corrente igual a zero. Com corrente igual a zero anulasse o segundo termo do lado direito da equação característica do gerador, como mostra a equação 22 a seguir.

Equação 21- Equação característica do Gerador com corrente nula.

$$U = E \quad (21)$$

Um gerador é considerado em curto-circuito quando está ligado a um circuito vazio, sem carga, e seus polos estão ligados por um fio de resistência considerada nula.

Nestas condições, a tensão entre os polos do gerador é igual a zero, anulando o termo do lado esquerdo da equação característica do gerador e a corrente elétrica que percorre o gerador é denominada corrente de curto circuito. A equação característica do gerador resulta em:

Equação 22- Equação característica do Gerador com Tensão nula nos polos.

$$0 = E - r \times i_{cc} \quad (22)$$

$$i_{cc} = \frac{E}{r}$$

³ Disponível em: http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2013/08/cursos-do-blog-eletricidade_28.html. Acesso dia 18 de dezembro de 2019.

Assim, ficam determinados os pontos principais da curva característica do gerador e possível de ser descoberta para qualquer gerador.

- **Associação De Gerador Real**

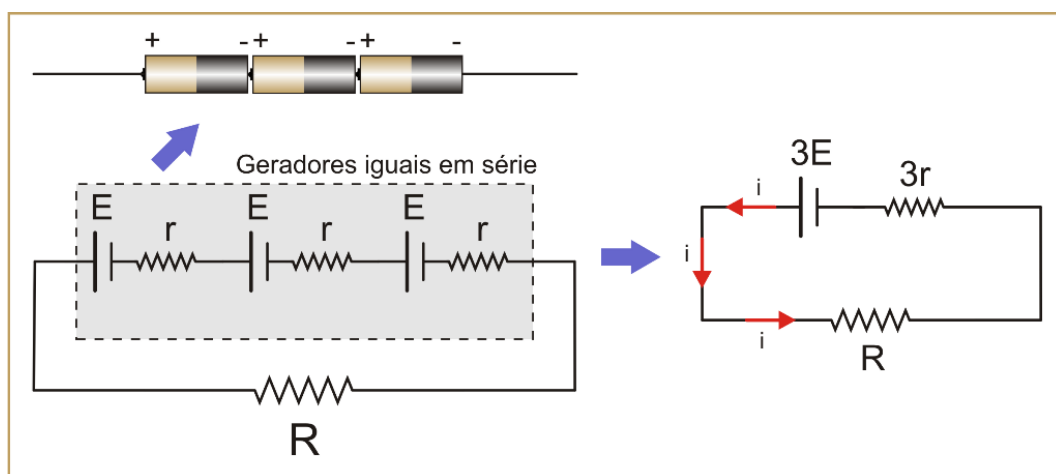
Os geradores elétricos podem ser associados a fim de se ter características desejadas, basicamente tem-se duas formas principais que são a associação em série e a associação em paralelo. Com base nestas duas formas de associações é possível fazer inúmeras outras que são classificadas como associações mistas.

- **Associação em Série**

Associando em série mais de um gerador obteremos uma tensão maior do que a fornecida por um único gerador, sendo o resultado a soma das tensões. Como os geradores reais tem uma resistência internas estas também devem ser observadas na associação e para este caso as resistências internas são somadas igualmente as tens.

Consideremos um exemplo de três geradores ligados em serie para observar estas características. como na figura 15, a seguir.

Figura 15- Exemplo 3 geradores ligados em Série.



Fonte: Site Física Comentada⁴

⁴ Disponível em: <<http://fisicacomentada.blogspot.com/2011/09/lei-de-pouillet-associacao-de-geradores.html>>. Acesso em 18 de dezembro de 2019.

Desta forma quando se associa em série o gerador equivalente terá tensão igual à soma das tensões dos geradores da associação e resistência interna igual à soma das resistências da associação, no caso de três geradores tem-se:

Equação 23- Tensão Equivalente

$$U_{equivalente} = U_1 + U_2 + U_3 \quad (23)$$

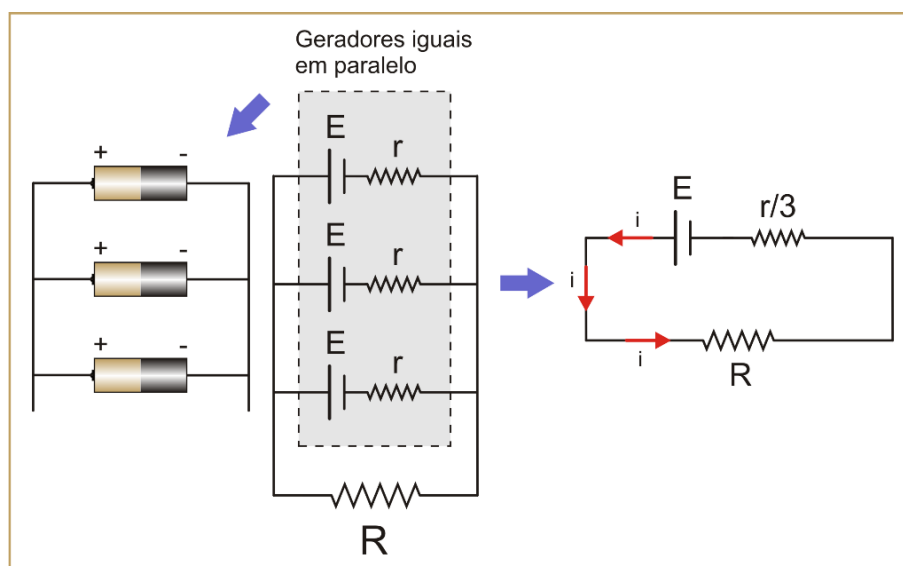
Equação 24- Resistência equivalente

$$Ri_{equivalente} = Ri_1 + Ri_2 + Ri_3 \quad (24)$$

- **Associação em Paralelo**

Associa-se geradores em paralelo quando se deseja aumentar a capacidade de corrente. Porém o valor da tensão tem uma restrição. Só geradores com mesma tensão podem ser associados em paralelo, caso não sejam iguais os de maiores tensões vai carregar os de menores tensões para que se tenha a mesma diferença de potencial nos polos. A tensão do gerador equivalente será igual à dos geradores da associação, enquanto a resistência interna será obtida associando-se em paralelo as resistências dos geradores, isto é:

Figura 16- Geradores Associados em Paralelo.



Fonte: Site Física Comentada.⁵

⁵ Disponível em: <<http://fisicacomentada.blogspot.com/2011/09/lei-de-pouillet-associacao-de-geradores.html>>. Acesso em 18 de dezembro de 2019.

A equivalência no caso de três geradores em paralelo, temos:

Equação 25- Tensão equivalente em paralelo

$$U_{equivalente} = U_1 = U_2 = U_3 \quad (25)$$

Equação 26- Resistência equivalente em paralelo.

$$\frac{1}{Ri_{equivalente}} = \frac{1}{Ri_1} + \frac{1}{Ri_2} + \frac{1}{Ri_3} \quad (26)$$

Como os geradores em paralelos são iguais e as resistências internas também, temos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Ri_{equivalente}} &= \frac{1}{Ri} + \frac{1}{Ri} + \frac{1}{Ri} \\ Ri_{equivalente} &= \frac{Ri}{3} \end{aligned}$$

Concluindo sobre as associações é que as conexões série servem para aumentar a tensão e as conexões paralelo para aumentar a corrente e combinando estas em associações mistas pode-se ter as características que desejar.

CAPÍTULO IV

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos descritos a seguir foram os utilizados no trabalho e se dividem basicamente em equipamentos de utilização direto para a geração e equipamentos para as análises desse, porém todos tem seus elementos internos, e tem-se os detalhes mais importantes deles.

4.1.1 AUTOMÓVEIS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois modelos de automóveis que são utilizados no Brasil, um da linha popular e outro da linha sedan, ambos de motores 1.0 e modelo Mille Fire da marca Fiat.

A escolha por estes automóveis teve como fator principal a disponibilidade desses e a diferença dos tamanhos dos chassis, levando em consideração o espaço disponível para o escapamento, tornando assim a possibilidade de diferentes disposições do caminho dos gases de exaustão até a saída para o ambiente, podendo assim terem estudos de diferentes características térmicas, que é o motivo deste trabalho. Outra diferença desses automóveis escolhidos são os combustíveis utilizados: o Fiat Uno é movido a GNV (Gás Natural Veicular) e o Fiat Siena é movido a gasolina.

Automóvel 01: Fiat Uno Mille Fire 1.0, segue figuras com descrição.

Figura 17- Fiat Uno Mille Fire 1.0 Abastecendo o cilindro de GNV.



Fonte: Próprio Autor

Figura 18- Ficha Técnica do uno mille Fire 1.0.

FICHA TÉCNICA

MOTOR

Dianteiro, transversal, 1.0 litros, 4 cilindros em linha, 8 válvulas; bicomustível (flex)	álcool e/ou gasolina
Número de válvulas por cilindro	2
Eixo de comando de válvulas	Um no cabeçote
Diâmetro x curso	70 x 64,9 mm
Cilindrada	999,1 cm ³
Taxa de compressão	11,65
Potência máxima (ABNT) / regime	65 cv / 6.000 rpm (gasolina) 66 cv / 6.000 rpm (álcool)
Torque máximo (ABNT) / regime	9,1 kgfm / 2.500 rpm (gasolina) 9,2 kgfm / 2.500 rpm (álcool)
Sistema de alimentação	Injeção Magneti Marelli, multiponto semi-sequencial indireta

Fonte: Site Vrum – Correio Brasiliense.⁶

⁶ Disponível em: <<https://correiobrasiliense.vrum.com.br/fichatecnica/fiat/uno/2008/001162-2>>
Acesso em: 15 de dezembro de 2019.

Automóvel 02: Fiat Siena Mille Fire 1.0, segue imagem com descrição.

Figura 19- Fiat Siena Fire 1.0



Fonte: Próprio Autor

Figura 20- Ficha Técnica do Siena mille Fire 1.0

FICHA TÉCNICA

MOTOR

Dianteiro, transversal, 1.0 litros, 4 cilindros em linha, 8 válvulas; flex	álcool e/ou gasolina
Número de válvulas por cilindro	2
Eixo de comando de válvulas	Um no cabeçote
Cilindrada	999,0 cm ³
Potência máxima (ABNT) / regime (cv / rpm)	73 / 6.250 (gasolina) 75 / 6.250 (álcool)
Torque máximo (ABNT) / regime (kgfm / rpm)	9,5 / 4.500 (gasolina) 9,9 / 4.500 (álcool)
Taxa de compressão	12,15
Ignição	Eletrônica digital incorporada ao sistema de injeção

Fonte: Site Vrum – Correio Brasiliense.⁷

⁷ Disponível em: <<https://correiobrasiliense.vrum.com.br/fichatecnica/fiat/siena/2010/001272-6>>
Acesso em: 15 de dezembro de 2019.

4.1.2 CÂMERA TERMOGRÁFICA

A câmera termográfica utilizada neste trabalho de pesquisa é um modelo fabricado pela FLIR® *Systems International*, modelo A655sc pertencente à linha A6xx series. As principais características do equipamento utilizado são descritas a seguir, na Figura 21.

Figura 21 - Câmera FLIR A55sc.



Fonte: Manual do usuário FLIR

Figura 22 - Detalhamento da câmera.

Imaging and optical data	
IR resolution	640 × 480 pixels
Thermal sensitivity/NETD	< 0.05°C @ +30°C (+86°F) / 50 mK
Field of view (FOV) / Minimum focus distance	25° x 19° (31° diagonal) / 0.25 m (0.82 ft.)
Focal length	24.6 mm (0.97 in.)
Spatial resolution (IFOV)	0.68 mrad
Lens identification	Automatic
F-number	1.0
Image frequency	50 Hz (100/200 Hz with windowing)
Focus	Automatic or manual (built in motor)
Detector data	
Focal Plane Array (FPA) / Spectral range	Uncooled microbolometer / 7.5–14 μm
Detector pitch	17 μm
Detector time constant	Typical 8 ms
Measurement	
Object temperature range	−40°C to +150°C (−40°F to +302°F) 100 to +650°C (+212 to +1202°F)
Accuracy	±2°C (±3.6°F) or ±2% of reading

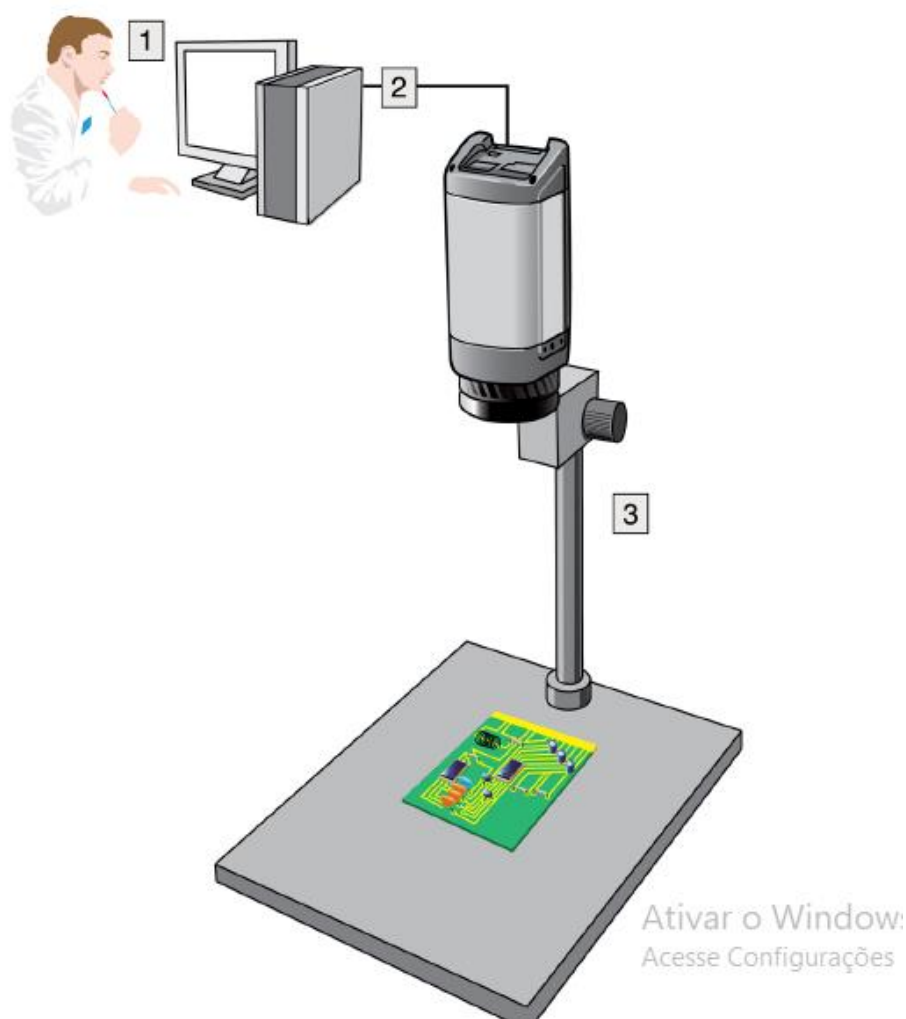
Fonte: Manual do usuário FLIR

A anos a tecnologia de medição de temperatura por infravermelho é utilizada como o meio para detecção de defeitos em circuitos eletrônicos, isolamentos térmicos, painéis elétricos, tubulações de vapor, caldeiras, câmaras frias, entre outros. A evolução dos sistemas de termografia, tornou possível realizar os ensaios de uma forma prática, confiável e confortável (TITMAN, 2001).

As câmeras termográficas funcionam com sensores que são componentes essenciais para o estudo da termografia. Tais sensores são capazes de converter o raio infravermelho em um sinal elétrico. Esse sinal é tratado até a geração das imagens.

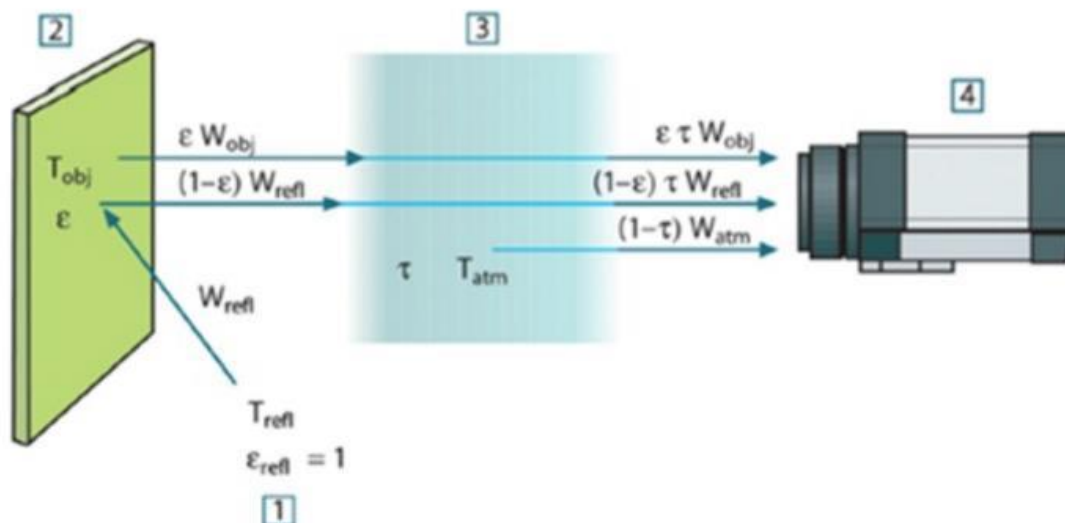
Na Figura 23 abaixo é possível verificar o esquema de funcionamento da medição termográfica.

Figura 23- Representação esquemática funcionamento da coleta das imagens termográficas.



Fonte: Manual do usuário FLIR

Figura 24 -Representação esquemática de uma situação geral de captação termográfica.

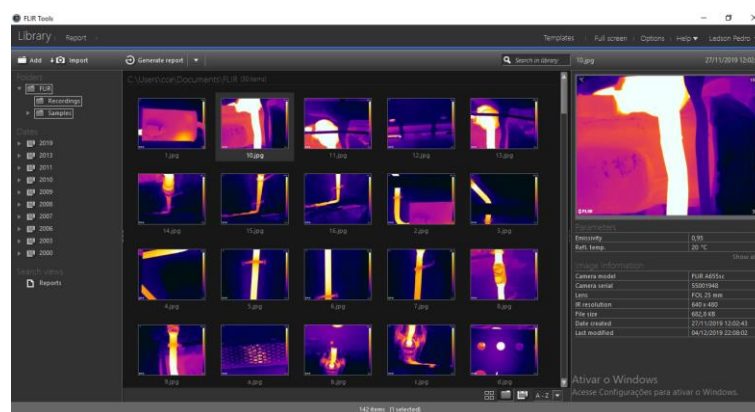


Fonte: Manual do usuário FLIR

A câmera termográfica é o dispositivo responsável em converter a radiação infravermelha em imagens digitais que possam ser analisadas através dos sensores apropriados.

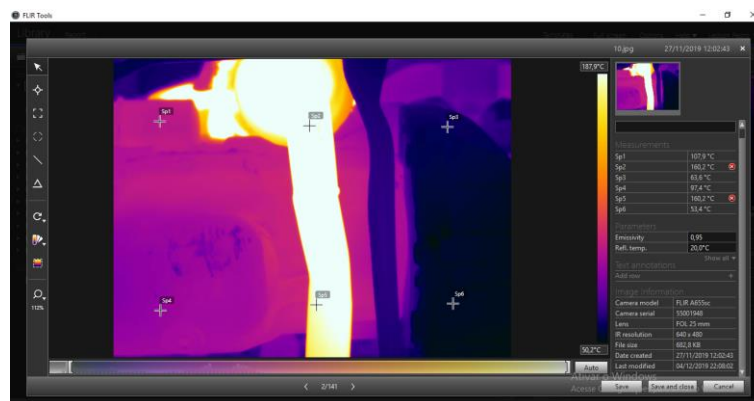
Em uma inspeção termográfica, a radiação interceptada pela câmara não é proveniente só para o objeto sobre observação, mas também para o entorno, quando é refletida no objeto, e para atmosfera. Ainda que participe com parte da radiação, a atmosfera também atenua o valor de radiação do objeto e do entorno que será captado pelo dispositivo, como mostrado na Figura 19. Portanto, é recomendado a calibração da câmara com valores de emissividade e transmitância para cada inspeção. Os manuais de câmeras termográficas geralmente trazem tabelas com valores de referência para auxiliar o operador do equipamento (ENGEFAZ, 2005).

Figura 25 - Imagem da abertura do programa da câmera térmica.



Fonte: Próprio autor

Figura 26- Imagem do programa da câmera térmica



Fonte: Próprio Autor

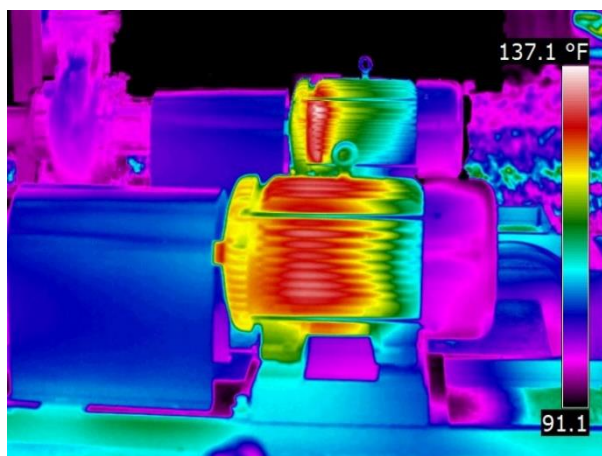
A seguir tem-se algumas imagens de aplicações termográficas que são disponibilizadas pelo fabricante da câmera como destaques de utilização da termografia.

Figura 27- Imagem de aplicações termográficas.



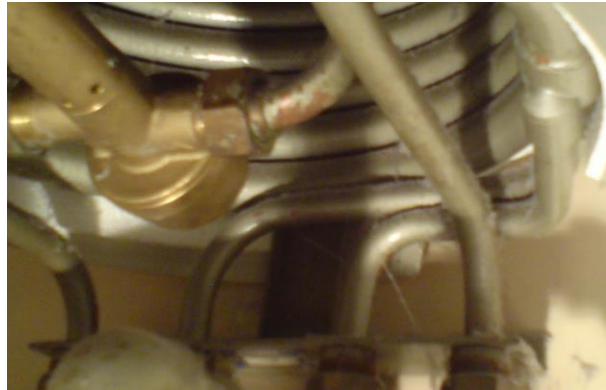
Fonte: Fabricante Câmera Termográfica

Figura 28- Imagem de aplicações termográficas.



Fonte: Fabricante Câmera Termográfica

Figura 29: Imagem de aplicações termográficas.



Fonte: Fabricante Câmera Termográfica

Figura 30- Imagem de aplicações termográficas.



Fonte: Fabricante Câmera Termográfica

4.1.3 GERADOR TERMOELÉTRICO

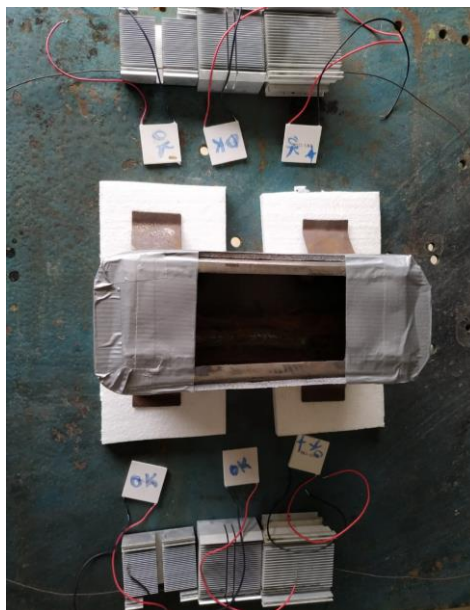
Foi construído, neste trabalho, o protótipo de um termogerador compondo em sua estrutura os determinados locais para o reservatório térmico, os coolers e os módulos termoelétricos.

A grande dificuldade do projeto para construção do termogerador foi a idealização da estrutura para conseguir conectar os coolers ao lado de baixa temperatura dos módulos, sem que os mesmos entrassem em contato com o reservatório térmico, que possui alta temperatura, pois um possível contato não possibilitaria a diferença de temperatura entre os lados do módulo, que é fundamental na termogeração. Várias modificações foram feitas desde a primeira

montagem até a utilizada no experimento, e possíveis modificações podem ser sugeridas para alcançarmos melhores resultados.

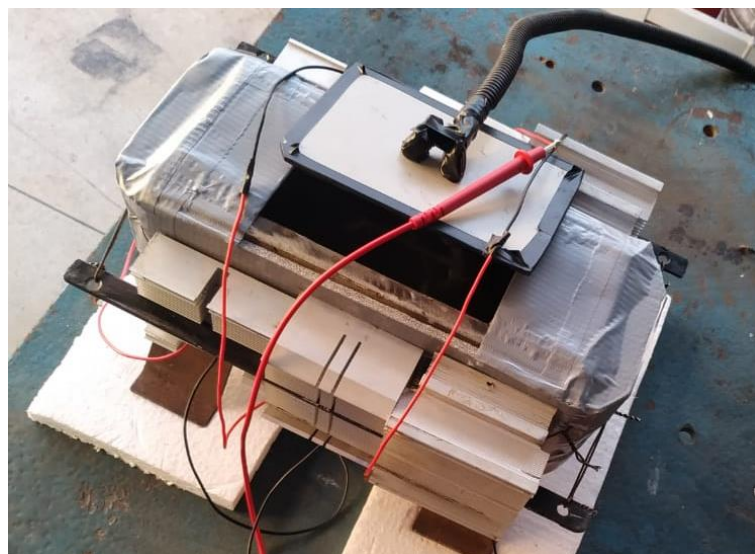
Uma das características dos trabalhos experimentais são exatamente as modificações que ocorrem durante o processo de estudo e de experimento, o que faz enriquecer o conhecimento sobre a produção de qualquer equipamento ou dispositivo e neste caso foi absorvido conhecimento referente a fabricação de termogeradores. O termogerador é demonstrado na Figura 27, a seguir.

Figura 31- Termogerador Desmontado.



Fonte: Próprio Autor

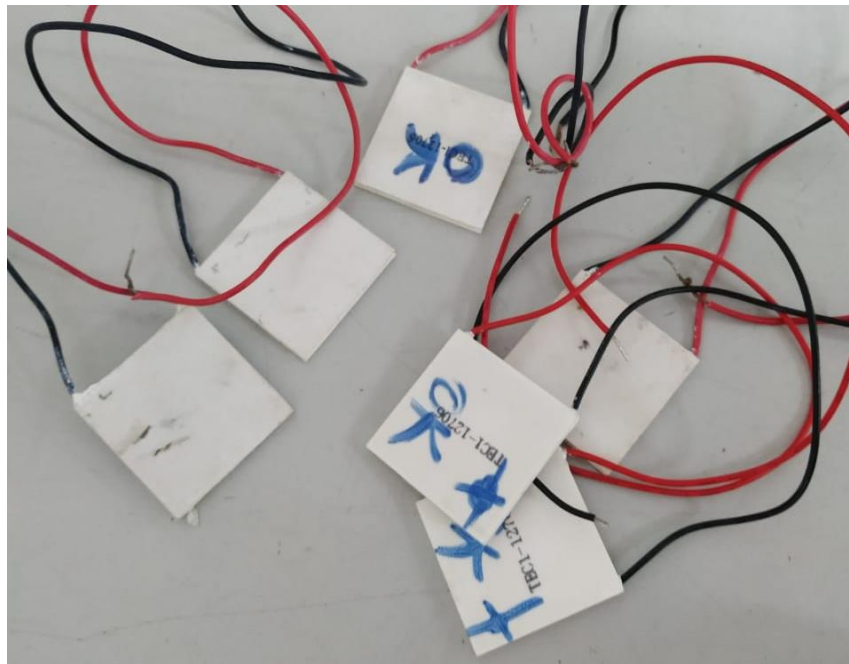
Figura 32- Termogerador Montado.



Fonte: Próprio Autor

O módulo termoeétrico utilizado neste trabalho é comercializado como Pastilha Termoeétrica Peltier TEC1 – 12706, comercializada para utilização em sistemas de refrigeração, uma prática comum dos efeitos termoeétricos a partir do efeito Peltier. O módulo termoeétrico tem temperatura máxima de trabalho igual a 138°C, segundo fabricante. A figura abaixo demonstra tal módulo.

Figura 33- Módulo Termoeétrico.



Fonte: Próprio autor.

Figura 34- Datasheet da célula Peltier

TEC1-12706		
Performance Specifications		
Hot Side Temperature (° C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (° C)	66	75
I _{max} (Amps)	6.4	6.4
V _{max} (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30



Fonte: Site ALLDATASHEET.⁸

⁸ Disponível em: < https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Tec1-12706%2520datasheet&gclid=CjwKCAiA58fvBRAzEiwAQW-hzaiGmSRTn9KUBEKAzzZjcFX4iXttnc-qAMt8IvU9GWrDfK0Lhz8yLBoCgvAQAvD_BwE > Acesso em: 15 de dezembro de 2019.

O reservatório térmico do gerador desenvolvido é um recipiente metálico, feito de ferro carbono, com formato de um prisma retangular, revestido com um isolante térmico para reduzir as perdas para o ambiente, e interior completo com água que é aquecida por uma resistência imersa na água, este reservatório tenta simular o escapamento do automóvel. Como verifica-se a figura 31 a seguir.

Figura 35- Reservatório térmico.



Fonte: Próprio Autor

Por fim, para melhorar a eficiência do gerador foi utilizado uma pasta térmica de silicone que possibilita um melhor acoplamento e uma maior condutividade térmica entre o módulo termoelétrico, e o dissipador de calor. Deste modo a condução tornou-se melhor, através da eliminação do ar retido na montagem. A pasta térmica utilizada é mostrada na figura 32 a seguir.

Figura 36- Pasta Térmica.



Fonte: Próprio Autor

4.1.4 ARDUINO

Neste trabalho devido a necessidade de coletar os valores de corrente, tensão e as duas temperaturas foi utilizado a plataforma de prototipagem do Arduino durante o tempo de aquecimento do reservatório facilitando assim a coleta de dados em comparação com a utilização de multímetros e termopares, além da digitação visto que foi feito uma integração direta com o Excel.

O Arduino foi originalmente projetado como um recurso para auxiliar os estudantes no ensino, mas em 2005 ele foi comercialmente lançado, tornando-se um produto de sucesso entre fabricantes e estudantes devido a sua fácil utilização e a durabilidade que ele proporciona (MONK, 2013).

O Arduino é um pequeno computador capaz de processar informações de dispositivos e componentes externos conectados a ele através dos pinos de entradas e saídas de acordo com o que é programado. Mcroberts (2011) afirma que, o Arduino é uma plataforma de computação física ou embarcada, isto é, um dispositivo de hardware com um sistema de software interagindo com o ambiente.

Para a prototipagem no Arduino foi utilizado hardware e software apropriado para a coleta dos dados dos experimentos. Os hardwares estão descritos a seguir e o software que é o código de programação longo está detalhado no anexo do trabalho.

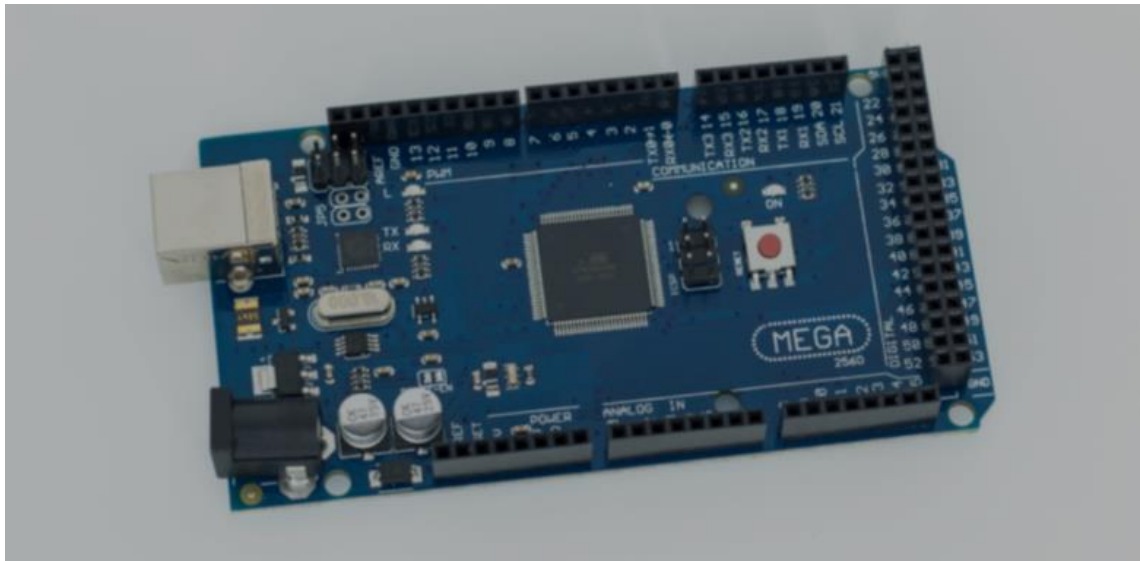
Neste protótipo foram utilizados:

- 1x Arduino Mega 2560
- 2x MAX6675
- 1x ACS712

Arduino 2560:

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica ideal para iniciantes em programação e uso de embarcados. Seu uso neste caso é justificado pela facilidade de uso e pelo fato de existir uma enorme variedade de materiais e bibliotecas disponível para uso.

Figura 37 - Arduino mega 2560.

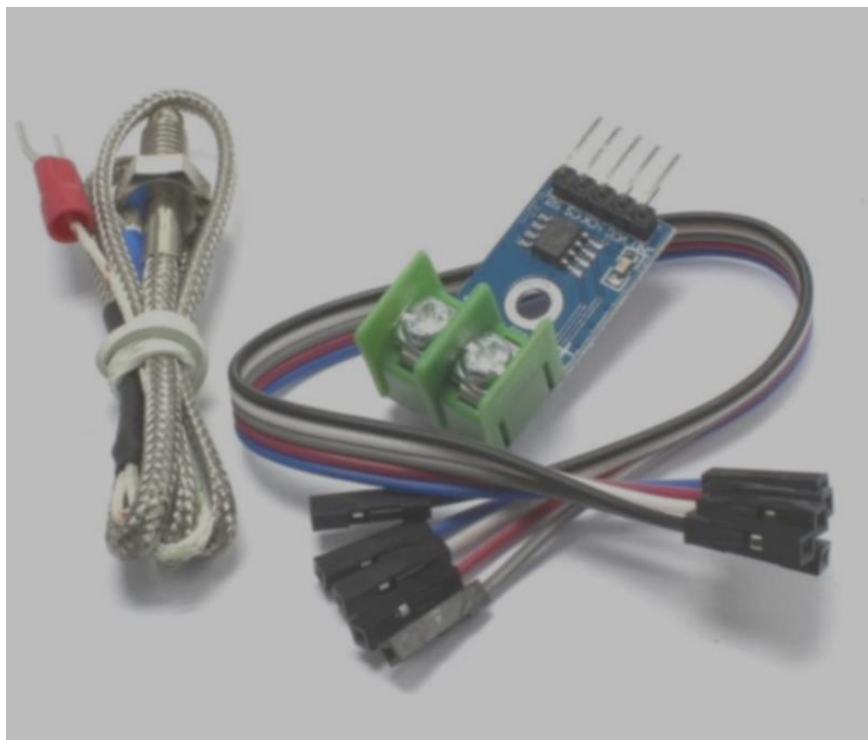


Fonte: Próprio Autor.

MAX6675:

Trata-se de um sensor de temperatura, tipo termopar, capaz de trabalhar com uma faixa entre 0°C e 1024°C. Possui comunicação SPI e saída de dados tem resolução de 12bits.

Figura 38 - MAX6675

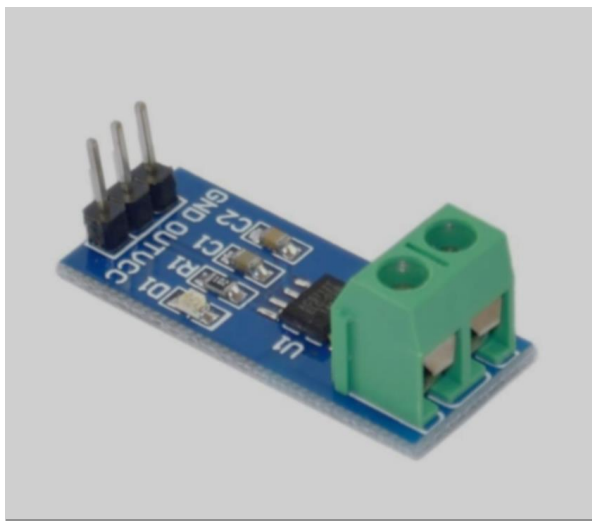


Fonte: Próprio Autor.

ACS712:

O ACS712 é um sensor de corrente invasivo, no qual um pino de saída tem a tensão proporcional a corrente que passa pelo sensor (66mV/A).

Figura 39 - ACS712



Fonte: Próprio Autor.

O MAX6675 e o ACS712 são comumente chamados de shields e são basicamente placas com componente e funções extras dependendo do que deseja e é conectado ao Arduino, possibilitando assim ter entradas e saídas na prototipagem.

Diversos componentes foram desenvolvidos para diferentes tipos de finalidades e projetos, vários fabricantes lançam frequentemente no mercado uma diversidade de placas expansivas, mais conhecida como Shields, estes são projetadas para trabalhar em paralelo com placas microcontroladores em projetos. Shields ou expansores, são placas que podem ser conectadas em cima da placa Arduino, estendendo as suas capacidades, e são fixados no Arduino através de uma conexão alimentada por pinos-conectores. A capacidade de expansão possibilita uma grande quantidade de aplicações de maneira simples e rápida. Os shields seguem a mesma filosofia que o kit de ferramenta original, eles são fáceis de montar e baratos de produzir (FABRI JUNIOR, 2014).

Nos diversos shields existentes contém uma eletrônica que adiciona funções que a placa principal, o Arduino, não possui. Como exemplos temos shields para ligar e desligar motores, shields para comunicação com a internet, shields para acoplamento de sensores, entre outros.

4.2 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas de experimentos para o estudo do desenvolvimento de um termogerador a partir do efeito seebeck para cogeração em automóveis. As etapas foram estudo da energia térmica dispendida pelos automóveis principalmente no escapamento, a partir da coleta das temperaturas com a utilização de imagem termográfica, e a geração elétrica possível a partir de células peltier comerciais usadas para o efeito seebeck e com suas possíveis associações de módulos termoelétricos em um protótipo de Termogerador.

4.2.1 PROCEDIMENTO DA ANÁLISE TERMOGRÁFICA

A partir da câmera termográfica foi retiradas imagens que possibilitaram a determinação das temperaturas no escapamento dos automóveis escolhidos para o estudo neste trabalho.

As aquisições das imagens termográficas foram feitas no dique da garagem do Campus 1 da UFPB pois era o único local que possibilitava se deslocar debaixo dos automóveis com a câmera e o computador para fazer os registros. Porém a distância da câmera ao automóvel não era a ideal como se estivesse em um elevador automotivo, onde seria possível tirar fotos de maior parte do automóvel.

Sabendo que as temperaturas do escapamento dos automóveis variam com o tempo de funcionamento do motor, com a rotação a qual o motor esteja e com outros fatores; logo para este trabalho utilizamos apenas uma rotação do motor, que foi a rotação de aceleração livre que está na faixa de 1600 a 1800 rpm, e as análises termográficas só iniciaram após o sistema de refrigeração dos motores ter sido acionado, tentando assim encontrar as perdas térmicas básicas no regime permanente de funcionamento do motor visto que o sistema de refrigeração só entra quando o motor atinge uma certa temperatura e tem a função de não permitir que essa temperatura se eleve mais.

A seguir temos as imagens do momento da coleta das imagens termográficas mostrando como se deu a aquisição das mesmas.

Figura 40- Câmera termográfica e computador instalados no momento das coletas



Fonte: Próprio autor

Figura 41- Automóvel 01 no preparando pra coleta.



Fonte: Próprio autor

Figura 42- Sistema de Exaustão do Automóvel 01.



Fonte: Próprio autor

Figura 43- Automóvel 02 preparando pra coleta



Fonte: Próprio autor

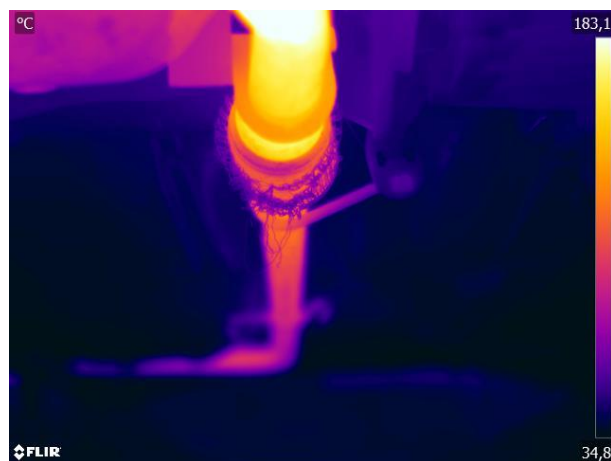
Figura 44- Sistema de exaustão do Automóvel 02.



Fonte: Próprio autor

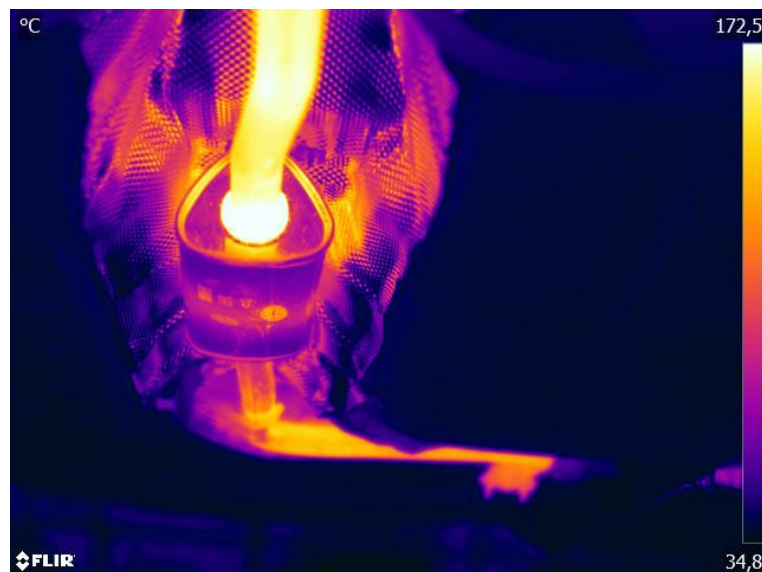
As imagens até agora mostram o processo de preparação da câmera e dos automóveis no local onde foram feitas as aquisições das imagens termográficas. As Figuras 41 e 42 mostram as imagens termográficas do automóvel 01 e 02, respectivamente. Estas imagens não foram utilizadas para a análise termográfica devido a não uniformidade do foco da imagem, mas eles servem bem pra representar a distribuição das temperaturas nos automóveis.

Figura 45- Termografia automóvel 01.



Fonte: Próprio autor

Figura 46- Termografia Automóvel 02.



Fonte: Próprio autor

As duas imagens termográficas apresentadas acima, mostram a parte do escapamento após os catalizadores e a região onde será feito o estudo das perdas de energia térmica. A partir da comparação da imagem da câmera normal com a câmera termográfica percebe-se a menor amplitude da imagem e do seu fogo, logo para análise térmica foram utilizadas imagens termográficas mais próximas da região de melhor localização para um termogerador.

4.2.2 PROCEDIMENTO DA ANÁLISE DA TERMOGERAÇÃO

A análise da termogeração neste trabalho se dá pela coleta da corrente tensão e tensão em um circuito elétrico que tem a associação dos módulos termoeletrônicos como gerador, que estão dispostos no gradiente térmico do protótipo de gerador termoeletrônico desenvolvido.

Para a análise da geração é necessário o preparo dos fatores de importância na geração para possibilitar os melhores resultados, que conciliem as melhores condições de geração e as condições possíveis de serem aplicadas em um automóvel, principalmente nas características do Brasil. Com isso foram feitos o procedimento de com essas intenções e as restrições tanto de simulação quanto de condições de Brasil. A seguir está descrito os procedimentos por partes.

4.2.3 MONTAGEM DO TERMOGERADOR

A montagem do Termogerador se dá através de uma forma simples que possibilite a observação da geração termoelétrica e a intenção de simular a aplicação em um escapamento de automóvel, como percebesse pelas dimensões do reservatório térmico, que tem formato de um prisma com o valor da aresta ligeiramente maior que o diâmetro de um escapamento convencional com a ideia de que um escapamento possa passar por dentro do mesmo, e também a disposição dos módulos, nas laterais e ao longo da maior comprimento visando o melhor espaçamento no automóvel.

4.2.4 FONTE DE CALOR DO TERMOGERADO

A fonte de calor para o termogerador tem a função de simular o escapamento dentro do reservatório térmico, no caso deste trabalho foi utilizado uma resistência que estava disponível para o uso e sua não foi escolhida, pois a mesma estava no laboratório e não foi pré-determinada, porém com o fluido de trabalho é a água com aditivo e a pressão atmosférica teremos temperatura máxima em torno de 100 graus.

4.2.5 SISTEMA DE ARREFECIMENTO

O sistema de arrefecimento é de grande importância para a termogeração estudada, sendo fundamental para a ocorrência do efeito seebeck pois esse efeito necessita de um gradiente térmico para ocorrer e é necessário um arrefecimento para que o calor seja retirado do módulo termoelétrico para não queimar o mesmo visto que esses são formado por semicondutores e de uniões a altas temperaturas, visto que são módulos convencionais comercializados e sem muita especificação.

Neste trabalho usou-se um conjunto de aletas para fazer o arrefecimento do termogerados, o conjunto é formado por três pares de aletas com comprimentos de aletas crescente e assim serão ordenados para que o segundo e o terceiro módulo tenham um arrefecimento tão bom quanto o primeiro, de cada lado. Para o experimento o termogerador e posto a uma ventilação forçada que se assemelha a ventilação que ocorre paralela ao

escapamento de um automóvel, visando mais uma vez a similaridade com a possível aplicação do termogerador em um automóvel.

Figura 47- Sistema de arrefecimento.



Fonte: Próprio Autor

4.2.6 LIGAÇÃO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Experimentos anteriores de geração permitiram observar a tensão gerada com sentidos de fluxos de calor invertidos para comparar e pode escolher a melhor disposição dos módulos em relação ao sentido do fluxo de calor. Para diferenciar o sentido do fluxo considerou-se que um lado do módulo possui a referência grifada e o outro não.

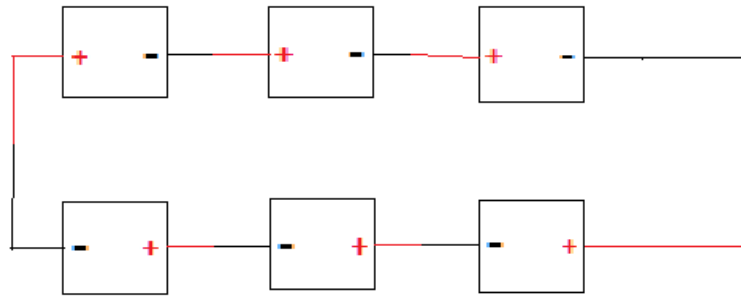
Como observado em pesquisas anteriores que a disposição do módulo com o lado grifado em maior temperatura é possível ter um melhor rendimento da célula na mesma temperatura, logo os experimentos foram realizados com os módulos estando com seus lados grifados em contato com o reservatório térmico e com a aplicação da pasta térmica, que visa uma melhor condução térmica.

4.2.7 ESCOLHA DA ASSOCIAÇÃO DOS MÓDULOS PARA ESTUDO

Para a ligação dos módulos teve-se a oportunidade de fazer algumas diferentes associações de geradores para avaliar as diferenças e poder fazer afirmações sobre organizações

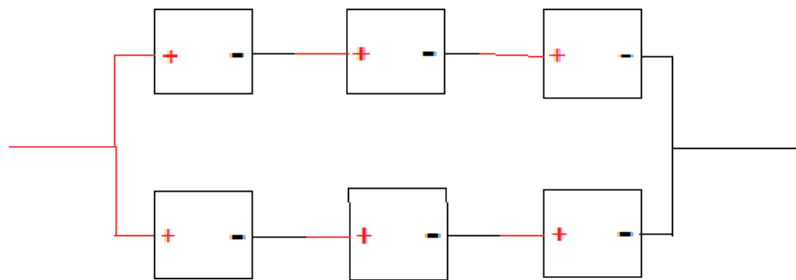
dos módulos para estudos futuros. Com isso foi realizada a intenção de fazer várias associações com seis módulos em série; dois grupos, contendo três módulos em série, ligados em paralelo; três grupos, contendo dois módulos em série, ligados em paralelo; e por fim seis módulos em paralelo. Sendo nomeados com Caso1 até o Caso 4, como mostra as figuras de 50 a 53, a seguir.

Figura 48: Caso 1 – Seis módulos em série.



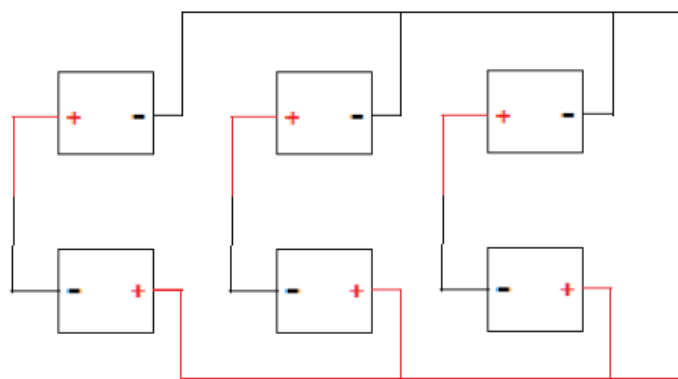
Fonte: Próprio Autor.

Figura 49- Caso 2 – Dois grupos de três módulos em série e ligados em paralelo.



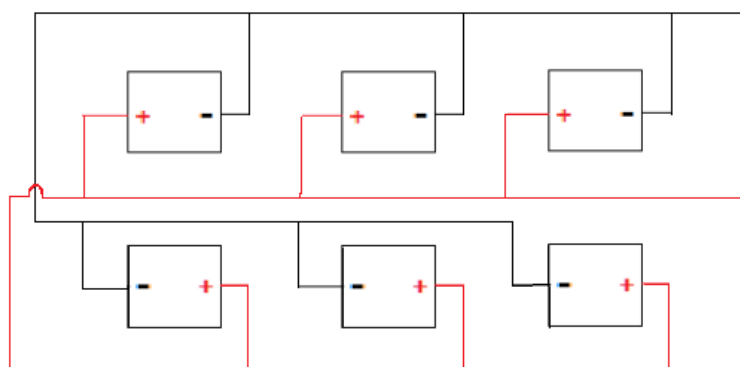
Fonte: Próprio Autor.

Figura 50 - Caso 03 – Três grupos de dois módulos em série e ligados em paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 51 - Caso 4 – Seis módulos em Paralelo.



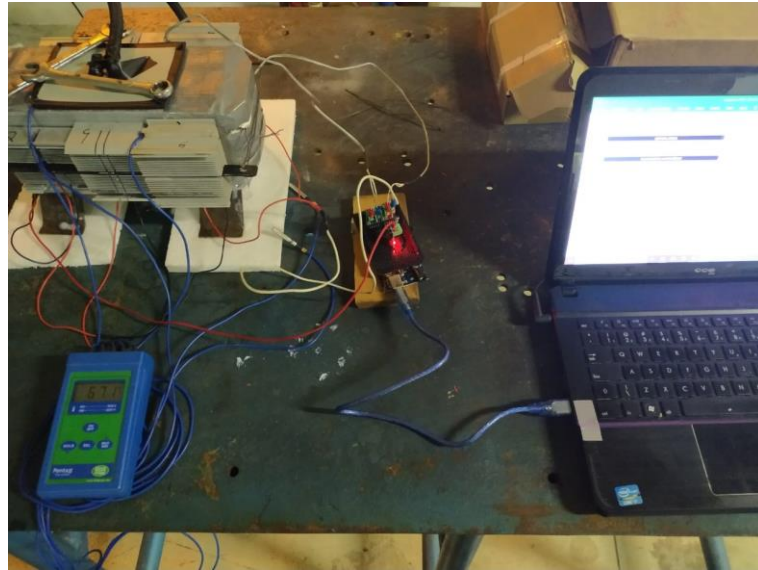
Fonte: Próprio Autor.

Porém sabe-se das características na associação de geradores e observando a geração de cada modulo termoeletrico sobre as mesmas condições de temperatura quente e de arrefecimento inviabilizam os estudos e resultados nos casos 03 e 04 desejadas. Nesse caso, não inviabilizando totalmente esses tipos de associações, mas sim para o protótipo de gerador em estudo.

4.2.8 COLETA DOS VALORES DE CORRENTE E TENSÃO PARA VARIAÇÃO DE GRADIENTES TÉRMICOS

As coletas dos valores foram feitas continuamente durante o aquecimento da água dentro do reservatório térmico e aumentando o gradiente entre o lado quente e o lado frio do modulo, gerando assim o potencial. Para a medição das temperaturas, corrente e consequentemente a tensão foi utilizada uma prototipagem do Arduino, com dois termopares e uma medidor de corrente de forma invasiva e uma programação que fazia a leitura de 05 em 05 segundos possibilitando assim ver a geração termoeletrica com a carga térmica variando aproximando com o que ocorre no escapamento de um automóvel. Como demonstra a figura a seguir.

Figura 52- Coleta dos dados da geração para gradiente térmico.



Fonte: Próprio autor.

A coleta dos valores se demonstrava na tela do computador no mesmo momento do experimento devido a integração do Arduino com o Excel, possibilitando a visualização e anexando os resultados que facilitou e agilizou os estudos desses no trabalho, pois demora muito tempo pra construir tabelas devido a digitalização da grande quantidade de valores e a facilidade para a coleta dos dados continuamente durante o tempo visto que se repetirá por todos os casos de organização dos geradores em estudos. O multímetro foi ligado em série com a carga, a coleta dos valores foi feita continuamente durante o aquecimento da água dentro do reservatório térmico e assim aumentando o gradiente entre o lado quente e o lado frio do modulo.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

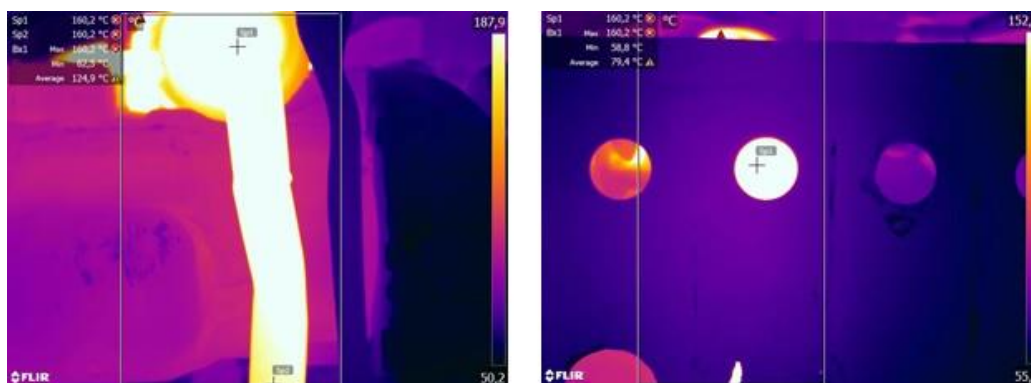
Neste capítulo são descritas as análises de utilização do termogerador e o estudo foi dividido em duas etapas, na qual, a primeira é a análise do motor de combustão interna e a segunda etapa consiste da análise do sistema de um termogerador utilizando componentes comerciais de fácil acesso.

Partindo da análise térmica do motor e da análise de geração elétrica do termogerador é possível estimar a energia gerada caso tenha o calor do escapamento dos gases de exaustão do motor com a função de aquecer o reservatório térmico no gerador termoelétrico, a partir da energia térmica que seria perdida no escapamento.

5.1 ANÁLISE DAS PERDAS ENERGÉTICAS

Neste trabalho foi feita a análise termográfica do escapamento dos automóveis e devido as condições de coletas das imagens termográficas, que não tinham uma distância suficiente da câmera e os automóveis, e também a precisão da análise em relação à distância; logo foram retiradas sete imagens termográficas de cada automóvel, permitindo assim fazer uma melhor análise das temperaturas ao longo do escapamento. Como é mostrado nas imagens a seguir.

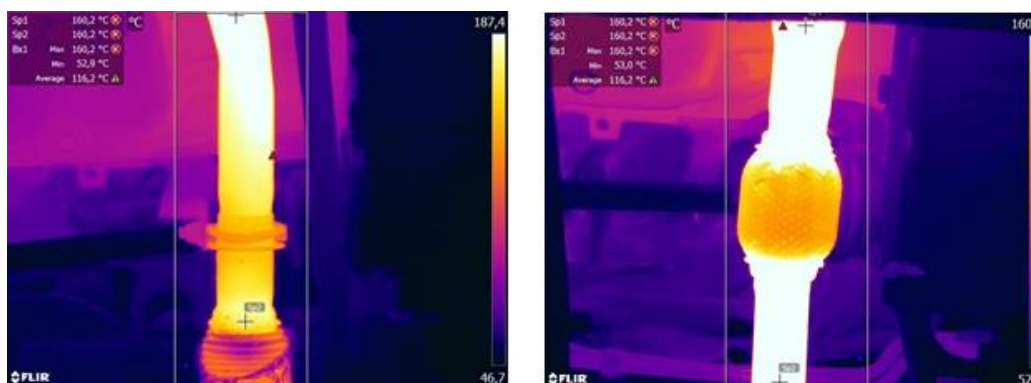
Figura 53 - Início do Escapamento dos Automóveis 01 e 02.



Fonte: Próprio Autor.

A figura 55 mostra a parte 1 dos escapamentos dos automóveis onde observa-se o escapamento na geração com o motor a temperaturas máxima de 160,2 °C em ambos os automóveis.

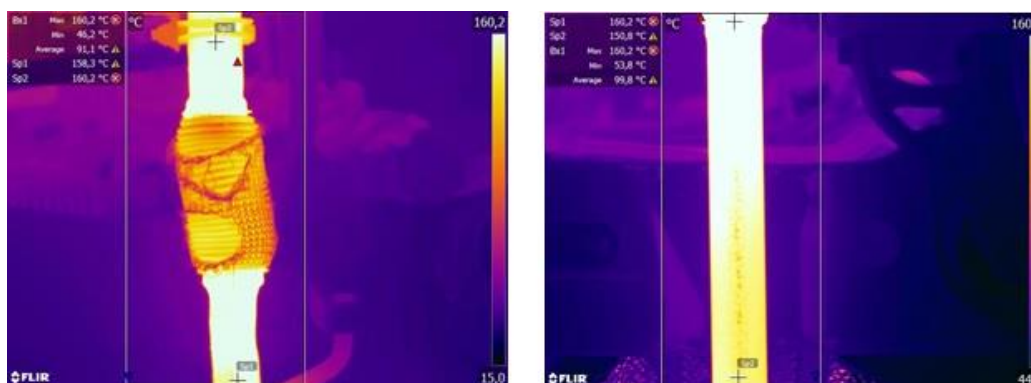
Figura 54- Parte 2 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 56 tem-se a parte 2 dos escapamentos onde mostra a continuidade do escapamento a partir da parte 1 e observou-se a temperatura máxima de 160,2°C em ambos os automóveis.

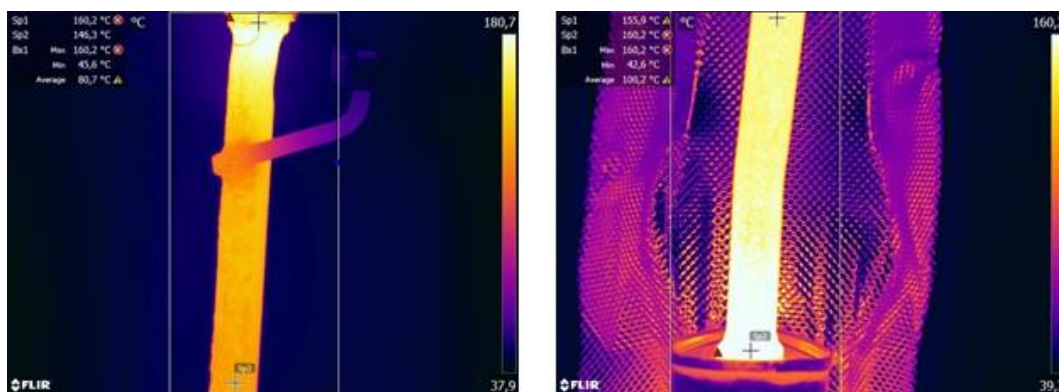
Figura 55- Parte 3 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.



Fonte: Próprio Autor

A figura 57 demonstra a parte 3 dos escapamentos mostrando a continuidade do escapamento a partir da parte 2 e observa-se a temperatura máxima de 160,2°C em ambos automóveis.

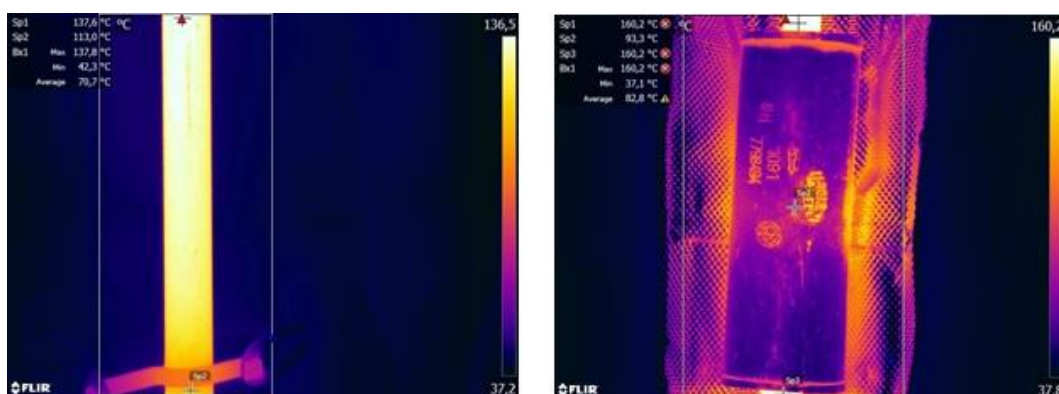
Figura 56- Parte 4 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 58 tem-se a parte 4 dos escapamentos que mostra a continuidade do escapamento a partir da parte 3 e observa-se que neste caso também se mantem a temperatura de 160,2°C em ambos os automóveis estudados.

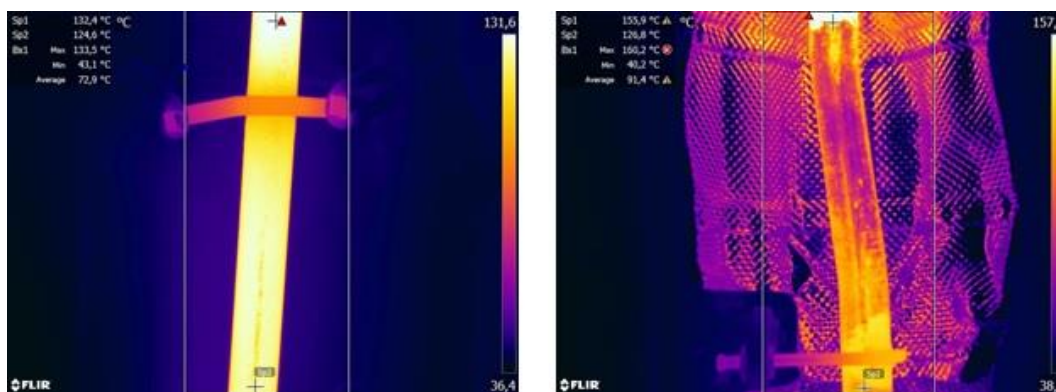
Figura 57- Parte 5 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 59 tem-se a parte 5 dos escapamentos onde mostra a continuidade do escapamento a partir da parte 4 e observa-se a diferença na temperatura máxima que é 137,8°C no automóvel 01 e 160,2°C no automóvel 02.

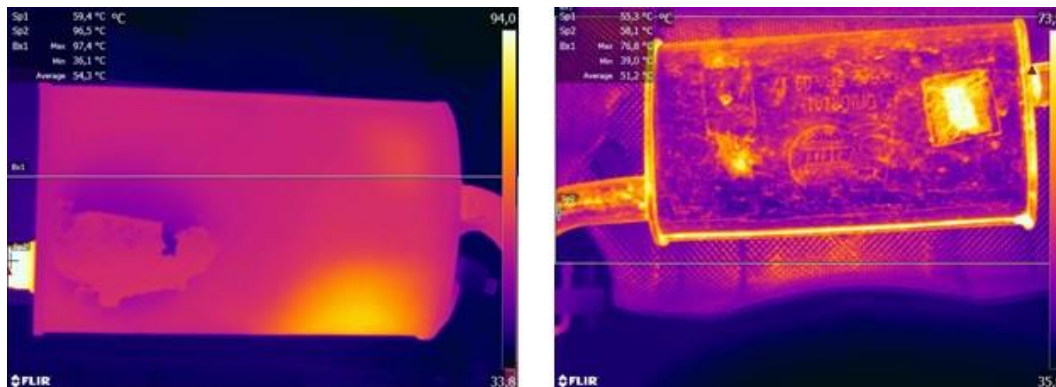
Figura 58 - Parte 6 Escapamento dos Automóveis 01 e 02.



Fonte: Próprio Autor.

A figura 60 mostra a parte 6 do escapamento mostrando a continuidade do escapamento a partir da parte 5 e observa-se as temperaturas máxima de 133,5°C no automóvel 01 e 160,2°C para o automóvel 02. Observa-se que essa é a última parte de fácil acesso ao tubo de escapamento devido a curva que se tem próximo aos tanques de combustível.

Figura 59- Final do Escapamento dos Automóveis 01 e 02.



Fonte: Próprio Autor

Na figura 61 tem-se para finalizar a parte 7 mostrando o final do escapamento que é no silenciador e aonde encontra-se as menores temperaturas que são máximas 97,4°C no automóvel 01 e 76,8°C no automóvel 02.

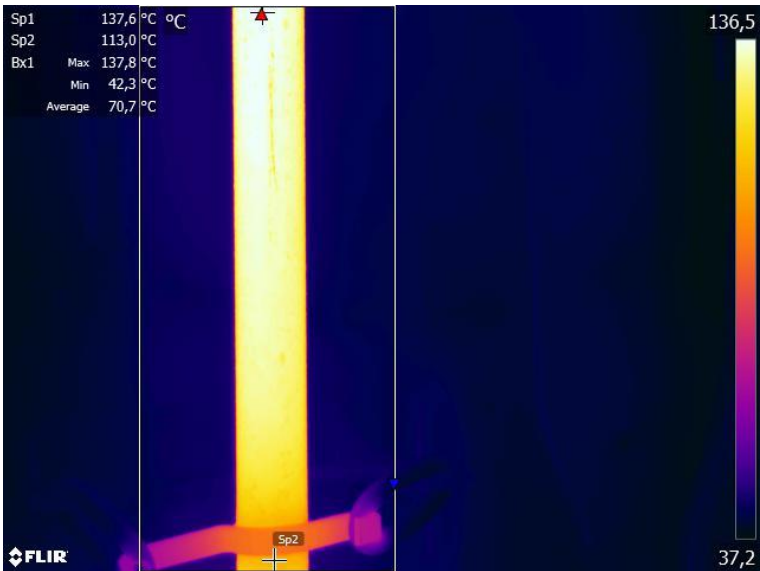
5.1.1 RESULTADOS DA ANÁLISE TÉRMICA

Figura 60: Região estudada Automóvel 01



Fonte: Próprio Autor.

Figura 61: Região Estudada Automóvel 01. (Câmera Térmica)



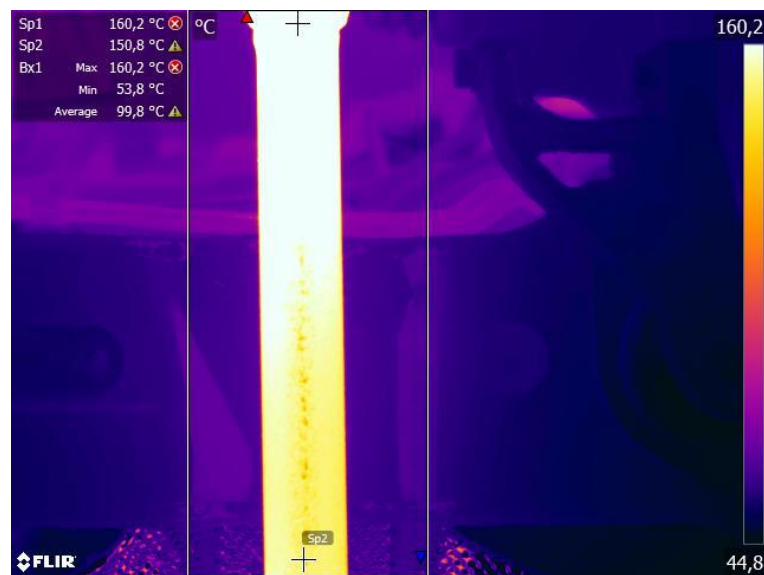
Fonte: Próprio Autor

Figura 62: Região Estudada Automóvel 02.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 63: Região Estudada Automóvel 02. (Câmera Térmica)



Fonte: Próprio Autor.

As figuras acima representam as regiões de estudo neste trabalho, pois observa-se que estão em uma região de fácil acesso para posicionar um termogerador, apresentando pouca vibração e temperatura média de trabalho próxima a temperatura aceitável pelos módulos termoeletrico.

As regiões escolhidas para estudo apresentam temperaturas diferentes no automóvel 01 e o automóvel 02, isso se dá principalmente pela proximidade da região com o motor, demonstrando a perda de calor ao longo do escapamento.

Levando em conta a limitação de temperatura máxima do módulo termoeletrico em estudo, que é de 138°C, e sabendo que o escapamento de maior temperatura terá uma perda energética maior, foi considerado suficiente o estudo da perda energética no automóvel 01.

A partir da imagem termográfica no automóvel 01, temos as seguintes temperaturas:

Figura 64: Temperaturas Automóvel 01.

Sp1		137,6 °C	°C
Sp2		113,0 °C	
Bx1	Max	137,8 °C	
	Min	42,3 °C	
	Average	70,7 °C	

Fonte: Próprio Autor.

Para o estudo das perdas consideramos a temperatura na superfície do escapamento (T_s) como sendo a média das temperaturas no ponto 1 (Sp1) localizada no início da seção selecionada e a temperatura no ponto 2 (Sp2) localizada no fim da seção selecionada.

$$T_s = \frac{137,6 + 113,0}{2}$$

$$T_s = 125,3^\circ C$$

5.1.2 CÁLCULO DAS PERDAS NO ESCAPAMENTO

Neste trabalho tem-se o desejo de transformar a energia perdida no escapamento de um automóvel em se dar por convecção e radiação. Logo tendo as temperaturas no escapamento e focando o estudo na área de melhor aplicação de um termogerador, vamos fazer a análise da energia perdida por convecção e radiação nessa região.

5.1.3 PERDA POR CONVECÇÃO

Através de considerações como convecção forçada e sem mudança de fase no fluido, são as principais considerações destes cálculos.

Na convecção forçada o movimento relativo entre o fluido e a superfície é mantida por outros fatores além das forças de empuxo devido aos gradientes de temperatura.

Temos a dificuldade em definir o valor do coeficiente convectivo, que permite determinar a energia perdida no automóvel por convecção. Porém segundo o Incropera (2014), tem-se conclusões que os coeficientes convectivos locais e medidos podem ser correlacionados pelas equações a seguir:

Transferência de calor:

Equação 27- Transferência de Calor para coeficiente convectivo local.

$$Nu_x = f(x ; Re_x ; Pr) \quad (27)$$

Equação 28- Transferência de Calor para coeficiente convectivo médio.

$$\overline{Nu}_x = f(Re_x, Pr) \quad (28)$$

Porém o grande problema é determinar essas funções e em Incropera (2014), tem a abordagem experimental em várias geometrias e condições de escoamento que são executadas e medidas as transferências sobre condições controladas em laboratório e a correlação dos dados em termos de parâmetros adimensionais apropriadas.

Das abordagens experimentais não tem o caso idêntico ao de transferência que é escoamento paralelo em cilindro, como ocorre no escapamento dos automóveis quando estão em movimento que é o caso mais comum da utilização dos automóveis.

Visto isso, neste trabalho foi feito uma aproximação ou adaptação para utilizar uma das abordagens experimentais que foi considerar o cano do escapamento como uma placa plano em escoamento paralelo, placa essa com a área definida pelo perímetro do cano do escapamento vezes o comprimento determinado, como mostra a seguir:

Equação 29- Área da placa.

$$A = P \times L \quad (29)$$

$$A = 2 \times \pi \times R \times L \text{ ou } \pi \times D \times L$$

Onde:

P = *perímetro*

L = *comprimento*

D = *Diâmetro do cano*

R = *raio do cano*

Para o tubo de escapamento temos o diâmetro de aproximadamente 55mm, no permitindo calcular a área, que é de:

$$A = \pi \times D \times L$$

$$A = \pi \times 55 \times 10^{-3} \times 1,0$$

$$A = 0,1728 \text{ m}^2$$

Para o caso de uma placa plana em um escoamento laminar em paralelo a fórmula de Nusselt tem a forma:

Equação 30- Fórmula de Nusselt pontual para escoamento Laminar.

$$\overline{Nu}_x = 0,332 \times Re_x^{1/2} \times Pr^{1/3}; \quad Pr \geq 0,6 \quad (30)$$

Equação 31- Fórmula de Nusselt médio para escoamento Laminar

$$\overline{Nu}_L = 0,664 \times Re_x^{1/2} \times Pr^{1/3}; \quad (31)$$

Que são as equações para Nusselt pontual e médio sobre a superfície em estudo.

No caso de um escoamento turbulento que é o provável caso que acontece na parte inferior dos automóveis, se tem a formula de Nusselt 34 a seguir:

Equação 32- Fórmula de Nusselt para escoamento turbulento.

$$Nu_x = 0,0296 \times Re^{4/5} \times Pr^{1/3}; \quad 0,6 \cong Pr \leq 60 \quad (32)$$

Para este caso o estudo empírico feito por Incropera (2014), fornece somente a equação para o Nusselt pontual em um escoamento turbulento em placa plana. Tendo assim que operar para se obter o Nusselt médio, fazendo a integração do coeficiente convectivo local na área e dividindo pela área, obtendo assim o coeficiente convectivo médio e a partir dele o Nusselt médio.

Equação 33- Coeficiente convectivo local.

$$h_x = \frac{Nu_x \times K}{x} \quad (33)$$

Equação 34- Coeficiente convectivo médio.

$$\bar{h}_L = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h_x \partial A_s \quad (34)$$

Considerando para esse cálculo: $A = 1 \times x$

$$\bar{h}_L = \frac{1}{x} \int_0^L h_x \times \partial x$$

$$\bar{h}_L = \frac{1}{x} \int_0^L \left(\frac{K}{x}\right) \times 0,0296 \times Re_x^{4/5} \times Pr^{1/3} \partial x$$

$$\bar{h}_L = \left(\frac{K}{x}\right) \times \frac{1}{x} \times \int_0^L 0,0296 \times \left(\frac{u_\infty \times x}{v}\right)^{4/5} \times Pr^{1/3} \partial x$$

$$\bar{h}_L \times \left(\frac{x}{K}\right) = \left(\frac{x}{K}\right) \times \left(\frac{K}{x}\right) \times 0,0296 \times Pr^{1/3} \times \int_0^L \frac{1}{x} \times \left(\frac{u_\infty \times x}{v}\right)^{4/5} \partial x$$

$$\overline{Nu}_L = 0,0296 \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{u_\infty}{v}\right)^{4/5} \times \int_0^L \frac{x^{4/5}}{x} \partial x$$

$$\overline{Nu}_L = 0,0296 \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{u_\infty}{v}\right)^{4/5} \times \int_0^L \frac{1}{x^{1/5}} \partial x$$

$$\overline{Nu}_L = 0,0296 \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{u_\infty}{v}\right)^{4/5} \times \frac{5}{4} L^{4/5}$$

$$\overline{Nu}_L = 0,0296 \times \frac{5}{4} \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{u_\infty}{v}\right)^{4/5} \times L^{4/5}$$

$$\overline{Nu}_L = 0,037 \times Re_L^{4/5} \times Pr^{1/3}$$

Lembrando que este número de Nusselt é para escoamento turbulento, visto que todo o ar que passa pelo escapamento pode ser considerado turbulento.

Agora podemos iniciar os cálculos para a perda energética no escapamento do automóvel, visto que já temos a temperatura, pela análise termográfica, e a partir do número de Nusselt podemos encontrar o coeficiente de condutividade térmica e assim o calor perdido por convecção.

Consideramos a velocidade do ar igual a 14m/s que é aproximadamente 50 km/h, para termos a transferência por convecção compatível com a rotação na qual foi feita a análise termográfica e considerando a temperatura ambiente de 27°C, vamos calcular as perdas por convecção.

Para obtermos dos dados da tabela das Propriedades do ar à pressão atmosférica, deveremos usar a temperatura de filme, que é dada pela média entre a temperatura da superfície e a temperatura do ar que escoia sobre a superfície.

Equação 35- Temperatura de Filme.

$$Tf = \frac{T_{\infty} + Ts}{2} \quad (35)$$

$$Tf = \frac{300 + 398,3}{2}$$

$$Tf = 349 \text{ K}$$

Com esse valor, vamos na tabela e fazemos a interpolação para obtermos os valores das propriedades do ar nessa temperatura. Encontramos os seguintes valores: $\nu=20,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr=0,700$ e $K=30,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$.

Podemos agora calcular número de Reynolds utilizando a equação 38, a seguir. Observando que para os cálculos utilizamos comprimento(L) igual a 1 metro.

Equação 36- Fórmula de Reynolds

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot L}{\nu} \quad (36)$$

$$Re = \frac{14 \cdot 1,0}{20,92 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re = 6,70 \cdot 10^5$$

Logo, como se trata de um escoamento turbulento. A equação para determinar o valor do Nusselt médio é a determina:

Equação 37- Fórmula Nusselt Médio

$$\overline{Nu}_L = 0,037 \times Re_L^{4/5} \times Pr^{1/3} \quad (37)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,037 \times (6,70 \times 10^5)^{4/5} \times (0,700)^{1/3}$$

$$\overline{Nu}_L = 1,5 \times 10^3$$

Agora podemos encontrar o coeficiente convectivo pela equação 34:

$$h = \frac{Nu \cdot K}{L}$$

$$h = \frac{1,5 \times 10^3 \cdot 30,0 \cdot 10^{-3}}{1,0}$$

$$h = 45,0 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

Agora podemos calcular a taxa de transferência de calor por convecção na área ($A = 0,1728 \text{ m}^2$) tubo de escapamento do motor, utilizando a equação 16:

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$q_{conv} = 45,0 \times 0,1728 \times (398,3 - 300)$$

$$q_{conv} = 764,38 \text{ W}$$

Logo este é o valor determinado no estudo de energia perdido por convecção no automóvel em um metro de seu tubo de escapamento.

5.1.4 PERDAS POR RADIAÇÃO

A partir da tabela da emissividade dos materiais A3 localizada em Anexo, com a utilização só material mais próximo do aço carbono torna possível calcular aproximadamente as perdas por radiação no tubo de escapamento.

Utilizando a equação 39, com o valor da emissividade normal de 0,22 e para a área determinada como perímetro do tubo vezes o comprimento, temos:

Equação 38- Transferência de Calor por Radiação.

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (38)$$

$$q_{rad} = 0,22 \cdot 0,1728 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (398,3^4 - 300^4)$$

$$q_{rad} = 36,79 \text{ W}$$

Logo este é o valor determinado no estudo de energia perdida por radiação em um metro do tubo de escapamento do automóvel.

Logo, a taxa total de energia perdida pelo automóvel no comprimento em estudo é dada pela soma das duas formas de perdas, que são a radiação e a convecção, logo a perda energética é:

$$q_{total} = q_{conv} + q_{rad}$$

$$q_{total} = 764,38 + 36,79$$

$$q_{total} = 801,17 \text{ W}$$

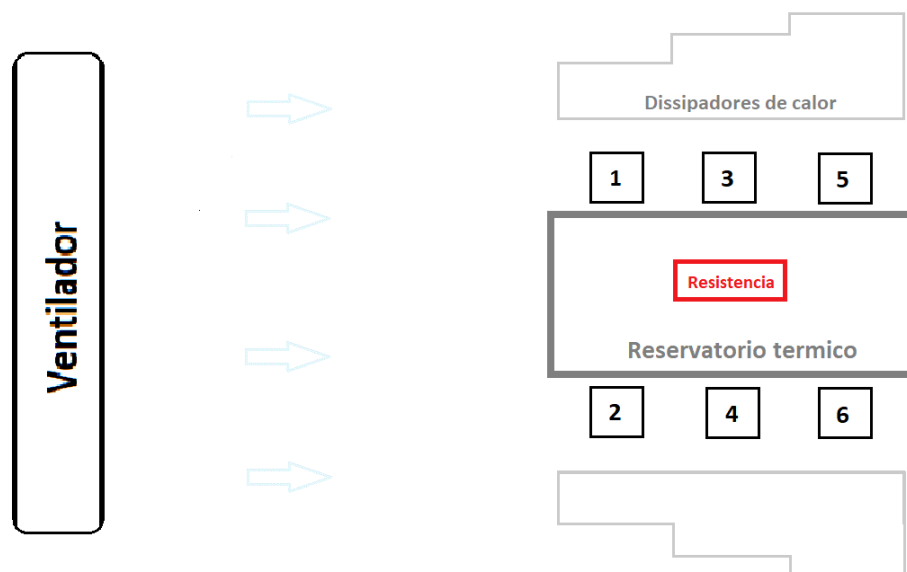
5.2 ANÁLISE DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

Neste trabalho utilizou-se 6 módulos termoelétricos que são cada um gerador termoelétrico e no termogerador proposto esses geradores serão associados para se ter maior potência gerada, visto que a fonte térmica de calor que se deseja utilizar é o escapamento e nele tem-se espaço suficiente para aplicação de gerador.

Sabendo das regras de associação de geradores buscando obter os melhores resultados da análise de geração no termogerador, foram feitas as análises da força eletromotriz de cada um dos 6 módulos submetidos as mesmas condições de temperatura para saber a geração de cada um deles.

A figura a seguir mostra o diagrama de blocos com a disposição dos módulos termoelétricos enumeradas de 1 a 6, como também a disposição da fonte de calor, resistência e o sistema de arrefecimento, dissipadores de calor e ventilador.

Figura 65: Diagrama com a disposição dos elementos que compõe o gerador termoelétrico.



Fonte: Próprio Autor.

Com isso foi observado que mesmo sobre ΔT igual e mesma referência dos módulos se obteve os resultados. A tabela abaixo mostra os testes de cada módulo submetido ao lado quente, com a temperatura da água dentro do reservatório térmico T_h na faixa de 30° e na faixa de 50° , os geradores são enumerados como mostrado nas figuras 44 e 45.

Tabela 2- Teste de cada módulo com $T_h = 30^\circ$

Módulo	Tensão para $T_h = 30^\circ$
1	0,205 V
2	0,275V
3	0,147V
4	0,237V
5	0,295V
6	0,150V

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3 - Teste para cada módulo com $T_h = 50^\circ$

Módulo	Tensão para $T_h = 50^\circ$
1	0,546V
2	0,687V
3	0,352V
4	0,583V
5	0,735V
6	0,357V

Fonte: Próprio Autor.

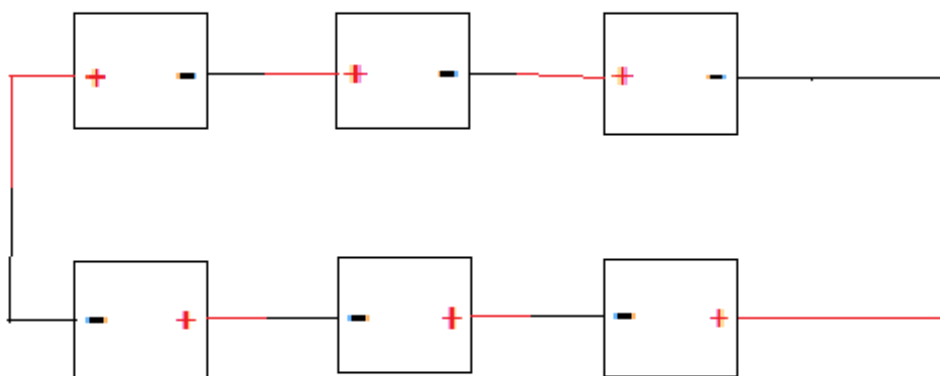
Observando que estes valores de temperatura não são tão precisos pois foram coletados na parte superior da água do reservatório térmico e na parede que se encontra em contato com os módulos. Porém para a ideia de verificar os módulos submetidos as mesmas condições isso não influencia.

Analisando essas tensões e observando que os módulos nos pares 1 e 2 , 3 e 4, 5 e 6 estão submetidos a mesma temperatura pois estão a mesma distância da resistência que aquece a água e também estão com o mesmo sistema de arrefecimento que é o mesmo trocador de calor

e a mesma distância da fonte de ventilação, como se vê a disposição na figura 68, não está tendo a mesma geração de tensão e a conclusão é que, os módulos termoeétricos utilizados, que são comercializados com células Peltier, não tem o mesmo padrão de geração. Isso é até aceitável, pois para a utilização do efeito Peltier em refrigeração não tem a necessidade de resfriar a mesma velocidade, mas sim cumprir com o dever de resfriar.

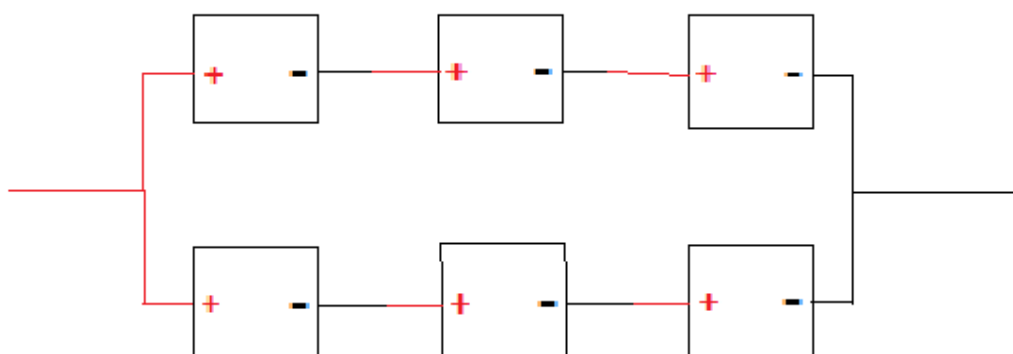
Logo a análise do gerador utilizando os 6 módulos terá uma redução em relação do esperado, porém aceitável, visto que apenas duas das seis estão com geração abaixo da média. Porém com isso a associação em paralelo ficou bastante prejudicada, devido a características das associações de geradores, e assim foi analisada a geração de duas formas de associação dos 6 módulos, que foi em série e a mista, com dois conjuntos, contendo 3 em série, em paralelo.

Figura 66: Reapresentação do Caso 01.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 67: Reapresentação do Caso 02.



Fonte: Próprio Autor.

A avaliação da geração neste trabalho se dá pela verificação da tensão e da corrente em um circuito elétrico resistivo, o valor da tensão gerada em aberto, ambos com a mesma temperatura aplicada, e cálculos seguintes a partir destes resultados. Logo essa avaliação tem a seguinte sequência: Cálculo da corrente em um circuito do gerador com uma resistência determinada, no caso 15 Ohm; obtenção da tensão fornecida nesse circuito, multiplicando a corrente pela resistência; medir a tensão em aberto nos polos do gerador; calcular a resistência interna do gerador.

As medições com o Arduino duraram em torno de 40 minutos e se iniciaram quando a temperatura da parede estava a 30° e no fim da coleta dos dados do circuito foram feitas medição da tensão em aberto do gerador para poder determinar a resistência interna do gerador em estudo.

Tensão em aberto:

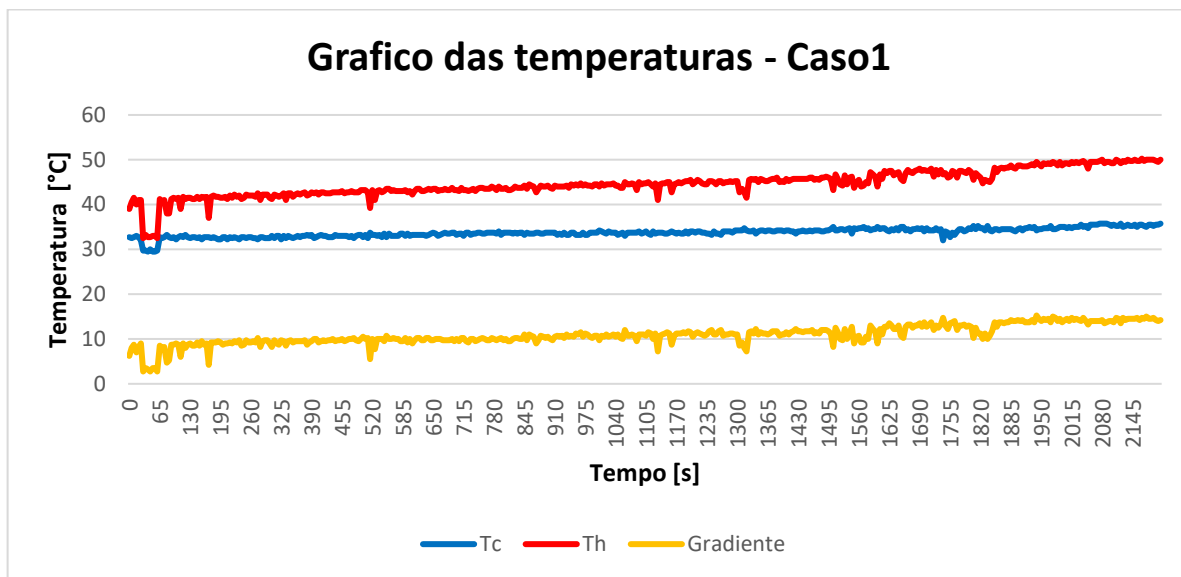
- $V_{série} = 7,53V$
- $V_{misto} = 3,75V$

Esta análise foi realizada nas duas formas de associação de geradores em estudo para tornar possível a comparação dos resultados e poder determinar a melhor associação para um termogerador que tenha a possibilidade de substituir o alternador do automóvel e assim tendo uma redução do consumo de combustível pois retiraria a carga sobre o eixo motor.

A seguir os gráficos dos resultados:

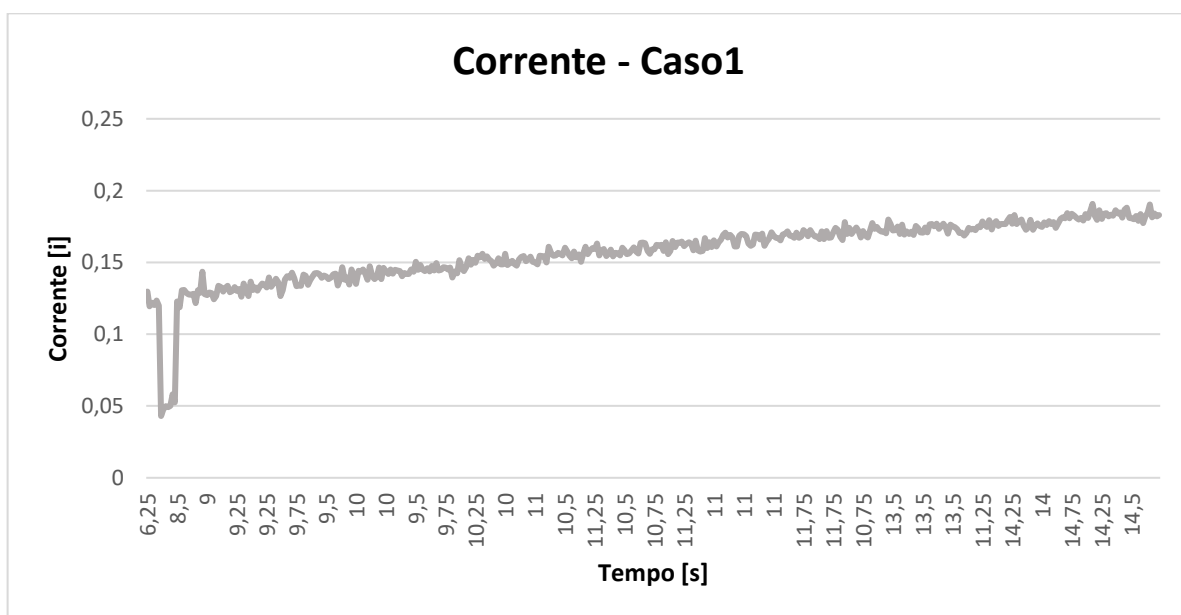
Caso 01: Módulos associados em série.

Figura 68: Gráfico das temperaturas - Caso1



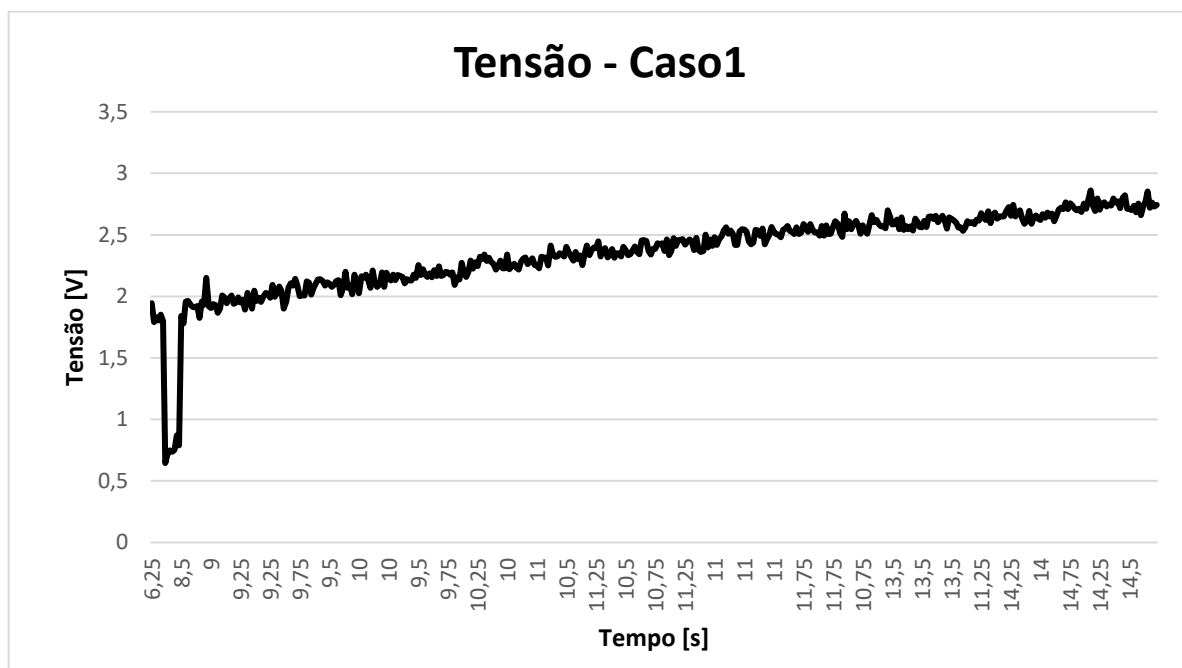
Fonte: Próprio Autor

Figura 69: Gráfico da Corrente- Caso1



Fonte: Próprio Autor.

Figura 70: Gráfico da Tensão - Caso1



Fonte: Próprio Autor.

Para o estudo do protótipo termogerador foram coletados os dados até a temperatura considerada de estabilidade de fluxo de calor, que se observou após 30 minutos de aquecimento e com a temperatura inicial de aquecimento lida no termopar marcando 29° C. visto isso vamos fazer o estudo do gerador com a média dos cinco dados finais de geração, como mostra na tabela:

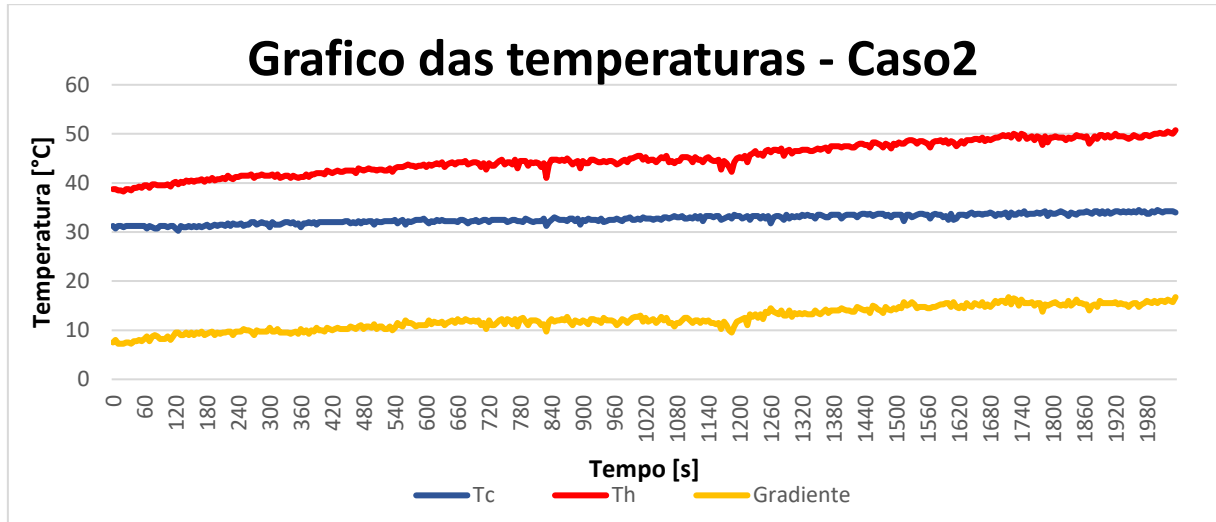
Tabela 4- Valores para Avaliação do Experimento- Caso1.

	TEMPERATURA LADO QUENTE (°C)	GRADIENTE	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	TENSÃO EM ABERTO (V)
MÉDIAS	49,85	14,35	0,184142	2,76213	7,53

Fonte: Próprio Autor.

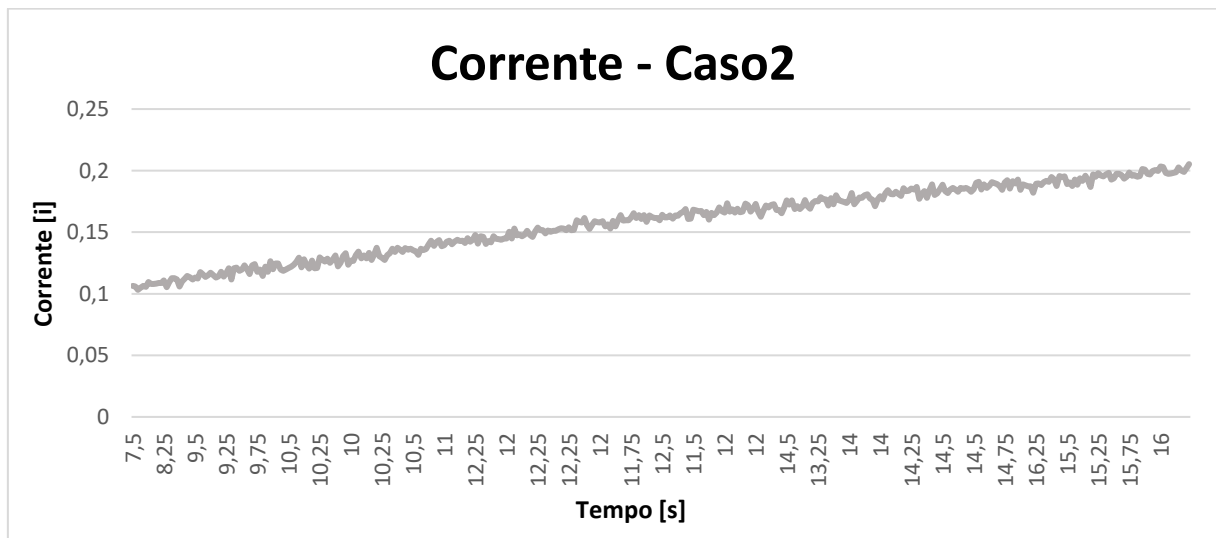
Caso 02: Modos com associação mista

Figura 71: Gráfico das temperaturas- Caso2



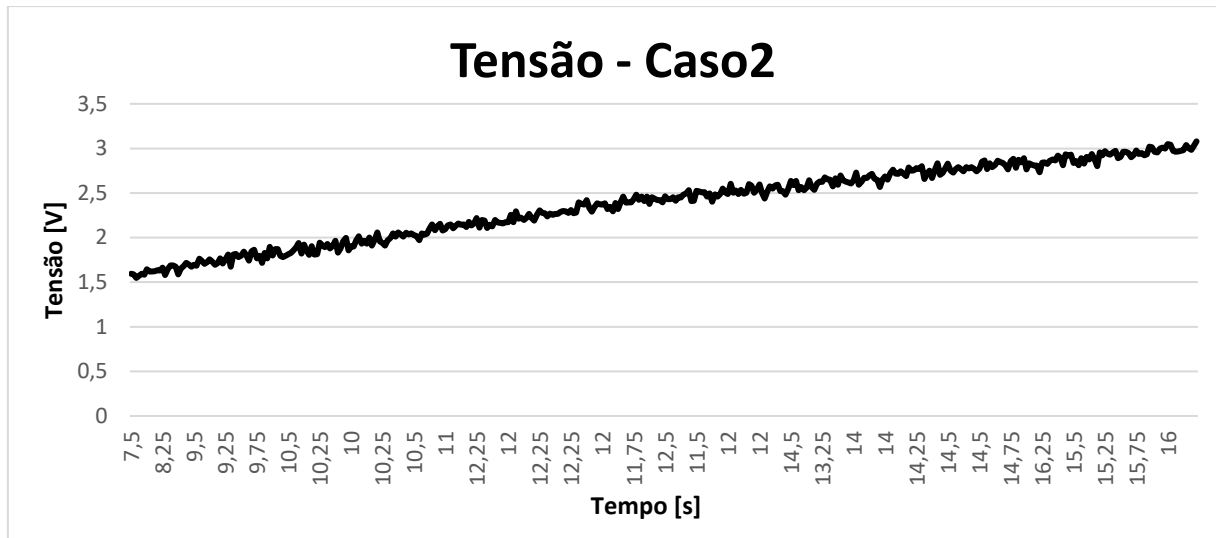
Fonte: Próprio Autor.

Figura 72: Gráfico da Corrente - Caso2



Fonte: Próprio Autor.

Figura 73: Gráfico da Tensão - Caso2



Fonte: Próprio Autor.

Fez-se o estudo do gerador com a média dos cinco dados finais de geração, como mostra na tabela:

Tabela 5: Valores para Avaliação do Experimento- Caso2.

	TEMPERATUR A LADO QUENTE (°C)	GRADIENT E	CORRENT E (A)	TENSÃO (V)	TENSÃO EM ABERTO (V)
MÉDIA S	50,3	16,1	0,2018	3,02697	3,75

Fonte: Próprio Autor.

Comparando as tensões quando o gerador está no circuito e quando está em aberto percebemos a perda de tensão e potência devido à resistência interna do gerador.

- Resistência Interna

Com os dados obtidos determina-se a resistência interna para os dois casos de associação no gerador, como segue:

Sabendo que:

Equação 39 – Fórmula para determinar a corrente.

$$i = \frac{U}{r} \quad (39)$$

E sabendo que a tensão ou potência consumida pela resistência interna é igual a diferença entre a tensão e a tensão em aberto. Logo:

Equação 40- Fórmula para determinar a resistência interna.

$$r_{interna} = \frac{U_{Aberto} - U_{cr}}{i} \quad (40)$$

Para o caso01, temos:

$$r_{interna} = \frac{7,53 - 2,76213}{0,184142}$$

$$r_{interna} = 24.9148$$

Para o caso02, temos:

$$r_{interna} = \frac{3,75 - 3,02697}{0,2018}$$

$$r_{interna} = 3,5829$$

- Potência Útil do gerador

Normalmente um gerador é descrito pela potência que ele fornece, porem sabendo que a potência depende do valor da corrente, que só se tem em um circuito fechado, e esta corrente depende da resistência equivalente do circuito. Neste trabalho temos a oportunidade de descobrir as potencias nos dois casos do gerador e no circuito em estudo

Potência Caso 01:

$$P_{01} = U_{01} \times i_{01}$$

$$P_{01} = 2,76213 \times 0,184142$$

$$\mathbf{P_{01} = 0,5086 W}$$

Potência Caso 02:

$$P_{02} = U_{02} \times i_{02}$$

$$P_{02} = 3,02697 \times 0,2018$$

$$P_{02} = \mathbf{0,6108\ W}$$

Observamos que a potência no circuito do caso 02 é maior que a potenciais no caso um mesmo com uma menor tensão em aberto.

- Eficiência da geração elétrica no termogerador

A eficiência de um termogerador é calculada pela razão entre as potenciais útil e a potência total, medida sem a perda na resistência interna, como ambas tem o valor da corrente em estudo podemos considerar como a razão entre as tensões, como mostra a seguir:

Equação 41- Eficiência de um termogerador.

$$\eta = \frac{U_{cr}}{U_{aberto}} \quad (41)$$

Mais uma vez foram feitas a verificação da eficiência nos dois casos do gerador:

Eficiência Caso 01:

$$\eta_{01} = \frac{2,76213}{7,53}$$

$$\eta_{01} = \mathbf{0,3668}$$

Eficiência Caso 02:

$$\eta_{02} = \frac{3,02697}{3,75}$$

$$\eta_{02} = \mathbf{0,8071}$$

Observamos que a potência do gerador no caso02 tem um maior rendimento, ou seja, tem menos perda de potência que o caso01.

- Eficiência total do termogerador

Como a ideia de cogeração neste trabalho e utilizar o a energia em forma de calor liberada no escape e conseguir converter em energia elétrica a partir do efeito seebeck, tem-se a intenção de construir este termogerador para esta transformação energética e para estimar a potência elétrica gerada a partir da potência fornecida, calculamos a eficiência total deste termogerador.

No experimento do termogerador foi utilizado uma resistência elétrica como fonte de calor e esta fonte tem sua potência determinada pelo produto da tensão de trabalho, que é a de alimentação da rede, e a potência medida quando em funcionamento, observada a seguir:

$$P_{resistencia} = 220 \times i$$

A corrente medida está mostrada na Imagem 83 a seguir, e foi de 1,43 A.

Figura 74: Corrente do Resistor.



Fonte: Autor Próprio.

Seguindo com os cálculos da potência, temos:

$$P_{resistencia} = 220 \times 1,43$$

$$P_{resistencia} = 314,6 \text{ W}$$

Sabendo da potência consumida da resistência e estimando que esta potência seja liberada para o reservatório Térmico do gerador podemos calcular a eficiência total do gerador termoeletrônico deste trabalho.

Para essa eficiência utilizaremos o caso de associação mais eficiente, caso02, que tem a maior potência de energia elétrica saindo do termogerador.

$$\eta = \frac{P_{02}}{P_{resistencia}}$$

$$\eta = \frac{0,6108}{314,6}$$

$$\eta = 0,001942$$

Esta é a eficiência do experimento de geração termoelétrica, porém sabe-se que o rendimento da resistência não é cem por cento, então a potência fornecida a água dentro do reservatório não é igual ao valor consumido pela rede elétrica, sabe-se também que a consideração de regime permanente do reservatório não é precisa e por fim sabemos que o isolamento térmico do reservatório não é cem por cento, isso tudo reduz a eficiência do calor aplicado ao experimento.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

Este capítulo estabelece as principais conclusões deste trabalho juntamente com a indicação de perspectivas de trabalho futuro, que possibilitam um maior aprofundamento no estudo visando melhores retornos tecnológicos e ambientais.

O princípio desta dissertação se dedicou ao estudo da possível recuperação de energia térmica desperdiçada no escapamento dos automóveis convencionais utilizando a geração de energia elétrica através da utilização de células de Peltier, de fácil acesso no comércio e baixo custo, funcionando segundo o efeito de Seebeck.

Com isso foi dividida basicamente em duas etapas que foram o estudo da aplicação de um termogerador onde avaliou-se a disponibilidade de espaço para a aplicação e a energia perdida no local mais apropriado do escapamento e juntamente com a determinação de um modelo de arrefecimento feito pela ventilação gerada pelo deslocamento do automóvel; e o estudo do desenvolvimento de um termogerador para o aproveitamento da energia liberada no escape, estudo esse que observa o espaço disponível, o sistema de arrefecimento e a temperatura de trabalho para desenvolver um protótipo do gerador de possível aplicação e fazer os estudos referentes a geradores que são a descoberta das potências, descobertas das limitações de geração, descobertas das resistências internas e eficiências.

Com base nas observações dos resultados obtidos para a geração elétrica no protótipo e o valor de potência possível de ser aproveitada no espaço apropriado do escapamento tem-se a conclusão que é possível fazer a cogeração a partir destas perdas térmicas e com pouco investimento. Concluído em número podemos dizer que a área de perda térmica estudada tem a capacidade de alojar quatro reservatórios térmicos nas dimensões do protótipo, reservatórios estes que podem ter o isolamento melhorado para ter maior eficiência, e sabendo que a

capacidade de módulos térmico no protótipo poderia ser aumentada pra doze módulos, facilmente, e por fim fabricar os dissipadores de calos de forma apropriada para a aplicação, para se ter maior dissipação e assim permanência do gradiente térmico.

Sendo assim, de acordo com os resultados encontrados, foi calculada a eficiência do gerador de $\eta = 0,8071$ mesmo com a não utilização de módulos termoelétricos apropriados para o efeito Seebeck. Porém a eficiência da termogeração de $\eta=0,001952$ no protótipo foi baixa e isso se dá a baixa eficiência da parte térmica do termogerador que consiste na eficiência da fonte de calor e na eficiência do isolamento térmico.

Logo em um metro de tubo de escapamento é capaz de gerar mais de 0,2% dos 800W perdido em um metro de tubo do escapamento, que seria mais 1,6W carregando uma bateria durante o funcionamento do automóvel sem o aumento de consumo de combustível. E esta geração aplicada aos automóveis híbridos teria um grande destaque na autonomia dos mesmos, pois estaria carregando as baterias mesmo em lugares onde não tivesse eletricidade e nem tempo de parar para recarregar.

Por fim, este trabalho aprova a aplicação de um sistema de cogeração embarcado em automoves por meio da geração termoelétrica através do efeito seebeck o permitiria uma melhora na eficiência juntamente com a preservação do meio ambiente, que é tão importante nos últimos anos.

6.1 DESENVOLVIMENTO FUTURO

As complexidades no desenvolvimento do protótipo juntamente com as dificuldades das medições efetivas da geração, nos permite acreditar que o rendimento pode ser bastante melhorado juntamente com o melhor aproveitamento da perda térmica nos automóveis, que é variável devido a não ter uma temperatura estritamente constante.

Como continuidade dos resultados experimentais deste trabalho tem-se o estudo e desenvolvimento de acoplamento do termogerador ao escapamento com foco de obter maior aproveitamento da energia térmica liberada, desde a menores temperaturas no início do funcionamento até as maiores temperaturas quando em altas rotações.

Outra sugestão em paralelo com ao acoplamento para melhor aproveitamento da carga térmica é a buscas por módulos termoelétricos com melhor figura de mérito e melhor resistência a temperatura e cargas mecânica, gerando assim uma maior rendimento e resistência.

Como última sugestão para trabalhos futuros, tem-se a utilização de métodos de simulação para reduzir os erros de prototipagem, que é constante em trabalhos experimentais, que vai desde a melhor geometria para a otimização das energias térmicas quando a resistências a cargas térmicas e mecânicas.

Com essas proporções dos trabalhos futuros e as buscas por fontes alternativas e prevenção do meio ambiente, fica demonstrado a importância da continuidade das pesquisas neste tema com mais detalhes e mais recursos de intelecto, de hardware, de software e de tempo.

7. REFERÊNCIAS

AFONSO, J. U. B. Gerador Termoelétrico para Escape de Automóvel com Controlo de Temperatura. Universidade do Minho, novembro de 2014.

ALBUQUERQUE, D. O. Avaliação térmica da disponibilidade dos gases de escapamento de um motor a gás natural em uma unidade de trigeriação. Universidade federal da Paraíba, 2016.

ALVES, P. P. A Experiencia de Joule Revisitada. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

BARJA, G. J. A. A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico. Universidade de Brasília, 2006.

BASTOS, Sergio André Machado. Pulseira para Geração de Energia. 84 Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Braga, 2010.

BRANDÃO, S. S. Trabalho no âmbito da cadeira: Produção e planeamento de energia elétrica. Universidade de Coimbra 2004.

BRITO, F.P. and MARTINS, J. Analysis of a Temperature-Controlled Thermoelectric Escape During a Cycle of Driving, 2016.

CARVALHO, M. A. S. Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2011.

CAVALCANTE, A. W. A. Estudo energético, termodinâmico e exereconômico na análise experimental de um sistema de alto desempenho de um grupo motor gerador de 100 kVAr alimentado a gás natural no campus da UFPB. Universidade Tecnológica Federal da Paraíba, 2015.

CENGEL, Y. A. BOLES, M. A. and KANOG~ LU, M. Thermodynamics: An Engineering Approach. New York: McGraw-Hill, 2011.

CERATTO, W. F.; FARIA, R. H. S. Estudo da cogeração em uma indústria de beneficiamento de madeira. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

COMMUNICATIONS, S. Soylent Communications. Disponível em: <http://www.nndb.com/people/685/000097394/>. Acesso em: Dezembro de 2019.

DONOSO, J. P. Transferência de calor por radiação. Disponível em: http://www.ifsc.usp.br/~donoso/fisica_arquitetura/Transferencia_de_Calor.pdf. Acesso em: Dezembro de 2019.

ENGEFAZ, Gestão e Resultado Empresarial. Inspeção Dinâmica: Apostila Termográfica, 2005.

FABRI JUNIOR, L.A. O Uso de Arduino na Criação de Kit para Oficinas de Robótica de Baixo Custo para Escolas Públicas. Universidade Estadual De Campinas. Limeira-SP, 2014.

FERNANDES, G. D. Estudo da viabilidade de implantação de um sistema de cogeração em uma lavanderia industrial. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

GONÇALVES, L. Tese de Doutorado. Microsistema termoelétrico baseado em teluretos de bismuto e antimônio. Universidade do Minho, 2008.

GREEN CAR CONGRESS: Volkswagen Shows Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery.” Disponível: <http://www.greencarcongress.com/2009/02/volkswagen-show.html>, 2009.

INCROPERA, F. P. Fundamentos de transferência de calor e de massa, 2014.

ISMAIL, Basel I.; AHMED, Wael H. Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology. Bentham Science Publishers Ltd: Recent Patents on Electrical Engineering, United States, novembro de 2009.

KAKIMOTO, L. C. Efeito Peltier-Seebeck: gerando eletricidade por diferença de temperatura. Unicamp, 2013.

KOTAS, T. J. The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis. 1985.

KUMAR, S. HEISTER, S. D. XU, X. SALVADOR, J. R. and MEISNER, G. P. “Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part II: Parametric Evaluation and Topological Studies,” J. Electron. Mater. Março de 2013.

LAGRANDEUR, J. CRANE, D. HUNG, S. MAZAR, B. and EDER, A. “Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe,” 25th Int. Conf. Thermoelectr, 2006.

LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira; AZEVEDO, Lizandra Prado de. O Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Inútil ao Sustentável. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, 2008.

MARÇAL, A.G.G. Cogeração: uma abordagem introdutória. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2010.

MARTINS, J; BRITO, F. P.; GONCALVES, L. M. GONCALES; ANTUNES, J. “Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes”. SAE International, 2011.

MCROBERTS, M. Arduino Básico. 1ª Edição. São Paulo – SP. Novatec Editora, 2011.

MEISNER, G. P. “Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive Waste Heat at GM,” 2011.

MONK, S. Programação com Arduino: começando com sketches. 1ª edição. Porto Alegre – RS. Bookman, 2013.

MORAN M. J., SHAPIRO H. N., BOETTNER D. D. E BAILEY M. B. Princípios de Termodinâmica para Engenharia, LTC Editora: 7ª edição, Rio de Janeiro, 2014.

MOURA, J. A. S. Filmes Manométricos de Fen e Aln Crescidos Por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier. Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, 2010.

NASCIMENTO, André Luccas Eccard de Souza; LUBANCO, Jhennifer Campos; MOREIRA, Thayara Abreu. Fontes Alternativas de Energia Elétrica: Potencial Brasileiro, Economia e Futuro. Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras e Instituto Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

NUNES, H. J. L. Cogeração de energia através do efeito Seebeck: Um estudo bibliométrico. VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Campo Grande/MS, 2017.

ONOVWIONA, H. I.; UGURSAL, V. I. Residential cogeneration systems: review of the current technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2006.

ORLANDO, J. Cogeneration Design Guide. [S.l.]: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1996.

PIEIDADE, P. M. Efeitos Termoelétricos e suas aplicações. Aquisição e Processamento de Sinais. IST – Lisboa, 1997.

PINTO, R. Termoeletricidade. Wikienergia. Disponível em: [http://wikienergia.com/~edp/index.php?title = Electricidade](http://wikienergia.com/~edp/index.php?title=Electricidade). Acesso em: Agosto de 2017.

SANTOS, F. B.; NOVO, L. M. A. Fundamentos teóricos relacionados à cogeração e o exemplo da central de cogeração Infoglobo. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SANTOS, Leonardo Paiva. Análise de Desempenho de um Gerador Termoeletrico Baseado no Efeito Seebeck. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Taubate, 2010.

SAQR, K. and MUSA, M. “Critical review of thermoelectrics in modern power generation applications,” Therm. Sci. 2009.

SOUSA, R. M. A. “Gerador Termoelétrico para Escape do Automóvel com Controlo de Temperatura,” 2011.

TITMAN, D. J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures, NDT&E International, Ames, 2001.

UCHIDA, K. TAKAHASHI, S. HARI, K. IEDA, J. KOSHIBAE, W. ANDO, K. MAEKAW, S. and SAITOH, E. Observation of the Spin Seebeck Effect, Nature 455, 2008.

VELMRE, E. “Thomas Johann Seebeck and his contribution to the modern science and technology,” 12th Bienn. Balt. Electron. Outubro de 2010.

8. ANEXOS

A1 - Correlações de transferência de calor por convecção para um escoamento externo sobre uma placa plana.

Correlação		Geometria	Condições ^d
$\delta = 5x Re_x^{-1/2}$	(7.19)	Placa plana	Laminar, T_f
$C_{f,x} = 0,664 Re_x^{-1/2}$	(7.20)	Placa plana	Laminar, local, T_f
$Nu_x = 0,332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	(7.23)	Placa plana	Laminar, local, T_f , $Pr \geq 0,6$
$\delta_t = \delta Pr^{-1/3}$	(7.24)	Placa plana	Laminar, T_f
$\bar{C}_{f,x} = 1,328 Re_x^{-1/2}$	(7.29)	Placa plana	Laminar, médio, T_f
$Nu_x = 0,664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	(7.30)	Placa plana	Laminar, médio, T_f , $Pr \geq 0,6$
$Nu_x = 0,565 Pe_x^{1/2}$	(7.32)	Placa plana	Laminar, local, T_f , $Pr \leq 0,05$, $Pe_x \geq 100$
$C_{f,x} = 0,0592 Re_x^{-1/2}$	(7.34)	Placa plana	Turbulento, local, T_f , $Re_x \leq 10^8$
$\delta = 0,37x Re_x^{-1/5}$	(7.35)	Placa plana	Turbulento, T_f , $Re_x \leq 10^8$
$Nu_x = 0,0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$	(7.36)	Placa plana	Turbulento, local, T_f , $Re_x \leq 10^8$, $0,6 \leq Pr \leq 60$
$C_{f,x} = 0,074 Re_x^{-1/2} - 1742 Re_x^{-1}$	(7.40)	Placa plana	Mista, médio, T_f , $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$, $Re_x \leq 10^8$
$Nu_x = (0,037 Re_x^{1/4} + 871) Pr^{1/3}$	(7.38)	Placa plana	Mista, médio, T_f , $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$, $Re_x \leq 10^8$, $0,6 \leq Pr \leq 60$

A2 - Propriedades termofísicas de gases à pressão atmosférica.

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/(kg · K))	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$	$k \cdot 10^3$ (W/(m · K))	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Ar							
100	3,5562	1,032	71,1	2,00	9,34	2,54	0,786
150	2,3364	1,012	103,4	4,426	13,8	5,84	0,758
200	1,7458	1,007	132,5	7,590	18,1	10,3	0,737
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700
400	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,690
450	0,7740	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
500	0,6964	1,030	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
550	0,6329	1,040	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683
600	0,5804	1,051	305,8	52,69	46,9	76,9	0,685
650	0,5356	1,063	322,5	60,21	49,7	87,3	0,690
700	0,4975	1,075	338,8	68,10	52,4	98,0	0,695
750	0,4643	1,087	354,6	76,37	54,9	109	0,702
800	0,4354	1,099	369,8	84,93	57,3	120	0,709
850	0,4097	1,110	384,3	93,80	59,6	131	0,716
900	0,3868	1,121	398,1	102,9	62,0	143	0,720
950	0,3666	1,131	411,3	112,2	64,3	155	0,723
1000	0,3482	1,141	424,4	121,9	66,7	168	0,726
1100	0,3166	1,159	449,0	141,8	71,5	195	0,728

A3 – Emissividade normal ou hemisférica total de superfícies selecionadas.

Sólidos Metálicos e Seus Óxidos^a

Descrição/Composição		Emissividade, ε_n ou ε_h , a Várias Temperaturas (K)										
		100	200	300	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Alumínio												
Altamente polido, película	(h)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06						
Folha, brilhante	(h)	0,06	0,06	0,07								
Anodizado	(h)			0,82	0,76							
Cromo												
Polido ou laminado	(n)	0,05	0,07	0,10	0,12	0,14						
Cobre												
Altamente polido	(h)			0,03	0,03	0,04	0,04	0,04				
Com oxidação estável	(h)					0,50	0,58	0,80				
Ouro												
Altamente polido ou película	(h)	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06				
Folha, brilhante	(h)	0,06	0,07	0,07								
Molibdênio												
Polido	(h)					0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,21	0,26
Jateado, fosco	(h)					0,25	0,28	0,31	0,35	0,42		
Com oxidação estável	(h)					0,80	0,82					
Níquel												
Polido	(h)					0,09	0,11	0,14	0,17			
Com oxidação estável	(h)					0,40	0,49	0,57				
Platina												
Polida	(h)						0,10	0,13	0,15	0,18		
Prata												
Polida	(h)			0,02	0,02	0,03	0,05	0,08				
Aços inoxidáveis												
Típico, polido	(n)			0,17	0,17	0,19	0,23	0,30				
Típico, limpo	(n)			0,22	0,22	0,24	0,28	0,35				
Típico, ligeiramente oxidado	(n)						0,33	0,40				
Típico, altamente oxidado	(n)						0,67	0,70	0,76			
AISI 347, com oxidação estável	(n)					0,87	0,88	0,89	0,90			
Tântalo												
Polido	(h)								0,11	0,17	0,23	0,28
Tungstênio												
Polido	(h)							0,10	0,13	0,18	0,25	0,29

A4 – Código de Programação do Arduíno.

```

/*
    * Este algoritmo utiliza de um
    arduino mega 2560 para obter duas leituras de
    temperatura e uma de corrente
    */
    // Biblioteca com as funções
    necessárias para o uso do termopar
    #include <max6675.h>
    // Biblioteca para integração arduino
    + excel
    #include <rExcel.h>
    //Definição de macros
    #define termo1_SO 34 // pino SO do
    termopar 1
    #define termo1_CS 32 // pino CS do
    termopar 1
    #define termo1_CLK 30 // pino CLK
    do termopar 1
    #define vcc_1 28 // vcc
    #define gnd_1 26 // gnd
    #define termo2_SO 48 // pino SO do
    termopar 2
    #define termo2_CS 46 // pino CS do
    termopar 2
    #define termo2_CLK 44 // pino CLK
    do termopar 2
    #define vcc_2 42 // vcc
    #define gnd_2 40 // gnd
    #define Current_pin A0 // pino de
    entrada com a medição da corrente
    rExcel excel;
    //Criação do objeto termo1
    MAX6675 termo1(termo1_CLK,
    termo1_CS, termo1_SO);
    //Criação do objeto termo2
    MAX6675 termo2(termo2_CLK,
    termo2_CS, termo2_SO);
    //Váriável para medição temporal
    int times = 0;
    int index = 6;
    void setup()
    {
        // Inicia a comunicação serial com
        baudrate de 9600bbs
        Serial.begin(9600);
        excel.clearInput();
        // Define A0 como uma entrada de
        sinal
        pinMode(Current_pin, INPUT);
        pinMode(vcc_1, OUTPUT);
        pinMode(gnd_1, OUTPUT);
        pinMode(vcc_2, OUTPUT);
        pinMode(gnd_2, OUTPUT);
        digitalWrite(vcc_1, HIGH);
        digitalWrite(gnd_1, LOW);
        digitalWrite(vcc_2, HIGH);
        digitalWrite(gnd_2, LOW);

        analogReference(DEFAULT);

        // Serial.println("Medições
        termopares e corrente");
    }
    void loop()
    {
        float current; // Valor de corrent que
        passa pelo sensor ACS712
        float voltage[300]; // Vetor com 300
        tensões instantâneas lidas no pino A0
    }

```

float voltageM = 0; // Variável utilizada para calculo da média das 300 leituras do pino A0

```
for(int i = 0; i<300; i++)
{
  /*
   * A entrada analógica do arduino possui 10 bits,
   * então o valor de tensão medido pelo mesmo será
   * proporcional ao um valor inteiro que varia de
   * 0 (quando estiver em 0V)até 1024( quando estiver em 5V,
   * portanto para se obter o valor de tensão na entrada do
   * arduino basta multiplicar o valor lido por 5V e dividir
   * por 1024.
   *
   */
  voltage[i] = analogRead(Current_pin);
  voltage[i] = ((voltage[i]*5)/1024.00);
  voltageM = voltage[i] + voltageM; //
  A cada vez que
    o loop ocorrer a variável voltageM se somará com o valor
    de tensão lido
  }
  // Como foram calculados 300 valores de tensão e o offset do dispositivo é de 2,5V, calcula-se:
  voltageM = (voltageM/300.0)-2.5;
```

// O fabricante do módulo determina que a relação entre tensão de saída e corrente que passa pelo módulo é 66mV/A

```
current =
(voltageM*1000.00/66.00);
current = current*1000.00;
// Deve-se adicionar uma constante para balanceamento devido a imperfeições nos semicondutores internos ao módulo
current = current + 125;
excel.write("main", "B6", times, 2);
excel.write("main", "C6",
termo1.readCelsius(), 2);
excel.write("main", "D6",
termo2.readCelsius(), 2);
excel.write("main", "E6", current,
2);
excel.writeIndexed("main", index +
5, 2, times, 2);
excel.writeIndexed("main", index +
5, 3,
termo1.readCelsius(),2);
excel.writeIndexed("main", index +
5,
4,termo2.readCelsius(), 2);
excel.writeIndexed("main", index +
5, 5, current, 2);
index = index + 1;
times = times + 5;
delay(5000);
}
```