



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VÍTOR MENEZES PONTES

**ESTUDO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO E ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE
GERADOR TERMOELÉTRICO EM AUTOMÓVEIS**

FORTALEZA

2016

VÍTOR MENEZES PONTES

**ESTUDO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO E ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE
GERADOR TERMOELÉTRICO EM AUTOMÓVEIS**

Projeto Final de Curso apresentado à
Universidade Federal do Ceará, através do
Departamento de Engenharia Elétrica, como
requisito para obtenção do título de Graduado
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de
Carvalho.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P859e Pontes, Vítor Menezes.
Estudo do módulo termoeletrico e análise da utilização de gerador termoeletrico em automóveis / Vítor Menezes Pontes. – 2016.
99 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
1. Módulo termoeletrico. 2. Gerador termoeletrico. 3. Efeito Seebeck. 4. Energia renovável. I. Título.
CDD 621.3
-

VÍTOR MENEZES PONTES

**ESTUDO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO E ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE
GERADOR TERMOELÉTRICO EM AUTOMÓVEIS**

Projeto Final de Curso apresentado à
Universidade Federal do Ceará, através do
Departamento de Engenharia Elétrica, como
requisito para obtenção do título de Graduado
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de
Carvalho.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Marcelo Telles de Souza Quixadá

Dedico esse trabalho a Deus e
à minha família.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por permitir essa jornada de estudo.

Aos meus pais Olavo e Oda e as minhas irmãs Flávia e Fernanda pela compreensão e apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho pela orientação e pela disponibilização de seu valioso tempo.

Aos participantes da banca examinadora Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco e Eng. Marcelo Telles de Souza Quixadá pelo tempo e sugestões.

Aos professores do Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo esforço na transmissão de seus conhecimentos.

Aos funcionários dos laboratórios, da coordenação, da limpeza e manutenção por seu compromisso de trabalho.

Aos colegas de turma pelas noites viradas, pelos grupos de estudos e pelo companheirismo em todas as horas.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros
de gigantes. ”

Isaac Newton

RESUMO

O gerador termoeletrico (GTE) transforma energia térmica em energia elétrica através do efeito termoeletrico. Os principais efeitos termoeletricos são a transformação de energia térmica em energia elétrica, efeito Seebeck, e a transformação de energia elétrica em energia térmica, efeito Peltier. A geração de energia elétrica pela utilização de GTE tem ganhado mais interesse e investimentos devido a não emitir dióxido de carbono, a não possuir partes móveis, a não produzir ruídos e apresentar pequenas dimensões. Os GTEs podem ser utilizados para produzir energia elétrica pelo reaproveitamento do resíduo de calor de gases de exaustão de um motor a combustão interna, em sistema de concentração solar e em cogeração. O GTE é formado por um termopar, ou por vários termopares ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, cuja tensão gerada é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre a junção quente e a junção fria. Essa pesquisa tem como objetivo o estudo do módulo termoeletrico, o estudo da utilização de módulos termoeletricos como geradores de energia elétrica em automóveis e o estado da arte. O trabalho apresenta a fundamentação teórica para melhor compreensão do funcionamento do módulo termoeletrico através um modelo matemático que é validado através de dados experimentais de Dutra e Melo (2014). No ensaio experimental de Dutra e Melo (2014) o módulo termoeletrico aproveita o resíduo de energia térmica dos gases de exaustão e gera uma potência elétrica de 3,57 W para uma carga de $1,2 \Omega$, quando é submetido a uma diferença de temperatura de $133,6^{\circ}\text{C}$. Desta forma, o GTE é capaz de assumir 5,24 % das cargas elétricas do automóvel e com isso aumentar a eficiência do combustível.

Palavras-chave: Módulo Termoeletrico, Gerador Termoeletrico, Efeito Seebeck, Energia Renovável.

ABSTRACT

The thermoelectric generator (TEG) transforms thermal energy into electrical energy by using the thermoelectric effect. The main thermoelectric effects are the conversion of thermal energy into electrical energy, Seebeck effect, and the conversion of electrical energy into thermal energy, Peltier effect. The generation of electrical energy by the use of TEG has gained more interest and investment due that it doesn't emit carbon dioxide, doesn't have moving parts, doesn't produce noise and presents small dimensions. The TEGs are used to produce electric energy by reusing the heat waste of internal combustion engine exhaust gas, by solar concentration system and by cogeneration. The TEG is formed by a thermocouple, or by multiple thermocouples connected electrically in series and thermally in parallel, whose generated voltage is directly proportional to the temperature difference between the hot junction and the cold junction. This research aims to study the thermoelectric module, to study the feasibility of using thermoelectric modules as power generators in automobiles and the state of the art. This paper presents the theoretical basis for better understanding of the thermoelectric module operation by a mathematical model that is validated by the experimental data from Dutra e Melo (2014). In the experimental test from Dutra e Melo (2014) the thermoelectric modules takes advantage of the exhaust gases thermal energy waste and provides electric power equal to 3,57 W to a load of 1,2 Ω , when it's subjected to a temperature difference of 133,6 °C. Thus, the TEG is able to assume 5,24 % of the automobile electric load and thereby increase fuel efficiency.

Keywords: Thermoelectric Module, Thermoelectric Generator, Seebeck Effect, Renewable Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama do RTG utilizado na sonda Cassini	20
Figura 2 – Dissipação de energia de um motor de combustão interna	22
Figura 3 – Representação das bandas e lacunas para os níveis de energia atômica.....	30
Figura 4 – Níveis de energia em um isolante, semicondutor e condutor.....	31
Figura 5 – Representação de uma base de silício: normal, dopagem tipo-n e dopagem tipo-p.....	33
Figura 6 – Efeito das impurezas doadoras na estrutura da banda de energia.....	33
Figura 7 – Esquema básico de um termopar.....	34
Figura 8 – Pastilha de Peltier.....	37
Figura 9 – Coeficiente de Seebeck de um par termoelétrico Si-Ge.....	39
Figura 10 – Dissipador térmico.....	41
Figura 11 – Esquemático de um termopar funcionando como sensor de temperatura.....	42
Figura 12 – Associação série de termopares.....	45
Figura 13 – Módulo termoelétrico.....	48
Figura 14 – Módulo termoelétrico comercial.....	49
Figura 15 – Representação esquemática do módulo termoelétrico.....	50
Figura 16 – GTE completo.....	58
Figura 17 – GTE acoplado ao cano de escapamento do motor diesel.....	58
Figura 18 – Módulo termoelétrico e suas características geométricas.....	62
Figura 19 – Curva de tensão, corrente e potência a 300°C dada pelo datasheet.....	63
Figura 20 – Tensão de saída versus Diferença de temperatura.....	64
Figura 21 – Curva de tensão de saída dada pelo datasheet.....	65
Figura 22 – Potência de saída na carga versus Diferença de temperatura.....	66
Figura 23 – Curva de potência de saída dada pelo datasheet.....	66
Figura 24 – Temperatura do lado quente, do lado frio e diferença de temperatura.....	67
Figura 25 – Rendimento do módulo termoelétrico.....	68
Figura 26 – Representação do experimento proposto.....	69
Figura 27 – Montagem Real do GTE com ventilação forçada.....	69
Figura 28 – Temperatura do lado quente variando a altura do suporte.....	70
Figura 29 – Potência de saída pela diferença de temperatura do módulo HT8-12-40.....	71

Figura 30 – Potência de saída pela diferença de temperatura do módulo TE Technology 40x40x3,9 mm.....	71
Figura 31 – Potência de saída em função do tempo do módulo TEHP1-1264-0.8.....	72
Figura 32 – Potência e tensão de saída em função da corrente do módulo HZ-14.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Potência e área de utilização de GTE's em áreas remotas.....	19
Tabela 2 –	Tempo de meia-vida, taxa de calor emitida e custo de substâncias radioativas.....	21
Tabela 3 –	Resistividade elétrica de alguns materiais.....	29
Tabela 4 –	Coeficiente de Seebeck de alguns materiais.....	39
Tabela 5 –	Categoria de termopares com seus elementos, faixa de tensão e faixa de temperatura.....	43
Tabela 6 –	Categoria de termopares com suas vantagens e desvantagens.....	43
Tabela 7 –	Propriedades termoelétricas de diferentes materiais.....	47
Tabela 8 –	Dados experimentais do módulo 1.....	60
Tabela 9 –	Dados experimentais do módulo 2.....	60
Tabela 10 –	Especificações do módulo termoelétrico TEG1-12611-6.0.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATEG	<i>Automotive Thermoelectric Generator</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
COP	Coefficient of performace
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GTE	Gerador Termoelétrico
MCI	Motor de Combustão Interna
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
RTG	<i>Radioisotope Thermoelectric Generator</i>
TEG	<i>Thermoelectric Generator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
A_n	Área do material semiconductor tipo-n
A_p	Área do material semiconductor tipo-p
c	Calor específico
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
I	Corrente Elétrica
I_L	Corrente na carga
K	Condutância térmica
k	Condutividade térmica
k_n	Condutividade térmica do semiconductor tipo-n
k_p	Condutividade térmica do semiconductor tipo-p
L	Comprimento
L_n	Comprimento do material semiconductor tipo-n
L_p	Comprimento do material semiconductor tipo-p
m	Massa
N	Número de termopares
η	Rendimento
η_T	Rendimento térmico
P	Potência
P_L	Potência da carga
P_{máxima}	Potência máxima
Q	Calor
Q_f	Calor do lado frio
Q_L	Calos de saída
Q_H	Calor de entrada
Q_p	Taxa de transferência de calor pelo efeito Peltier
Q_q	Calor do lado quente
Q_T	Taxa de transferência de calor pelo efeito Thomson
R	Resistência elétrica
R_c	Resistência de contato
R_e	Resistência elétrica equivalente
R_j	Resistência da junção

R_L	Resistência da carga
R_i	Resistência interna do módulo termoeletrico
R_n	Resistência do material semiconductor tipo-n
R_p	Resistência do material semiconductor tipo-p
S	Entropia
t	Tempo
T	Temperatura
T_f	Temperatura do lado frio
T_q	Temperatura do lado quente
T_{sup}	Temperatura da superfície
T_{viz}	Temperatura da vizinhança
U	Energia interna
V	Tensão
V_i	Tensão do módulo termoeletrico
V_o	Tensão na carga
W	Trabalho
Z	Figura de mérito
$Z_{dispositivo}$	Figura de mérito do dispositivo
Z_{pn}	Figura de mérito do temropar
Z_T	Figura de mérito na temperatura T
α	Coefficiente de Seebeck
α_n	Coefficiente de Seebeck do semiconductor tipo-n
α_p	Coefficiente de Seebeck do semicopndutor tipo-p
ρ	Resistividade elétrica
ρ_n	Resistividade elétrica do semiconductor tipo-n
ρ_p	Resistividade elétrica do semiconductor tipo-p
Φ	Fluxo de calor
ϵ	Emissividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
π	Coefficiente de Peltier
π_n	Coefficiente de Peltier do semiconductor tipo-n
π_p	Coefficiente de Peltier do semiconductor tipo-p
μ	Coefficiente de Thomson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	ESTADO DA ARTE.....	16
2.1	História dos geradores termoeletricos.....	16
2.2	Uso de geradores termoeletricos em áreas remotas.....	18
2.3	Geradores termoeletricos radioisotopicos.....	19
2.4	Geradores termoeletricos automobilisticos.....	22
2.5	Outras pesquisas na área de geradores termoeletricos.....	23
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
3.1	Leis da termodinâmica.....	24
3.1.1	<i>1º Lei da termodinâmica.....</i>	24
3.1.2	<i>2º Lei da termodinâmica.....</i>	24
3.1.3	<i>3º Lei da termodinâmica.....</i>	25
3.2	Calor.....	26
3.2.1	<i>Transferência de calor por convecção.....</i>	27
3.2.2	<i>Transferência de calor por condução.....</i>	27
3.2.3	<i>Transferência de calor por radiação.....</i>	28
3.3	Condução elétrica em sólidos.....	29
3.3.1	<i>Dopagem de materiais semicondutores.....</i>	32
3.3.1.1	<i>Semicondutores do tipo-n.....</i>	32
3.3.1.2	<i>Semicondutores do tipo-p.....</i>	33
3.4	Efeitos termoeletricos.....	34
3.4.1	<i>Efeito Joule.....</i>	35
3.4.2	<i>Efeito Peltier.....</i>	36
3.4.3	<i>Efeito Seebeck.....</i>	38
3.4.4	<i>Efeito Thomson.....</i>	40
3.5	Dissipador térmico.....	41
3.6	Termopar.....	42
3.7	Figura de mérito.....	45
3.8	Módulos termoeletricos.....	48

3.9	Gerador termoeletrico.....	49
3.9.1	<i>Modelagem matemática do gerador termoeletrico.....</i>	49
3.9.2	<i>Rendimento do gerador termoeletrico.....</i>	52
3.10	Sistema elétrico automotivo.....	54
3.11	Sistema de escapamento automotivo.....	55
4	ESTUDO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO.....	57
4.1	Ensaio experimental.....	57
4.1.1	<i>Resultados.....</i>	59
4.2	Módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0.....	61
4.3	Análise dos resultados.....	64
4.4	Comparativo de módulos termoeletricos.....	68
5	CONCLUSÃO.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76
	ANEXO A – Dados experimentais do módulo 1.....	81
	ANEXO B – Dados experimentais do módulo 2.....	89
	ANEXO C – Sistema de carga.....	97
	ANEXO D – Datasheet TEG1-12611-6.0.....	

1 INTRODUÇÃO

De acordo com projeções feitas pelo Banco Mundial e o Fundo monetário, a população dos países da Ásia e América do Sul crescerá mais que os outros países, ocorrendo também melhoria nas condições econômicas da população, isso se traduz em um crescimento do consumo de energia elétrica (PEREIRA, 2014). O aumento do consumo exige o aumento da produção e basear a produção de energia elétrica em fontes fadadas a se esgotar não seria inteligente.

O protocolo de Kyoto, datado de 15 de março de 1998, tem como objetivo a redução da emissão de gases poluentes responsáveis pelo efeito estufa. O protocolo tinha como um dos objetivos o aumento do uso de fontes de energia limpa para diminuir o uso de combustíveis fósseis, pois a produção de dióxido de carbono (CO_2) está diretamente ligada a poluição atmosférica e ao aquecimento global (SUAPESQUISA, 2016).

De acordo com o relatório síntese ano 2016 da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), no Brasil 58,8% da oferta interna de energia provém de fontes não renováveis e 41,2% provém de fontes renováveis, onde a fonte hidráulica é responsável por 11,3%. O Brasil ainda possui grande potencial hidrelétrico, mas o impacto ambiental para o aproveitamento desse potencial seria enorme. A matriz energética brasileira está se tornando cada vez mais diversificada, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), a ideia do desenvolvimento sustentável e os leilões de energia de fonte alternativas são grandes responsáveis pelo investimento em fontes de energia renováveis e por consequência pela diversificação da matriz energética brasileira.

Os leilões de energia elétrica são supervisionados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e são realizados no âmbito do ambiente de contratação regulada. Os leilões são utilizados para equilibrar oferta e consumo de energia elétrica e também definem a participação das fontes de energia a serem utilizadas na geração, o que impacta na diversificação da matriz energética. Os leilões podem ser de energia existente, que deve atender o contratante no ano subsequente à contratação (denominado A-1), ou de energia nova que provém de usinas em projeto ou em construção que devem entrar em operação em 3 anos (denominado A-3) ou 5 anos (denominado A-5). Os contratos dos leilões podem ser por quantidade, quantidade fixa de energia à um preço fixo, ou por disponibilidade, paga-se uma taxa fixa para o gerador mais o custo do combustível (ABRADEE, 2016).

A resolução normativa N° 482 (ANEEL, 2012) abriu mais portas para ampliação do mercado de fontes renováveis. A resolução normativa N° 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi publicada em 17 de abril de 2012 e estabelece as condições de acesso da microgeração (até 75 kW) e minigeração (a partir de 75 kW até 5 MW), que utiliza cogeração qualificada (ANEEL - resolução normativa 21 modificada) ou fontes renováveis, ao sistema de distribuição de energia elétrica. A resolução define que mensalmente o excesso produzido pela unidade consumidora é um empréstimo gratuito para a distribuidora local e será devolvido em forma de crédito para utilização nos meses seguintes, tendo validade de 12 meses consecutivos. O relatório síntese ano 2016 da EPE informa que a geração distribuída já possui 16,5 MW de potência instalada. Os GTEs têm aplicação na geração de pequeno porte, por isso se enquadrariam na microgeração.

Por todos os motivos citados houve um grande avanço nas fontes de energia alternativas como energia solar, eólica, biomassa, geotérmica, mare-motriz, *etc.* Uma dessas fontes de energia alternativa é baseada no efeito termoelétrico, transformação de energia térmica em energia elétrica através de um gerador termoelétrico (GTE) ou transformação de energia elétrica em energia térmica através de uma pastilha de Peltier. O GTE pode ser utilizado na cogeração, aproveitando o resíduo de energia térmica de um processo (KAO *et al.*, 2010). Snyder (2008) aplicou o GTE para alimentar um relógio de pulso utilizando a energia térmica do corpo humano.

O GTE transforma energia térmica em energia elétrica pelo efeito Seebeck. O efeito Seebeck, descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821, é quando uma diferença de potencial elétrico é criada entre dois condutores, sendo eles diferentes, devido a presença de uma diferença de temperatura entre as junções dos condutores. O GTE é formado por apenas um módulo termoelétrico ou por vários módulos termoelétricos, estando eles ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo. As vantagens da utilização do GTE são as pequenas dimensões, a não geração de gases poluentes, não possuir partes móveis e não gerar ruído. As principais desvantagens são o custo do equipamento, poucas opções no mercado e a baixa eficiência de conversão, em torno de 5%.

O relatório síntese ano 2016 da EPE informa que os meios de transportes são responsáveis por 32,2% do consumo da oferta interna de energia do Brasil e a grande maioria depende de combustíveis fósseis para funcionar. Automóveis são um dos grandes responsáveis pela emissão de dióxido de carbono, por isso existem pesquisas em veículos híbridos, veículos elétricos, veículos movidos a hidrogênio e biocombustíveis.

O alternador transforma energia mecânica em energia elétrica, portanto para geração de energia elétrica é necessário o consumo de combustível. De acordo com Pereira (2014), 70% da energia gerada pelo combustível são perdas associadas a dissipação de calor. Uma pesquisa de aplicação de GTE nessa área é o aproveitamento do resíduo de energia térmica dos gases de exaustão para alimentar as cargas elétricas. De acordo com Yang (2007), o reaproveitamento da energia térmica dos gases de exaustão pelo GTE reduz o consumo de combustível em até 10%.

O objetivo desse trabalho é o estudo do módulo termoeletrico e a análise da sua utilização como gerador de energia elétrica pelo uso da energia térmica dos gases de exaustão de um motor de combustão interna (MCI). A estrutura do trabalho é descrita a seguir:

- O capítulo 1 é a introdução e apresenta a motivação dessa pesquisa;
- O capítulo 2 é o estado da arte e apresenta as aplicações de GTE e revisão bibliográfica de pesquisas e estudos publicados;
- O capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica e a modelagem matemática de um módulo termoeletrico;
- O capítulo 4 apresenta dados experimentais, a validação do modelo matemático do GTE pelos dados experimentais e a análise da aplicação de GTE em veículos;
- O capítulo 5 apresenta as considerações finais e proposta de trabalhos futuros;
- Ao final estão disponíveis a referência bibliográfica e o anexo.

2 ESTADO DA ARTE

As teorias fundamentais e a evolução dos geradores termoelétricos são um triunfo da comunidade científica. Inúmeros cientistas contribuíram para a descoberta e evolução desse tema. Alessandro Volta (1800) concluiu que a eletricidade que causava espasmos em sapos, experimento feito por Luigi Galvani (1780), ocorria pelo contato entre dois metais distintos conectados aos nervos da rã. Essa aferição iniciou o princípio do termopar (MONTEIRO, 2002).

Os grandes nomes dos princípios da termoeletricidade são Thomas Seebeck, Jean Peltier e William Thomson – Lorde Kelvin, que estudaram o efeito Seebeck em 1821, o efeito Peltier em 1834 e o efeito Thomson em 1851, efeitos que são relacionados entre si. Módulos termoelétricos aplicam o efeito Peltier na refrigeração e o efeito Seebeck em geradores termoelétricos.

2.1 História dos geradores termoelétricos

A seguir, em ordem cronológicas, fatos significativos no desenvolvimento das teorias fundamentais e na evolução dos geradores termoelétricos (HOPKINS, 2008).

1800 – Pilha Voltaica – Força eletromotriz era gerada quando dois metais heterogêneos entravam em contato. A melhor configuração achada por Alessandro Volta foi a utilização de zinco e cobre separados por tecido encharcado em solução condutora.

1836 – Pilha de Daniell – pilha constituída de cobre e zinco interligados e respectivamente imersos em Cu^{+2} e Zn^{+2} . A evolução em relação a pilha voltaica foram os eletrodos se encontrarem em compartimentos separados e interligados por uma ponte salina.

1864 – Termopilha de Markus – A força eletromotriz de um único par, conhecida como “um vigésimo da célula Daniel”, produzia em torno de 55mV. Formada por um termopar no qual o metal negativo era uma liga de 10:6:6 de cobre, zinco e níquel e o metal positivo era uma liga de 12:5:1 de antimônio, zinco e bismuto.

1864 – Termopilha de Becquerel – Inventada por Eduard Becquerel. A junção era composta de sulfeto de cobre para um metal e prata para o outro.

1874 – Termopilha de Clamond – Utilizava uma liga de zinco-antimônio para um lado do termopar e ferro para o outro. Alimentada a gás combustível.

1879 – Termopilha de Clamond Melhorada – Apresentava força eletromotriz igual ou superior a 109 V, com uma resistência interna de 15,5 Ω . A máxima potência de saída era 192 W, em 54 V e 3,5 A.

18?? – Termopilha de Noe – As junções quentes são direcionadas ao queimador central e as junções frias são refrigeradas por radiação e convecção através de aletas verticais externas. A tensão de saída desta pilha era em torno de 2 V, com resistência interna de 0,2 Ω .

18?? – Termopilha de Hauck – Força eletromotriz de um simples par, estimado como “0,1 de uma célula Daniel”, era em torno de 110 mV.

1905 – Patente Yamamoto – Kinzo Yamamoto patenteou em 1925 no Japão uma pilha no qual o material do tipo-p era uma liga 12:48:36,8 de bismuto, antimônio e zinco. As informações sobre esta pilha foram destruídas no terremoto de Kanto em 1923.

1925 – Thermattaix – Possui um voltímetro com escala de 0-10 V que indica a voltagem adequada para carregar um acumulador de 6,3 V. Tudo indicava que o dispositivo foi projetado para carregar uma bateria tipo chumbo-ácido ao invés de alimentar um aparelho de rádio diariamente.

1930 – Gerador Termoelétrico Alimentado a Gás – Formado por uma variedade de termopares associados que produzia 2 V a 0,5 A para aquecer os filamentos das válvulas. Em circuitos de alta tensão os termopares associados produziam 120 V a 10 mA. Termopares não produzem altas tensões, nesse gerador um termopar produzia em torno de 40 mV, portanto 50 termopares em série eram necessários para chegar a 2 V e 3000 termopares em série para 120V.

1950 – Gerador Termoelétrico Russo Feito com Lâmpada a Querosene – Tinha objetivo de alimentar aparelhos de rádio. As tensões de saída são desconhecidas, provavelmente produzida por uma fonte de alimentação tipo vibrador. O vibrador é um dispositivo eletromecânico que filtra a baixa tensão em corrente contínua e a transforma em corrente alternada que então passa por um transformador elevador. Esta pilha era amplamente utilizada em rádios de automóveis, antes da descoberta dos dispositivos semicondutores.

Nos dias atuais uma das aplicações do gerador termoelétrico é gerar pequena quantidade de energia para iluminação no período da noite em locais de difícil acesso, pois possuem alta confiabilidade e baixo custo de manutenção. O gerador termoelétrico pode substituir o gerador elétrico a combustível, que tem alto custo de combustível e gera poluição sonora, e os sistemas fotovoltaicos, que dependem da insolação (números de horas de brilho do Sol) e apesar de possuir maior rendimento em regiões de baixas temperaturas é necessário um sistema de armazenamento de energia elétrica para alimentação de cargas elétricas no período da noite.

Termopilhas fabricadas com semicondutores a base de telureto de bismuto vem sendo avaliadas desde da metade da década de 60, pois são mais eficientes que outros termopares e mais simples de fabricar (SANTANILLA, 2004).

2.2 Uso de Geradores Termoelétricos em áreas remotas

No norte da Suécia várias famílias rurais utilizavam geradores elétricos a gasolina como fonte de energia elétrica, mas essa geração produzia uma grande poluição sonora em conjunto com o alto custo de manutenção e de combustível. Como alternativa Anders Killander decidiu pela utilização de dois módulos HZ-20 fabricados pela Hi-z Technology Inc e capaz de fornecer 20 W (SANTOS, 2007). O gerador termoelétrico usava os módulos HZ-20 ligados em série. O gerador termoelétrico tinha sua tensão nominal de saída de 4,76 V convertida para 13,5 V através de um conversor cc-cc que passava a alimentar quatro baterias ácidas de 12 V. A fonte de calor era o fogão a lenha e a fonte fria era a temperatura ambiente com ajuda de um ventilador.

No Estados Unidos o distrito Grant County, é uma região circundada de montanhas que faz parte do Estado de Oregon, precisava prover acesso à internet a cinco escolas e o custo para conectar uma linha a cada escola tornava o projeto inviável. A solução encontrada foi uma

estação repetidora alimentada por um painel fotovoltaico e um conjunto de baterias, mas nos meses de inverno essa solução apresentava falhas. A empresa Global Thermoelectric instalou um gerador termoelétrico que resolveu o problema. O aumento de demanda tornou necessária a instalação de um segundo gerador termoelétrico, o acréscimo de potência estabilizou o sistema (GLOBAL THERMOELECTRIC, 2016).

Na tabela 1 são indicados alguns exemplos de potência gerada e área de utilização de geradores termoelétricos em áreas remotas.

Tabela 1 – Potência e área de utilização de GTE's em áreas remotas

Geração (W)	Área	Local
120	Sistema de Automação de poço produtor de petróleo	Província de Urucu, Amazônia
50	Sistema de comunicação de emergência	Rock Mountains, Canadá
400	Sistema de configuração e segurança em plataforma de petróleo	Tailândia
5000	Sistema de proteção catódica e telecomunicação para SCADA	Índia
220	Sistema de produção de gás e proteção catódica	Estados Unidos
550	Sistema de comunicação VSAT	Cordilheira dos Andes, Chile
15	Estação de medição de distribuição em gasoduto	Calgary, Canadá

Fonte: Adaptado de Farias (2009)

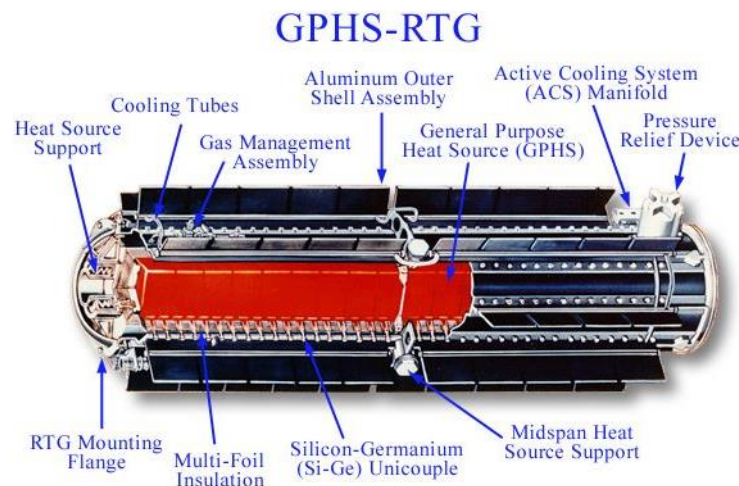
2.3 Geradores Termoelétricos Radioisotópicos

O gerador termoelétrico radioisotópico (RTG – *Radioisotope Thermoelectric Generator*) é um gerador elétrico que utiliza uma matriz de termopares para transformar o calor liberado pelo decaimento de matérias radioativas em eletricidade através do efeito Seebeck.

O RTG foi inventado em 1954 por Ken Jordan e John Birden, chegando a ser utilizado como fonte de energia em satélites, sondas espaciais, faróis instalados pela então União Soviética e estações meteorológicas no Ártico (WIKIPÉDIA - RTG, 2016). Apesar da utilização de material radioativo o esquemático é simples, os termopares ficam conectados de um lado ao encapsulamento reforçado contendo o material radioativo e do outro lado a um

dissipador de calor. O termopar converte a energia térmica em energia elétrica, pois o efeito Seebeck cria uma corrente elétrica no termopar devido a diferença de temperatura do material radioativo e do dissipador de calor. A figura 1 apresenta o RTG utilizado na sonda Cassini.

Figura 1 – Diagrama do RTG utilizado na sonda Cassini



Fonte: NASA (2016)

Pelo estudo de Blanke (1960) o material radioativo deve possuir as seguintes características:

- a) A meia-vida deve ser longa o suficiente para manter o fornecimento de energia relativamente constante pelo tempo necessário do projeto;
- b) A taxa de transmissão de energia é inversamente proporcional a meia-vida, então a meia-vida não pode ser demasiadamente longa;
- c) Projetos espaciais requerem grande energia por massa, pois peso é um alto custo em programas espaciais;
- d) Radiação emitida deve ser facilmente absorvida e transformada em energia térmica, caso das ondas α e β . A radiação não pode gerar valores significativos de radiação gama e radiação de nêutron.

Pode-se observar na tabela 2 que os elementos radioativos que melhor atendem as necessidades são o Plutônio-238, Estrôncio-90 e Polônio-210. O Plutônio-238, combustível mais utilizado, tem uma meia-vida de 86,8 anos e o decréscimo de potência fornecida pelo combustível é de 0,787% ao ano. De acordo Caillat (2013), os requisitos básicos da NASA são 6 watts por quilograma, com degradação menor que 22% em 14 anos.

Tabela 2 – Tempo de meia-vida, taxa de calor emitida e custo de substâncias radioativas

Radioisótopo	Meia-vida (anos)	Calor emitido (W/g)	Custo por grama (em dólares)
Cério-144	0,781	25	15
Cúrio-242	0,445	120	459
Estrôncio-90	28,1	0,93	250
Plutônio-238	86,8	0,55	3000
Polônio-210	0,378	141	570

Fonte: Duarte e Carlson (2005)

Os dois principais tipos de RTG são: o GPHS RTG (*General Purpose Heat Source Radioisotope Thermal Generator*) e o SRG (*Stirling Radioisotope Generator*). A maior vantagem do GPHS RTG é produzir energia elétrica através de termopares, portanto não possui partes móveis, e a desvantagem é possuir baixo rendimento, como mostra o trabalho de Duarte e Carlson (2005). A eficiência do GPHS RTG é no intervalo de 7-8%, pode-se utilizar células termovoltáicas, converte infravermelho em eletricidade, junto aos termopares para aumentar essa eficiência em torno de 10%. A vantagem do SRG é seu rendimento entre 24-25%, mas sua desvantagem é a dependência de partes móveis. A NASA está projetando um ASRG (*Advanced Stirling Radioisotope Generator*) com mesmo rendimento do seu predecessor, mas com uma potência cinco vezes maior. A NASA implantou em 2012 microgeradores termoelétricos no robô *curiosity*.

Scherrer *et al* (2003) estudou GTEs feitos com o material *skutterudite* para uso em missões espaciais e aplicações com concentração solar. *Skutterudite* é um novo tipo de material termoelétrico cuja formulação é AB_3 , onde A seria cobalto, níquel ou ferro e B seria fósforo, antimônio ou arsênio.

A grande preocupação com RTG é a contaminação radioativa do ambiente, sendo por falha no isolamento ou acidente dos programas espaciais que levam a dispersão de material radioativo na atmosfera. Na Rússia houve um caso do roubo do material de isolamento e outro caso que civis acharam um RTG com vazamento e tiveram queimaduras devido a radiação. Um satélite americano falhou o lançamento e queimou na reentrada, foi detectado traços de plutônio-238 na atmosfera.

O RTG ganha dos painéis fotovoltaicos e outros tipos de geradores cujo combustível não é radioativo. Os painéis fotovoltaicos não geram constantemente, portanto

seria necessário um sistema de armazenagem de energia que geraria mais peso. Outro tipo de gerador seria necessário carregar combustível suficiente para a duração da missão e isso causa um acréscimo de peso que torna inviável financeiramente.

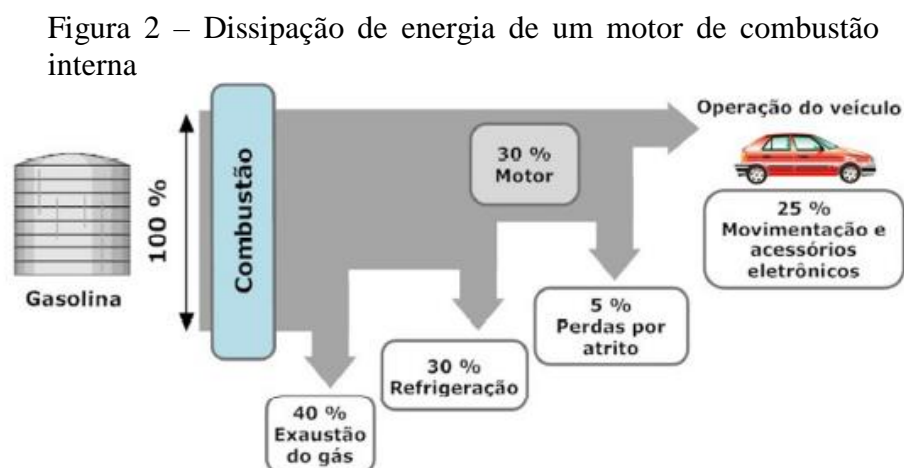
De acordo com Farias (2009), a necessidade do uso de um gerador termoeletrico em missões espaciais trouxe o avanço tecnológico necessário para tornar viável a aplicação deles no nível comercial.

2.4 Geradores Termoeletricos Automobilísticos

O Gerador termoeletrico automobilístico (ATEG – *Automotive thermoelectric generator*) é um gerador elétrico que utiliza módulos termoeletricos para transformar o resíduo de calor dos motores de combustão interna, do calor gerado pelo atrito, em energia elétrica através do efeito Seebeck. Os módulos termoeletricos também são de grande aplicação no sistema de aquecimento, refrigeração e ventilação do veículo, podendo ser aplicado no aquecimento dos bancos, refrigeração do ar interno ao veículo e na refrigeração do suporte de copos.

Neild *et al* (1963) construiu o primeiro ATEG em 1963. Birkholz *et al* (1988) trabalhando juntamente com a empresa Porsche publicou em 1988 um ATEG de exaustão, utilizando fibra de carbono no lado quente e alumínio no lado frio, capaz de produzir dezenas de watts.

De acordo com Pereira (2014) no motor de combustão interna 70% da energia do combustível são perdas associadas a dissipação de calor, sendo 30% via radiador e o restante nos gases de escapamento. As perdas do motor de combustão interna são vistas na figura 2.



Fonte: Pereira (2014)

Karri *et al* (2011) obteve que para o motor há economia de potência e combustível de 2% através do uso de módulo termoeletrônicos comerciais de Telureto de Bismuto. A BMW no final de 2008 iniciou um projeto de ATEG, cujo material termoeletrico possui valor de figura de mérito próximo de 1 e com 12% de eficiência, com o intuito de substituir o alternador e com isso aumentar a eficiência do combustível em até 10%.

De acordo com Farias 2009, Yang (2007) apresentou módulos termoeletricos onde os gases de exaustão e o circuito de arrefecimento eram a fonte de calor. Nos estudos o módulo era capaz de aliviar a carga nos alternadores e reduzir o consumo de combustível em até 10%. Hsiao *et al* (2010) provou que os gases de exaustão como fonte de calor produziam mais energia que o sistema de arrefecimento.

O grande benefício de ATEG é utilizar o calor dos gases de exaustão para reduzir a utilização do alternador e com isso diminuir o consumo de combustível, o que diminui a emissão de dióxido de carbono.

Seu baixo rendimento, em torno de 5 %, não é uma grande desvantagem, pois essa energia seria descartada, mas é necessário estudar o custo-benefício devido a necessidade de investimento para instalação do ATEG.

2.5 Outras Pesquisas na área de geradores termoeletricos

Rockendorf *et al* (2000) estudou utilização de GTE onde a fonte de calor eram tubos com água quente, sistema de cogeração solar. Zhang *et al* (2005) estudou sistemas híbridos GTE e painéis fotovoltaicos. Niu *et al* (2009) fez um estudo de módulos termoeletricos e como a variação da temperatura dos elementos do módulo, durante a operação, afeta a eficiência. Rodríguez *et al* (2009) fez uma modelagem computacional de geradores termoeletricos que simulava o comportamento em função da temperatura. Farias (2009) estudou geradores termoeletricos aproveitando a queima de GLP como fonte de calor. Ismail *et al.* (2009) estudou GTEs com fonte de calor a incineração de resíduos sólidos. Gou *et al* (2010) estudou GTE a baixa temperatura. Lavric (2010) fez um modelo computacional que simulava o comportamento de um gerador termoeletrico levando em conta o material e as características do módulo. Jang *et al* (2011) utilizou modelos tridimensionais para estudar o comportamento de módulos termoeletricos durante funcionamento. Huang *et al* (2011) discutiu a diferença entre o coeficiente de Seebeck medido e o teórico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica primeiramente apresenta o conhecimento para o melhor entendimento do fenômeno termoelétrico para em seguida apresentar módulo termoelétrico e sua modelagem matemática.

3.1 Leis da termodinâmica

Termodinâmica de acordo com Atkins (2006) é o estudo das relações entre trabalho, energia térmica e calor através da observação da pressão, do volume e da temperatura, que são variáveis mensuráveis.

3.1.1 1ª Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica, descoberta por Rudolf Clausius em 1850, é conhecida como o princípio da conservação de energia, a soma da energia mecânica e da energia térmica de um sistema isolado é constante. Abreu (2003) disse que a energia total de um sistema é função do estado e independente do caminho percorrido pelo sistema para alcançar tal estado. A variação de energia interna é igual a troca de calor e trabalho do sistema como o ambiente ou do sistema com outro sistema, de acordo com Goupil *et al* (2011) essa definição é representada matematicamente na equação 1.

$$\Delta U = Q + W \quad (1)$$

Onde:

ΔU = variação da energia interna pela mudança de estado;

Q = quantidade de calor que o sistema recebe, quando positivo, ou cede, quando negativo;

W = trabalho realizado pelo sistema, quando negativo é o trabalho realizado sobre o sistema.

3.1.2 2ª Lei da Termodinâmica

A segunda lei da termodinâmica enunciada por Kelvin e Planck diz que não existe um dispositivo que trabalhe em um ciclo termodinâmico capaz de transformar todo o calor

absorvido de uma fonte, a temperatura constante, em trabalho. A segunda lei define que é impossível uma máquina apenas tomar calor de um sistema e produzir trabalho, alguma energia é perdida no processo, isso se dá pelo princípio da irreversibilidade. O princípio da irreversibilidade é causado pelo atrito mecânico, pelo efeito Joule e outros processos que causam dissipação de energia.

De acordo com Goulpi *et al* (2011), a equação 2 mostra o rendimento térmico.

$$\eta_T = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (2)$$

Onde:

η_T = rendimento térmico;

Q_L = calor de saída;

Q_H = calor de entrada.

Pelo processo da irreversibilidade é impossível uma máquina térmica com rendimento de 100%, pois isso ocorreria apenas quando $Q_L = 0$, apenas uma fonte de calor, ou quando Q_H igual à infinito. Uma máquina térmica recebe calor, parte desse calor é dissipado e o restante é convertido para gerar trabalho.

3.1.3 3ª Lei da Termodinâmica

A terceira lei da termodinâmica, feita por Walther Nernst, define que um sistema quando chega a temperatura do zero absoluto, temperatura igual a 0 K, tem sua entropia igual a zero e todos os processos cessam. De acordo com Goulpi *et al* (2011), a terceira lei é descrita pela equação 3.

$$\lim_{T \rightarrow 0} \Delta S = 0 \quad (3)$$

Onde:

ΔS = variação de entropia;

T = temperatura.

O gerador termoelétrico não possui fluido de trabalho onde ocorre mudança de estado. Ocorrem apenas troca de calor entre a fonte de calor e o metal da junção de calor e entre o metal da junção frio com o meio dissipador. O trabalho é na forma de energia elétrica.

3.2 Calor

Calor é a quantidade de energia térmica transferida entre sistemas por causa de uma diferença de temperatura entre eles. Calor flui de um corpo de maior temperatura, denominado de fonte quente, para um corpo em menor temperatura, denominado de fonte fria ou de receptor. O calor é um fenômeno transitório e não se pode falar que um corpo possui calor, pois calor não é uma propriedade de sistemas termodinâmicos e sim um estado de transferência de energia térmica que ocorre somente na presença da diferença de temperatura. O calor é apenas uma parcela da transferência de energia interna de um sistema, como é visto na equação 1. A equação 4 é a equação fundamental da calorimetria, define a energia necessária para um corpo variar da temperatura inicial, T_0 , até uma temperatura final, T_f .

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4)$$

Onde:

Q = calor [kJ];

m = massa [kg];

c = calor específico [kJ/KgK];

ΔT = variação temperatura [K].

A quantidade de energia necessária para que uma 1 g de uma substância sofra variação térmica de 1 °C é definida como o calor específico dessa substância. O calor específico é expresso normalmente por cal/g.°C.

Os três modos de transmissão de calor são a convecção, a condução e a radiação. As transmissões de calor não são de modo isolados, quase sempre ocorrem combinações dos modos.

3.2.1 Transferência de calor por convecção

A transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície estando eles a diferentes temperaturas. A transferência de calor ocorre devido ao movimento do fluido e ao movimento molecular. A convecção pode ser classificada como livre, forçada ou mista, dependendo das características do movimento do fluido. De acordo com Incropera *et al* (2008), o fluxo de calor da convecção térmica é definido pela equação 5 e é independente do tipo da convecção.

$$\phi = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

Onde:

ϕ = fluxo de calor por convecção [W];

A = área de transferência de calor [m²];

h = coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K];

ΔT = variação de temperatura [K].

A transferência de calor por convecção ocorre somente em fluidos (líquidos e gases). A transferência de energia é do mais quente para o mais frio.

3.2.2 Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução ocorre entre substâncias em contato físico direto ou dentro da substância, podendo ser líquida, sólida ou gasosa. O material de maior temperatura possui moléculas com mais energia cinética, movimento com maior amplitude em torno do ponto de equilíbrio, e essas moléculas se chocam com as moléculas do material mais frio sendo transferida energia pelo choque. De acordo com Incropera *et al* (2008), o fluxo de calor da condução térmica é definido pela equação 6 e é diretamente proporcional a condutividade térmica, k_T . A condutividade térmica é a potência térmica por metro devido a uma diferença de temperatura de 1 K. O sinal negativo da equação 6 é devido a referência adotada, o aumento da distância deve ser no mesmo sentido do fluxo de calor positivo.

$$\phi = - \frac{k_T \cdot A \cdot \Delta T}{\Delta L} \quad (6)$$

Onde:

ϕ = fluxo de calor por condução [W];

k_T = condutividade térmica [W/m.K];

A = área da seção transversal [m²];

ΔT = variação de temperatura [K];

ΔL = comprimento do trajeto do calor [m].

A transferência de calor por condução ocorre prioritariamente em meios sólidos como metais e madeira. A transferência de energia é do mais quente para o mais frio.

3.2.3 *Transferência de calor por radiação*

A transferência de calor por radiação é feita por ondas eletromagnéticas. A maior eficiência ocorre no vácuo, o calor proveniente do Sol é transmitido através da radiação térmica. De acordo com Incropera *et al* (2008) a equação 7 define o fluxo de transferência de calor por radiação, sendo dependente da emissividade (ϵ). A emissividade é uma propriedade radiativa da superfície. A constante de Stefan-Boltzmann define que a energia irradiada por m² por um corpo negro em 1 (hum) segundo é proporcional a quarta potência da temperatura, sendo igual a $5,67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴.

$$\phi = -\epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{sup}^4 - T_{viz}^4) \quad (7)$$

Onde:

ϕ = fluxo de calor por irradiação [W];

ϵ = emissividade;

A = área da seção transversal [m²];

σ = constante de Stefan-Boltzmann [W/m²K⁴];

T_{sup} = temperatura da superfície [K];

T_{viz} = temperatura da vizinhança [K].

A transferência de calor por radiação ocorre entre superfícies separadas no espaço, não há necessidade de meio material.

3.3 Condução elétrica em sólidos

A resistência elétrica é a capacidade de se opor a passagem de corrente elétrica e é diretamente proporcional a resistividade elétrica do condutor. A resistência de um condutor é dada pela segunda lei de Ohm e pode ser vista na equação 8.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (8)$$

Onde:

R = resistência elétrica do condutor [Ω];

ρ = resistividade elétrica do condutor [$\Omega \cdot m$];

L = comprimento do condutor [m];

A = área da seção do condutor [m^2].

A resistividade elétrica é inerente do material. O comprimento e área podem ser modificados pela manipulação física da forma, mas para modificar a resistividade é necessária a troca do material. Condutores são elementos de baixa resistividade elétrica e por isso permitem o fluxo elétrico com oposição mínima. Isolantes são materiais com resistividade elétrica alta e por isso apresentam grande oposição ao fluxo elétrico. A tabela 3 apresenta a resistividade elétrica de alguns materiais.

Tabela 3 – Resistividade elétrica de alguns materiais

Material	Tipo	Resistividade, ρ [$\Omega \cdot m$]
Cobre	Condutor Metálico	$1,67 \times 10^{-8}$
Alumínio	Condutor Metálico	$2,65 \times 10^{-8}$
Germânio	Semicondutor	$(1 - 500)10^{-3}$
Silício	Semicondutor	0,1 – 60
Vidro	Isolante	$10^9 - 10^{12}$

Tabela 3 – Resistividade elétrica de alguns materiais (Continuação)

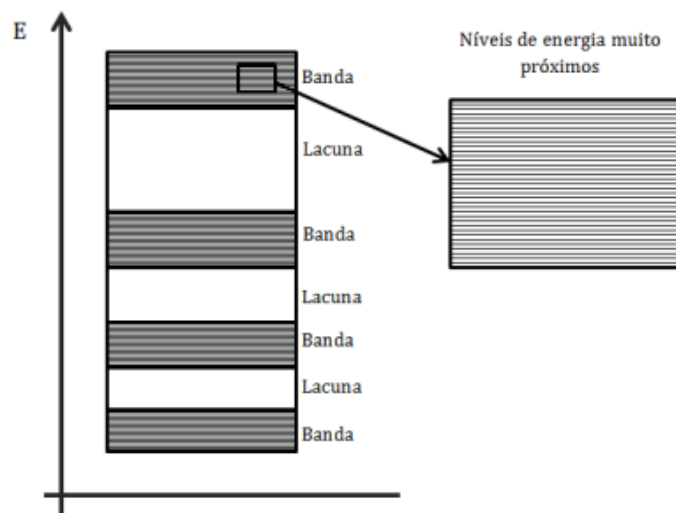
Material	Tipo	Resistividade, ρ [$\Omega.m$]
Borracha	Isolante	$10^{13} - 10^{15}$

Fonte: adaptado do Instituto Newton C. Braga (2016)

Existem duas categorias de materiais que são bons condutores elétricos: condutores metálicos, como o cobre e o alumínio, e os semicondutores, como o silício e o germânio. Observando a tabela 3, pode se constatar que um semicondutor possui uma resistividade elétrica consideravelmente maior do que um condutor metálico e por isso menor condutibilidade elétrica.

Na estrutura atômica há níveis de energia discretos associados a cada elétron em órbita. Os elétrons ocupam esses vários níveis em ordem crescente de energia e cada nível é ocupado por um único elétron, seguindo o princípio de exclusão de Pauli. Como ilustrado na figura 3, o agrupamento das faixas de energia que os elétrons podem ocupar é chamada de banda e entre as bandas existem as lacunas (gaps), nas quais nenhum elétron pode aparecer.

Figura 3 – Representação das bandas e lacunas para os níveis de energia atômico



Fonte: Oliveira (2014)

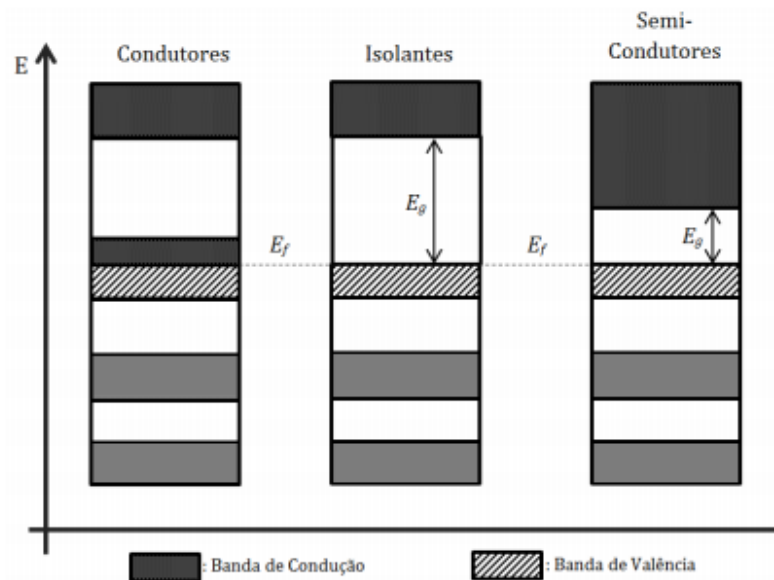
As bandas possuem vários níveis de energia muito próximos. Os elétrons se agrupam nas bandas, que são separadas pelos gaps. Os elétrons de valência ocupam a camada

mais externa dos níveis de energia, quanto mais distante do núcleo maior será a energia do elétron, por isso a banda de maior energia é chamada de banda de valência.

Boylestad (2004) define que a energia associada a cada elétron é medida em elétron-volts e temos que a relação de elétrons-volt para joule é: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Na figura 4 a banda de valência e a banda de condução estão evidenciadas. A energia necessária para os elétrons sair da banda de valência, atravessar o gap e entrar na banda de condução é igual a E_g .

Figura 4 – Níveis de energia em um isolante, semicondutor e condutor



Fonte: Oliveira (2014)

Na banda de valência dos condutores metálicos existem níveis de energia vazios, por isso ocorre a sobreposição das bandas de valência e de condução. Como existem níveis de energia vazios os elétrons de valência fluem livremente através dos condutores metálicos, tornando-se elétrons de condução.

Nos isolantes a energia de Fermi (E_f) é igual a máxima energia da banda de valência, por isso não existem níveis de energia vazios na banda de valência. A banda de condução e a banda de valência estão separadas por um gap. A energia, E_g , necessária para o elétron de valência vencer o gap e se tornar um elétron de condução é maior que 5 eV, de acordo com Boylestad (2004). O alto valor de E_g é um dos motivos da grande oposição ao fluxo de corrente elétrica apresentado por matérias isolantes.

Nos semicondutores a energia de Fermi (E_f) é igual a máxima energia da banda de valência, não existem níveis de energia vazio na banda de valência. A energia, E_g , necessária para o elétron de valência vencer o gap e passar a ser elétron de condução é significativamente menor que nos materiais isolantes. Alguns exemplos de E_g citados por Boylestad (2004) são: no silício E_g é igual a 1,1 eV, no Germânio E_g é igual a 0,67 eV e no arseneto de gálio E_g é igual a 1,41 eV. Um dos motivos da resistividade dos materiais semicondutores ser significativamente menor que as dos materiais isolantes é a diferença de E_g entre os materiais.

Nos materiais semicondutores a agitação térmica faz com que alguns elétrons de valência do silício e do germânio quebrem sua ligação covalente e passem para banda de condução, isso deixa uma lacuna na ligação covalente que liberou o elétron. Essas lacunas causam uma maior liberdade na movimentação de elétrons, por isso as lacunas e os elétrons são considerados portadores de carga.

3.3.1 Dopagem de materiais semicondutores

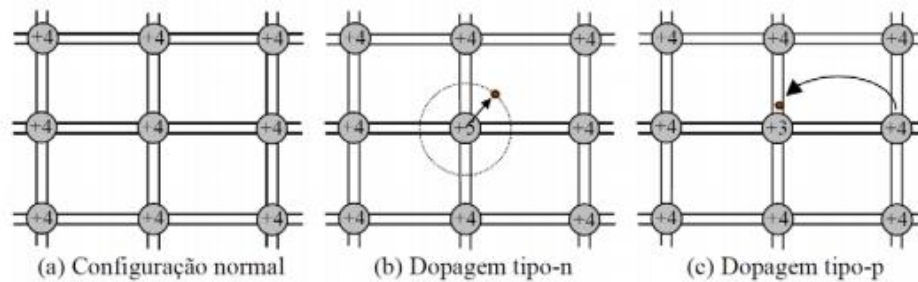
O processo de mudança das propriedades de materiais semicondutores pela adição de impurezas é chamado de dopagem. De acordo com Boylestad (2004) a adição de impurezas na razão de uma parte em 10 milhões é o suficiente para uma variação completa das propriedades do material semiconductor. Um material semiconductor que sofreu o processo de dopagem é denominado de material extrínseco, materiais extrínsecos podem ser do tipo-n ou do tipo-p.

3.3.1.1 Semicondutores do tipo-n

Semicondutores do tipo-n são formados pela adição de elementos de impureza que possuem 5 elétrons de valência em uma base de silício ou germânio. Os elementos de impureza são chamados de átomos doadores, alguns exemplos são: fósforo, arsênio e antimônio.

O átomo doador entra na estrutura cristalina e quatro de seus elétrons de valência realizam ligações covalentes a outros elementos da estrutura cristalina, mas o quinto elétron de valência está fracamente ligado a impureza, como pode ser observado na figura 5 - item b.

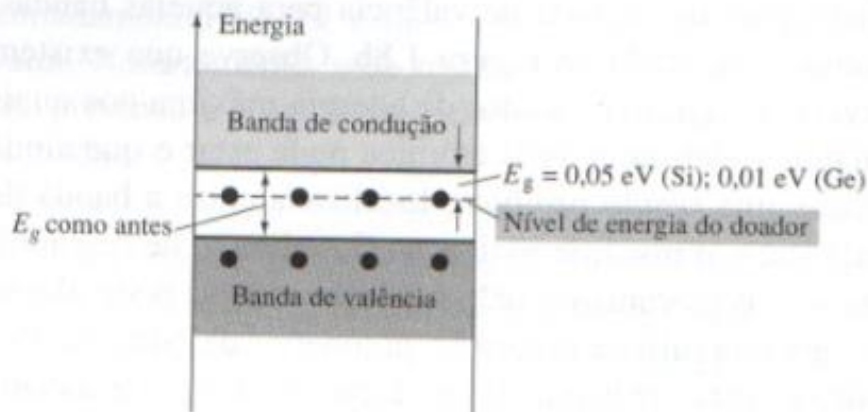
Figura 5 – Representação de uma base de silício: normal, dopagem tipo-n e dopagem tipo-p



Fonte: Oliveira (2014)

Pode se dizer que o quinto elétron está relativamente livre, pois ele se encontra fracamente ligado a impureza. O motivo da impureza ser chamada de doador é que seu elétron “livre” passa para banda de condução mais facilmente. O motivo disso ocorrer pode ser visto facilmente na figura 6, o nível de energia dos elétrons de valência do átomo doador é maior que o nível de energia dos elétrons de valência do silício ou germânio, por isso a energia necessária para os elétrons “livres” vencer o gap é significativamente menor.

Figura 6 – Efeitos das impurezas doadoras na estrutura da banda de energia



Fonte: Boylestad (2004)

Nos semicondutores tipo-n o elétron é o portador majoritário e a lacuna é o portador minoritário.

3.3.1.2 Semicondutores do tipo-p

Semicondutores do tipo-p são formado pela adição de elementos de impureza que possuem 3 elétrons de valência em uma base de silício ou germânio. Os elementos de impureza

são chamados de átomos aceitadores, alguns exemplos são: boro, gálio e índio.

O átomo aceitador não possui número suficiente de elétrons para realizar as quatro ligações covalentes da rede cristalina, como pode ser observado na figura 5 - item c. A ligação incompleta é a lacuna criada pela dopagem. A lacuna facilita a movimentação dos elétrons e por isso a banda de condução se aproxima da banda de valência diminuindo o gap e diminuindo a energia necessária para vencer o gap.

Nos semicondutores tipo-p a lacuna é o portador majoritário e o elétron é o portador minoritário.

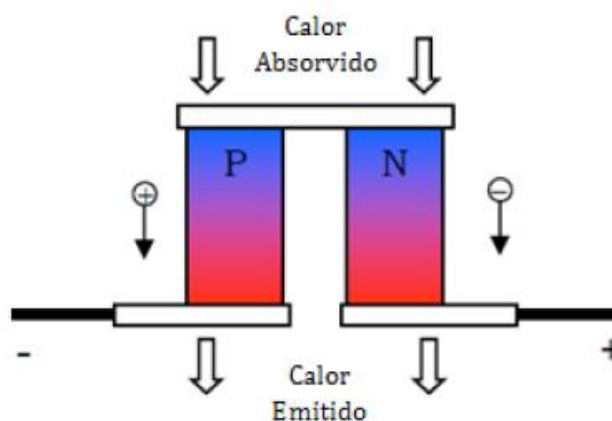
3.4 Efeitos termoeletricos

O efeito termoeletrico é a conversão de energia térmica em energia elétrica e vice-versa. Os efeitos termoeletricos de grande interesse são: o efeito Peltier, o efeito Seebeck e o efeito Thomson.

Os efeitos termoeletricos podem ser estudados através de um termopar, o esquema básico de um termopar é mostrado na figura 7. As medições são feitas nas junções para evitar erros devido às leis das temperaturas intermediárias e sucessivas.

Para facilitar a explicação usamos semicondutores tipo-p e tipo-n como exemplo, mas todas as informações dadas são válidas para materiais condutores. Os materiais condutores de melhores características para aplicação em termoeletricidade são divididos em elementos termoeletricos positivos, onde os semicondutores tipo-p se enquadram, e elementos termoeletricos negativos, onde os semicondutores tipo-n se encaixam.

Figura 7 – Esquema básico de um termopar



Fonte: Oliveira (2014)

3.4.1 Efeito Joule

O efeito Joule, descoberto por James Prescott Joule em 1840, expressa a relação entre a geração de calor e a corrente elétrica que percorre um condutor. Os elétrons em movimento colidem com elementos do condutor, a energia da colisão aumenta a agitação e consequentemente aumenta a temperatura do condutor (WIKIPÉDIA – Lei de joule, 2016). A relação entre calor gerado e corrente elétrica é definida matematicamente pela equação 9.

$$Q = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \quad (9)$$

Onde:

Q = calor gerado [J];

R = resistência elétrica do condutor [Ω];

i = corrente elétrica [A];

t = tempo de duração da corrente elétrica [s].

De acordo com Nilsson e Riedel (2008), a equação 10 mostra a potência dissipada em um resistor elétrico pelo efeito Joule.

$$P = RI^2 \quad (10)$$

Onde:

P = potência [W];

R = resistência elétrica do condutor [Ω];

I = corrente elétrica [A].

O lado positivo do efeito Joule é sua aplicação em iluminação, soldagem, aquecimentos e outras áreas. O lado negativo em sistemas elétricos é que o efeito Joule em inúmeros casos significa perdas por calor.

3.4.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier foi descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834. O efeito Peltier é quando um gradiente de temperatura é criado nas junções de dois condutores, sendo eles diferentes, devido a presença de uma diferença de potencial elétrico nos condutores (SOUZA, 2004).

Os semicondutores estão ligados em série eletricamente e em paralelo termicamente, como visto no termopar da figura 7. A aplicação de uma tensão elétrica gera uma corrente elétrica. De acordo com Goulpi *et al* (2011) a equação 11 define a taxa de transferência de calor em função do fluxo de corrente elétrica. A taxa de transferência de calor é o calor absorvido em uma das junções dos semicondutores e o calor dissipado na outra junção dos semicondutores, a polaridade da tensão aplicada define se a junção absorve ou dissipa calor. No semicondutor tipo-n o lado próximo ao terminal negativo da tensão absorve calor e o lado próximo ao terminal positivo da tensão rejeita calor. No semicondutor tipo-p o lado próximo ao terminal positivo da tensão absorve calor e o lado próximo ao terminal negativo da tensão rejeita calor.

$$Q_p = -\pi \cdot I \quad (11)$$

Onde:

Q_p = taxa de transferência de calor pelo efeito Peltier [W];

π = coeficiente de Peltier do termopar [V];

I = corrente elétrica [A].

O coeficiente de Peltier representa o calor gerado ou absorvido por unidade de carga. O coeficiente de Peltier do termopar pode ser escrito em função dos coeficientes de Peltier dos materiais semicondutores tipo-p e tipo-n, como visto na equação 12, sendo que o do tipo-n é convencionalmente negativo.

$$\pi = \pi_p - \pi_n \quad (12)$$

Onde:

π = coeficiente de Peltier do termopar [V];

π_p = coeficiente de Peltier do semiconductor tipo-p [V];

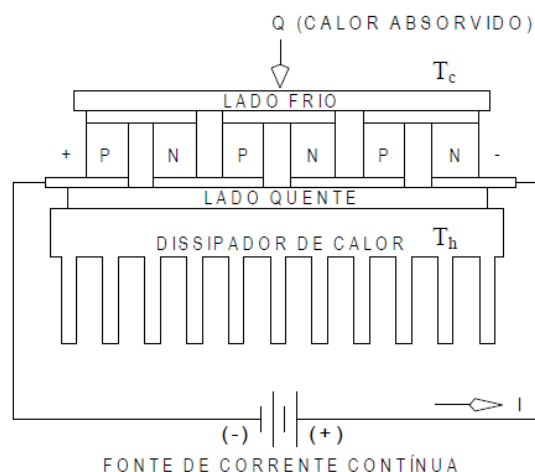
π_n = coeficiente de Peltier do semiconductor tipo-n [V].

Material com coeficiente de Peltier negativo dissipa calor na junção mais próxima do terminal positivo da tensão e absorve calor na junção mais próxima do terminal negativo da tensão. Material com coeficiente de Peltier positivo dissipa calor na junção mais próxima do terminal negativo da tensão e absorve calor na junção mais próxima do terminal positivo da tensão.

O calor total gerado no sistema não provém totalmente do efeito Peltier, uma parcela desse calor é devido ao efeito Joule.

A aplicação principal do efeito Peltier é a pastilha de Peltier, ilustrada pela figura 8, usada na área de refrigeração, como pequenas geladeiras para automóveis e refrigeração de componentes eletrônicos. Suas vantagens principais são a necessidade de pouco espaço e a troca de calor com o ambiente sem a necessidade de fluidos. O desempenho de uma pastilha de Peltier é avaliado pelo coeficiente de desempenho (COP – *Coefficient of Performace*), que é o quociente entre a taxa de remoção de calor do corpo frio pela potência consumida pela pastilha de Peltier.

Figura 8 – Pastilha de Peltier



Fonte: Wikipédia (2016)

A pastilha de Peltier usa duas chapas isolantes, onde uma absorve calor e a outra dissipa. Os materiais semicondutores são conectados por um material condutor, como o cobre. São utilizados vários pares de semicondutores para ampliar a magnitude da taxa de transferência de calor nas chapas isolantes. O uso do dissipador de calor é para garantir que a pastilha não

chegue ao equilíbrio térmico, pois se o lado quente é incapaz de dissipar calor ao ambiente esse calor será transferido para os componentes da pastilha, reduzindo sua eficiência e vida útil.

3.4.3 Efeito Seebeck

O efeito Seebeck foi descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821, sendo o reverso do efeito Peltier. O efeito Seebeck é quando uma diferença de potencial elétrico é criada entre dois condutores, sendo eles diferentes, devido à presença de uma diferença de temperatura entre as junções dos condutores (SOUZA, 2004).

De acordo com Goupil *et al* (2011) a diferença de potencial gerada pelo efeito Seebeck é dada pela equação 13. A polaridade da tensão depende de qual junção é a fonte de calor e qual é a fonte fria. No semicondutor tipo-n a corrente elétrica flui do lado frio para o lado quente. No semicondutor tipo-p a corrente elétrica flui do lado quente para o lado frio.

$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad (13)$$

Onde:

V = diferença de potencial elétrico pelo efeito Seebeck [V];

α = coeficiente de Seebeck do termopar [V/K];

ΔT = Diferença de temperatura das junções [K].

O coeficiente de Seebeck é a tensão gerada por unidade da diferença de temperatura, ele depende principalmente da composição dos semicondutores. O coeficiente de Seebeck do termopar pode ser escrito em função dos coeficientes de Seebeck dos materiais semicondutores tipo-p e tipo-n, como visto na equação 14, sendo que o do tipo-n é convencionalmente negativo.

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (14)$$

Onde:

α = coeficiente de Seebeck do termopar [V/K];

α_p = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-p [V/K];

α_n = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-n [V/K].

A tabela 4 mostra alguns materiais e seus coeficientes de Seebeck em temperatura ambiente. Gonçalves (2008) diz que para materiais com coeficiente de Seebeck negativo, semicondutores do tipo-n, os elétrons da região quente se tornam mais energéticos e se deslocam para região fria. A zona quente fica carregada de íons e a zona fria carregada de elétrons.

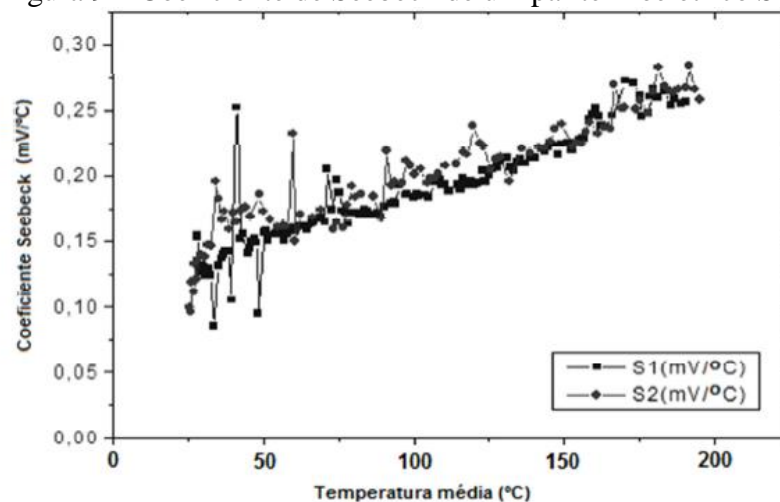
Tabela 4 – Coeficientes de Seebeck de alguns materiais

Material	Coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]
Germânio	330
Alumínio	3,5
Constantan	-35
Bismuto	-72

Fonte: Instituto Newton C. Braga (2016)

Couto e Alves (2009) estudaram a variação do coeficiente de Seebeck em um par termoeétrico de Silício e Germânio pelo aumento da temperatura. Pelo seu estudo observaram que o coeficiente de Seebeck aumenta com a temperatura, como observado na figura 9.

Figura 9 – Coeficiente de Seebeck de um par termoeétrico Si-Ge



Fonte: Couto e Alves (2009)

O efeito Seebeck tem sido utilizado na construção de sensores de temperatura, onde é criada uma escala de temperatura para a tensão medida em um voltímetro, e em geradores termoeétricos.

3.4.4 Efeito Thomson

O efeito Thomson foi descoberto em 1855 por William Thomson, Lorde Kelvin. O efeito Thomson descreve a capacidade de um material que submetido a um gradiente de temperatura e a uma diferença de potencial pode emitir ou absorver uma quantidade extra de calor (SOUZA, 2004).

A primeira relação de Thomson, dada pela equação 15, define a relação do coeficiente de Peltier e do coeficiente de Seebeck.

$$\pi = \alpha \cdot T \quad (15)$$

Onde:

π = coeficiente de Peltier [V];

α = coeficiente de Seebeck [V/K];

T = temperatura absoluta do sistema [K].

A segunda relação de Thomson, dada pela equação 16, define a relação do coeficiente de Thomson e do coeficiente de Seebeck.

$$\mu = T \cdot \frac{d\alpha}{dT} \quad (16)$$

Onde:

μ = coeficiente de Thomson [V/K];

α = coeficiente de Seebeck [V/K];

T = temperatura absoluta do sistema [K].

De acordo com Goupil *et al* (2011) a equação 17 define a taxa de transferência de calor pelo efeito Thomson. A taxa de transferência de calor total é uma parcela devido ao efeito Thomson e uma parcela devido ao efeito Joule.

$$Q_T = \mu \cdot I \cdot \Delta T \quad (17)$$

Onde:

Q_T = taxa de transferência de calor pelo efeito Thomson [W];

μ = coeficiente de Thomson [V/K];

I = corrente elétrica [A];

ΔT = diferença de temperatura [K].

O coeficiente de Thomson é positivo quando a corrente elétrica flui do material frio para o material quente e o condutor absorve calor.

O efeito positivo de Thomson é quando a corrente elétrica flui do terminal quente, potencial elétrico maior, para terminal frio, potencial elétrico menor, causando rejeição de calor. O efeito negativo de Thomson é quando a corrente elétrica flui do terminal frio, potencial elétrico maior, para o terminal quente, potencial elétrico menor, causando a absorção de calor.

3.5 Dissipador térmico

A necessidade de refrigeração de equipamento eletrônicos se tornava cada vez mais importante, pois a temperatura é uma barreira para o aumento de potência dos equipamentos projetados. O dissipador térmico surgiu para suprir essa necessidade. Há outros modos de refrigeração, mas o dissipador de calor é o mais comumente utilizado.

O dissipador térmico absorve calor do equipamento por condução e transferi para o ambiente externo por convecção, onde o fluido é normalmente o ar. O dissipador térmico é construído em formatos que possuem maior área em contato com ambiente externo para dissipação de calor por convecção térmica, a utilização de aletas para aumentar a área pode ser vista na figura 10. A utilização de fluido líquido ou de ventilação forçada aumenta a transferência de calor, aumentando a eficiência do dissipador térmico.

Figura 10 – Dissipador Térmico



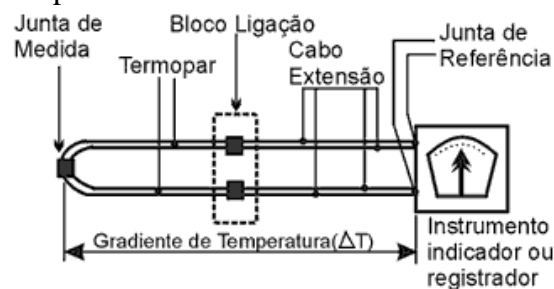
Fonte: Instituto Newton C. Braga (2016)

Equipamentos elétricos possuem faixas de temperatura definidas pelo próprio fabricante, trabalhar dentro dessa faixa de temperatura garantem a integridade física do equipamento e que o funcionamento do equipamento não sofra alterações. Há necessidade de escolher o material com a forma que ocupe um menor espaço e um menor peso e garanta uma dissipação de calor suficiente para manter a temperatura nas faixas limites.

3.6 Termopar

O termopar é formado de dois materiais condutores distintos que estão ligados em suas extremidades, a figura 11 mostra um termopar usado como sensor de temperatura. A necessidade de dois materiais condutores diferentes para formar um termopar é devida a lei dos metais homogêneos. A lei dos metais homogêneos diz que uma corrente termoelétrica não pode ser mantida em um condutor homogêneo apenas pela aplicação de calor.

Figura 11 – Esquemático de um Termopar funcionando como sensor de temperatura



Fonte: Site termopares (2016)

Termopares são comumente utilizados em módulos termoelétricos e como sensores de temperatura. O termopar funciona como sensor de temperatura pois o efeito Seebeck produz uma diferença de potencial que depende apenas dos materiais condutores utilizados e da diferença de temperatura nas junções. Quando se sabe os materiais condutores utilizados e a temperatura em uma das junções, chamada de junção de referência, a tensão passa a ser função apenas da temperatura desconhecida. Medindo a tensão pode-se inferir a temperatura desconhecida.

A lei dos metais intermediários diz que “a soma algébrica das forças eletromotrizes térmicas em um circuito formado de qualquer número de condutores diferentes é igual a zero se todo o circuito estiver em uma temperatura uniforme”. Caso um termopar esteja com suas

junções à mesma temperatura a tensão gerada será zero. A força eletromotriz não sofre variação pela adição de um material homogêneo, desde que as extremidades desse material estejam à mesma temperatura.

Um exemplo prático da aplicação da lei dos metais intermediários é a construção do próprio termopar, pois a solda da junção não afeta a medição. A aplicação de um voltímetro, onde suas junções estão à mesma temperatura, pode ser utilizado sem influenciar os dados medidos.

Termopares comerciais são separados em diferentes categoriais que levam em conta a construção física do termopar e os diferentes materiais condutores utilizados. A tabela 5 estabelece as categorias dos termopares com suas construções e faixas de temperatura e tensão. A tabela 6 apresenta as vantagens e desvantagens das categorias.

Tabela 5 – Categorias de termopares com seus elementos, faixa de tensão e faixa de temperatura

Categoria	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temperatura [°C]	Faixa de tensão [mV]
T	Cobre	Constantan	-270 a 400	-6,26 a 20,87
J	Ferro	Constantan	0 a 760	-8,1 a 42,92
E	Cromel	Constantan	-250 a 870	-9,84 a 76,37
K	Cromel	Alumel	-270 a 1260	-6,46 a 48,84
S	Pt/Rh10%	Platina	-50 a 1768	-0,24 a 18,69
R	Pt/Rh13%	Platina	-50 a 1768	-0,23 a 21,1
B	Pt/Rh30%	Pt/Rh6%	300 a 1820	0 a 13,82
N	Nicrosil	Nisil	-270 a 1300	-

Fonte: Adaptado de Maxwell, Wikipédia e o site termopares

Tabela 6 – Categorias de termopares com suas vantagens e desvantagens

Categoria	Vantagens	Desvantagens
T	<ul style="list-style-type: none"> - Resiste a atmosfera corrosiva; - Sua estabilidade o torna útil em temperaturas abaixo de 0°C; - Apresenta boa precisão na faixa de utilização. 	<ul style="list-style-type: none"> - Oxidação do cobre acima de 310°C.
E	<ul style="list-style-type: none"> - Alta potência termoeletrica; - Os elementos são altamente resistentes à corrosão; - Adequado para baixas temperaturas pela alta sensibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa estabilidade em atmosfera redutora; - Está sujeito as mesmas limitações do tipo K em atmosfera redutora.

Tabela 6 – Categorias de termopares com suas vantagens e desvantagens (Continuação)

Categoria	Vantagens	Desvantagens
J	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo; - Indicado para serviço contínuo até 760°C em atmosfera neutra ou redutora. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C; - Utilizar tubo de proteção acima de 480°C; - Pior que o tipo T em temperaturas abaixo de 0°C devido a possibilidade de oxidação do ferro.
K	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo; - Indicado para atmosfera oxidante; - Para faixa de temperatura mais elevada fornece rigidez mecânica melhor que tipos S e R e vida mais longa do que o tipo J. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e que promovem a deterioração esverdeada. Requerendo substancial proteção quando utilizado nessas condições; - Não opera no vácuo, exceto por curto período de tempo.
S e R	<ul style="list-style-type: none"> - Indicado para atmosferas oxidantes; - Apresenta boa precisão a altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes; - Para altas temperaturas utilizar isoladores e tubos de proteção.
B	<ul style="list-style-type: none"> - Melhor estabilidade e mais adequado para altas temperaturas do que os tipos S e R; - Melhor resistência mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes; - Utilizar isoladores e tubos de proteção.
N	<ul style="list-style-type: none"> - Suporta altas temperaturas e não utiliza platina em sua composição, criado para ser uma evolução do tipo K - Elevada estabilidade e resistência a altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor potência termoeétrica em relação ao tipo K.

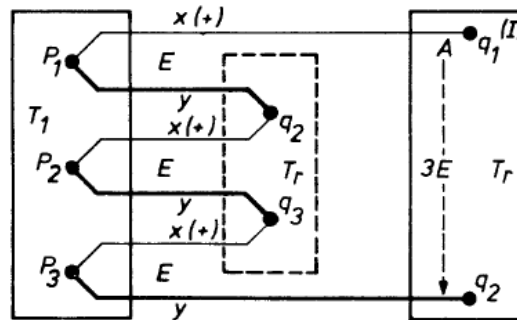
Fonte: Adaptado de Maxwell e wikipédia

Os termopares formados de platina são chamados de termopares nobres e os outros são chamados de termopares básicos.

A lei das temperaturas sucessivas diz que se um termopar gera uma tensão E_1 quando suas junções estão a uma temperatura T_1 e T_2 e uma tensão E_2 quando suas junções estão a uma temperatura T_2 e T_3 , então quando as junções estiverem uma temperatura T_1 e T_3 a tensão gerada será $E_1 + E_2$. Isso permite compensar mudança de temperatura da junção de referência.

A associação de termopares em série, como ilustrado na figura 12, é chamada de termopilha. A força eletromotriz gerada pela associação em série é igual à soma das forças eletromotrizes individuais dos termopares. Na figura 12 cada termopar gera “E”, a ligação em série de três termopares passa a gerar “3E”. Módulos termoeletricos ligam termopares em série para aumentar a tensão gerada.

Figura 12 – Associação série de termopares



Fonte: Gómez (2006)

A força eletromotriz gerada por ligação de termopares em paralelo é igual a média aritmética das forças eletromotrizes individuais de cada termopar.

3.7 Figura de mérito

A figura de mérito representa a performance de um dispositivo, sistema ou método. A figura de mérito Z , introduzida por Altenkirch em 1911, é utilizada na análise de desempenho dos materiais termoelétricos. De acordo com Bobean (2013) a figura de mérito Z depende das propriedades do material termoelétrico, como mostrado na equação 18. A figura de mérito Z não é constante com a temperatura

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} \quad (18)$$

Onde:

Z = figura de mérito [1/K];

ρ = resistividade elétrica [$\Omega \cdot m$];

α = coeficiente de Seebeck [V/K];

k = condutividade térmica [W/m.K].

Pela equação 18 quanto maior for a resistividade elétrica e a condutividade térmica do material termoelétrico menor é a figura de mérito Z , portanto pior o desempenho. Antunes

(2011) diz que essa queda de desempenho é devido ao aumento do aquecimento pelo efeito Joule.

De acordo com Bobean (2013) quando a figura de mérito Z é multiplicada pela temperatura absoluta T é gerada o parâmetro figura de mérito Z_T , que é adimensional. Z_T determina a figura de mérito a uma determinada temperatura. A equação 18 é reescrita como mostrada na equação 19.

$$Z_T = Z \cdot T = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} T \quad (19)$$

Onde:

Z_T = figura de mérito a uma determinada temperatura;

Z = figura de mérito do material termoelétrico [1/K];

T = temperatura [K].

De acordo com Gonçalves (2008), a figura de mérito de um termopar formado pela junção do semicondutor tipo-n e do semicondutor tipo-p é dada pela equação 20.

$$Z_{pn} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{(k_p \cdot \rho_p)^{1/2} \cdot (k_n \cdot \rho_n)^{1/2}} \quad (20)$$

Onde:

Z_{pn} = figura de mérito do termopar [1/K];

ρ_p = resistividade elétrica do semicondutor tipo-p [$\Omega \cdot m$];

ρ_n = resistividade elétrica do semicondutor tipo-n [$\Omega \cdot m$];

α_p = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-p [V/K];

α_n = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-n [V/K];

k_p = condutividade térmica do semicondutor tipo-p [W/m.K];

k_n = condutividade térmica do semicondutor tipo-n [W/m.K].

De acordo com Gonçalves (2008), a figura de mérito de um dispositivo formado por N pares de junções do semicondutor tipo-n e do semicondutor tipo-p é dada pela equação 21.

$$Z_{dispositivo} = \frac{N^2(\alpha_p - \alpha_n)^2}{R_e \cdot K} \quad (21)$$

Onde:

$Z_{dispositivo}$ = figura de mérito do dispositivo [1/K];

N = número de termopares;

α_p = coeficiente de Seebeck do semiconductor tipo-p [V/K];

α_n = coeficiente de Seebeck do semiconductor tipo-n [V/K];

R_e = resistência elétrica equivalente do dispositivo;

K = condutância térmica equivalente do dispositivo.

A busca por materiais com maior figura de mérito é constante. Os materiais semicondutores foram uma grande descoberta na época, pois exibiam propriedades termoelétricas melhores, gerando uma figura de mérito Z melhor, que os materiais que estavam sendo utilizados na época. Os materiais compostos de telúrio, antimônio e bismuto são muito utilizados em dispositivos comerciais, pois possuem Z_T próximo do valor unitário à temperatura ambiente. A tabela 7 apresenta alguns materiais utilizados em módulos termoelétricos.

Tabela 7 – Propriedades termoelétricas de diferentes materiais

Material	Símbolo	Coeficiente de Seebeck [μVK^{-1}]	Resistividade elétrica [$\mu\Omega\text{m}$]	Condutividade térmica [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	Figura de mérito ZT (300K)
Níquel	Ni	-18	0,07	91	0,015
Cromo	Cr	18	0,13	94	0,008
Bismuto	Bi	-60	1,15	8,4	0,11
Antimônio	Sb	40	0,42	18,5	0,062
Telureto de Bismuto	Bi_2Te_3	-240	10	2,02	0,86
Telureto de Antimônio	Sb_2Te_3	92	3,23	1,63	0,48

Fonte: Antunes (2011)

De acordo com Bobean (2013), a liga Bi_2Te_3 é utilizada na faixa de temperatura 200-400 K, liga PbTe é utilizada na faixa de temperatura 600-800 K e ligas de Si e Ge são utilizadas na faixa de temperatura 800-1300 K. A utilização desses materiais nessas faixas de temperatura é devido ao alto valor de figura de mérito Z_T .

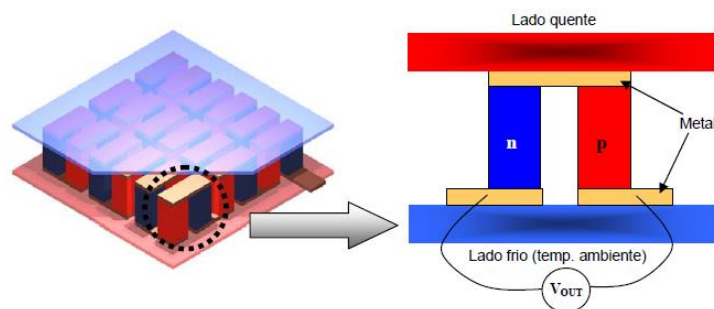
3.8 Módulos termoeétricos

O módulo termoeétrico é um dispositivo formado de vários termopares ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, como mostrado na figura 13.

O módulo termoeétrico, quando sofre a aplicação de um diferencial de potencial nos seus terminais, gera um fluxo de corrente elétrica, que faz com que seja absorvido calor em uma face e dissipado calor na outra face, isso é o efeito Peltier. Utilizado na área de refrigeração e aquecimento, suas vantagens são o tamanho pequeno, longa tempo de vida, fácil implementação e simples manutenção.

O módulo termoeétrico, quando submetido a uma diferença de temperatura nas suas faces, gera uma diferença de potencial nos seus terminais, isso é o efeito Seebeck. Essa aplicação de geração de energia elétrica faz com que o módulo passe a ser chamado de gerador termoeétrico. O módulo possui as mesmas vantagens da sua aplicação na área de refrigeração, mas as desvantagens são a baixa tensão, na faixa de milivolts, gerada por cada termopar, por isso a associação em série de vários termopares, e o baixo rendimento, em torno de 5%.

Figura 13 – Módulo termoeétrico

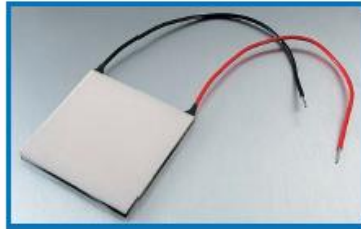


Fonte: Gonçalves (2008)

A figura 14 apresenta um módulo termoeétrico comercial. Um exemplo de construção do módulo termoeétrico é a utilização de material tipo-p e tipo-n de Bi_2Te_3 ligados

por junções condutoras formando os vários termopares, uma camada cerâmica constitui a face do módulo. A camada cerâmica é um bom condutor de calor e possui alta resistência elétrica.

Figura 14 – Módulo termoeletrico comercial



Fonte: Catálogo Kryothermec

3.9 Gerador termoeletrico

O gerador termoeletrico (GTE) é um módulo termoeletrico trabalhando para transformar energia térmica em energia elétrica, pelo efeito Seebeck. O GTE é formado por N pares de semicondutores do tipo-n e do tipo-p, ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, colocados entre dois substratos cerâmicos. Os semicondutores possuem efeito Joule menor e melhores características térmicas quando comparados aos condutores metálicos. Os substratos cerâmicos são bons condutores de calor e isolantes elétricos.

De acordo com Ismail e Ahmed (2009), a desvantagem de um GTE é a sua baixa eficiência de conversão, aproximadamente 5%, e as vantagens do GTE são: não possuem partes móveis, pouca manutenção, operam em altas temperaturas, longo tempo de vida útil e não produzem poluição. De acordo com Valente Souza (2004), a vida útil de um módulo termoeletrico é de 20 anos.

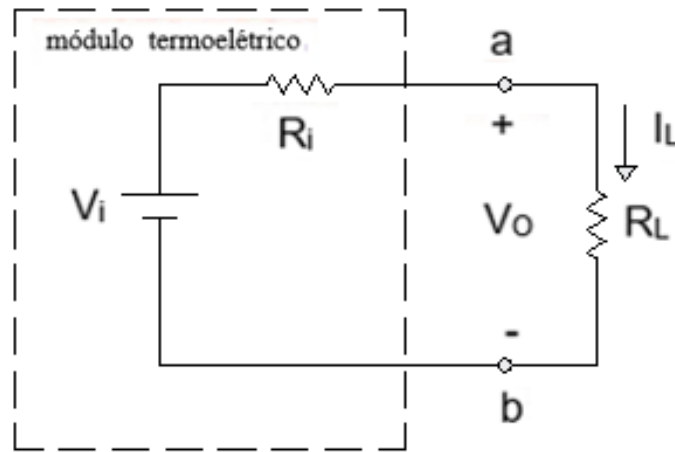
Para modelar o comportamento do gerador termoeletrico é necessário conhecer a fonte quente, a fonte fria e o módulo termoeletrico. A fonte quente e a fonte fria são responsáveis pelo fornecimento de energia térmica e manter a diferença da temperatura do módulo termoeletrico. O módulo termoeletrico é responsável pela transformação de energia térmica em energia elétrica.

3.9.1 Modelagem matemática do gerador termoeletrico

O módulo termoeletrico pode ser representado por um equivalente Thévenin, pois o interesse está no comportamento da tensão e corrente nos terminais a e b (SANTOS, 2010).

Na figura 15 temos a tensão gerada pelo módulo termoeétrico (V_i), a resistência interna do módulo termoeétrico (R_i), a tensão de saída (V_o), a corrente que percorre o circuito fechado (I_L) e a carga alimentada pelo módulo (R_L).

Figura 15 – Representação esquemática do módulo termoeétrico



Fonte: Elaborado pelo autor

No material semicondutor dos módulos há um fluxo de portadores majoritários do lado quente para o lado frio, semicondutor tipo-n há um fluxo de elétrons e semicondutor tipo-p um fluxo de “lacunas”, criando uma corrente elétrica ao se fechar o circuito. Esse comportamento é devido ao efeito Seebeck.

A tensão gerada pelo módulo termoeétrico (V_i)   em função da diferença de temperatura entre as junções, ao coeficiente de Seebeck do termopar e ao número de termopares ligados em série, como mostra a equação 22. A equação 22 é obtida pela combinação das equações 13 e 14.

$$V_i = N(\alpha_p - \alpha_n)(T_q - T_f) = \alpha(T_q - T_f) \quad (22)$$

Onde:

N = número de termopares associados em série;

α_p = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-p [$V/^ C$];

α_n = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-n [$V/^ C$];

α = coeficiente de Seebeck do módulo termoeétrico [$V/^ C$];

T_q = temperatura na junção do lado quente [$ C$];

T_f = temperatura na junção do lado frio [$ C$].

Na figura 15, enquanto uma carga (R_L) é conectada ao módulo flui uma corrente elétrica (I_L) pela carga. A equação 23 define a corrente pela Lei da tensão de Kirchhoff.

$$I_L = \frac{V_i}{(R_i + R_L)} = \frac{N(\alpha_p - \alpha_n)(T_q - T_f)}{(R_i + R_L)} \quad (23)$$

A tensão na carga, que é a tensão de saída do módulo (V_O), é definida pela equação 24, sendo I_L substituído pela equação 23.

$$V_O = V_i - I_L R_i = V_i - \frac{V_i R_i}{(R_i + R_L)} = V_i \left(\frac{R_L}{R_i + R_L} \right) \quad (24)$$

Substituindo V_i , dado pela equação 22, é obtido a equação 25.

$$V_O = N(\alpha_p - \alpha_n)(T_q - T_f) \left(\frac{R_L}{R_i + R_L} \right) \quad (25)$$

Onde:

R_L = resistência da carga [Ω];

R_i = resistência interna do módulo termoeletrico [Ω].

A potência da carga é dada pela equação 26. A tensão na carga é substituída pelo seu valor encontrado na equação 25.

$$P_L = \frac{(V_O)^2}{R_L} = N^2(\alpha_p - \alpha_n)^2 (T_q - T_f)^2 \left[\frac{R_L}{(R_i + R_L)^2} \right] \quad (26)$$

A potência máxima da carga ocorre quando a derivada da equação 26 em função da carga R_L a igual a zero, essa derivada é mostrada na equação 27.

$$\frac{dP_L}{dR_L} = \frac{V_i^2(R_i + R_L) - 2R_L V_i^2}{(R_i + R_L)^2} \quad (27)$$

A equação 27 é igual a zero quando a resistência da carga (R_L) é igual à resistência interna do módulo termoeletrico (R_i). Substituindo R_L na equação 26 é obtida a potência máxima da carga, dada pela equação 28.

$$P_{Máxima} = \frac{N^2(\alpha_p - \alpha_n)^2(T_q - T_f)^2}{4R_i} \quad (28)$$

Onde:

N = número de termopares associados em série;

α_p = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-p [$V/^\circ C$];

α_n = coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo-n [$V/^\circ C$];

T_q = temperatura na junção do lado quente [$^\circ C$];

T_f = temperatura na junção do lado frio [$^\circ C$];

R_i = resistência interna do módulo termoeletrico [Ω].

A resistência interna do módulo termoeletrico é a soma da resistência dos materiais semicondutores (R_p e R_n), da resistência das junções (R_j) e da resistência de contato (R_c), como mostra a equação 29.

$$R_i = N(R_n + R_p + 2R_j + 4R_c) \quad (29)$$

3.9.2 Rendimento do gerador termoeletrico

De acordo com Hsiao *et al* (2010), a condutância térmica (K) do módulo termoeletrico é igual a soma da condutância térmica dos N termopares e a condutância térmica dos termopares depende do comprimento (L), da área (A) e da condutividade térmica dos materiais (k). Como os semicondutores tipo-p e tipo-n tem o mesmo formato e a mesma condutividade térmica a condutância térmica passa a ser como escrita na equação 30.

$$K = k_n \frac{A_n}{L_n} + k_p \frac{A_p}{L_p} = 2 \frac{kA}{L} \quad (30)$$

Energia térmica é necessária para compensar as perdas pela condutividade térmica e pelo arrefecimento do efeito Peltier, essa energia é para manter a diferença de temperatura entre as duas junções. De acordo com Hsiao *et al* (2010), a energia térmica para compensação das perdas e manter o fluxo de corrente elétrica constante é dada pela taxa de transferência de calor fornecido (Q_q) e pela taxa de transferência de calor removido (Q_f). Elas podem ser calculadas pelas equações 31 e 32.

$$Q_q = \alpha I_L T_q + K(T_q - T_f) - \frac{1}{2} I_L^2 R_i \quad (31)$$

$$Q_f = \alpha I_L T_f + K(T_q - T_f) + \frac{1}{2} I_L^2 R_i \quad (32)$$

Onde:

Q_q = Calor fornecido [W];

Q_f = Calor removido [W];

α = coeficiente de Seebeck do módulo termoeletrico [V/°C];

K = condutância térmica do módulo termoeletrico [W/°C];

I_L = corrente elétrica [A];

T_q = temperatura na junção do lado quente [°C];

T_f = temperatura na junção do lado frio [°C];

R_i = resistência interna do módulo termoeletrico [Ω].

O primeiro termo das equações 31 e 32 é o calor referente ao efeito Peltier e o segundo termo é referente à condução de calor dos materiais semicondutores. De acordo com Silverio (2012), o terceiro termo é referente à produção de calor pelo efeito Joule.

O rendimento do gerador termoeletrico é dado pela relação entre potência elétrica de saída e potência térmica de entrada, como visto na equação 33. A potência de saída é a potência da carga (P_L) dada pela equação 26 e a potência de entrada é a taxa de transferência de calor fornecido (Q_q) dado pela equação 31. São substituídos os valores definidos pelas equações 26 e 31 na equação 33.

$$\eta = \frac{P_L}{Q_q} = \frac{N^2(\alpha_p - \alpha_n)^2(T_q - T_f)^2 \left[\frac{R_L}{(R_i + R_L)^2} \right]}{\alpha I_L T_q + K(T_q - T_f) - \frac{1}{2} I_L^2 R_i} \quad (33)$$

De acordo com Ismail *et al* (2009) a eficiência do gerador termoeletrico também pode ser calculada pela equação 34.

$$\eta = \frac{(T_q - T_f)}{T_q} \frac{\sqrt{1 + Z_T} - 1}{\sqrt{1 + Z_T} + \frac{T_q}{T_f}} \quad (34)$$

Heikes e Ure Jr (1961) apresentam a eficiência pela equação 35. Onde S é a relação entre resistência da carga e a resistência interna do módulo termoeletrico.

$$S = \frac{R_L}{R_i}; \eta = \frac{\frac{(T_q - T_f)}{T_q} S}{(1 + S) - \frac{(T_q - T_f)}{2T_q} + (1 + S)^2 \frac{RK}{\alpha^2 T_q}}. \quad (35)$$

De acordo com Heikes e Ure Jr (1961) o rendimento é maximizado quando o produto da resistência elétrica pela condutância térmica do módulo termoeletrico é minimizado.

3.10 Sistema elétrico automotivo

Existem sistemas elétricos automotivos que resultam em cerca de 1 km de cabos pela carroceria. O alternador fornece toda energia elétrica necessária ao automóvel e carrega a bateria durante a marcha, a bateria fornece energia quando o motor está parado. Os consumidores elétricos podem ser classificados em três tipo: de conexão permanente, de conexão prolongada e de conexão breve. O sistema de injeção e o sistema de controle do motor são consumidores de conexão permanente e essenciais para o funcionamento do motor. Os faróis, o sistema de ar condicionado, luzes do painel de instrumento e rádio são consumidores de conexão prolongada. Os vidros elétricos, luz de freio, acendedor de cigarro e buzina são consumidores de conexão breve. O anexo C apresenta um diagrama mais completo das cargas (ALVES e LOURENÇO, 2009).

A bateria é um dispositivo capaz de transformar energia elétrica em energia química e vice-versa. Os elementos da bateria são: caixa, célula, placas, separador, bornes e eletrólito. A capacidade da bateria é definida por Ah, corrente elétrica fornecida constantemente durante 20 horas de descarga sem que a tensão ultrapasse o limite mínimo de tensão definida pelo fabricante. Geralmente as baterias automotivas tem tensão nominal igual a 12,6 V. As funções da bateria são:

- Funcionamento do motor de arranque;
- Funcionamento do sistema de ignição durante o arranque;
- Suprir as cargas quando o motor está parado;
- Estabilizador de tensão;
- Completar a demanda quando ultrapassada a capacidade do alternador.

O motor de arranque é um motor elétrico que tem como função acionar o MCI até o momento em que ele seja capaz de funcionar sozinho.

O alternador transforma energia mecânica em energia elétrica através de uma correia, ele é responsável por alimentar as cargas elétricas do carro quando este está em marcha. Os elementos do alternador são: estator, rotor, escovas, retificador e regulador de tensão. Geralmente os alternadores automotivos geram aproximadamente 1 kW (DUTRA E MELO, 2014).

O retificador de corrente transforma a corrente alternada trifásica gerada pelo alternador em corrente contínua. A retificação da corrente, que é feita por um dispositivo eletroeletrônico composto por ponte de díodos é necessária, pois a bateria e os consumidores elétricos exigem corrente contínua.

3.11 Sistema de escapamento automotivo

Os componentes básicos do sistema de escapamento são:

- Coletor de admissão – capta os gases da queima de combustível;
- Tubo do motor – conduz os gases do coletor para o catalisador;
- Catalisador – transforma gases tóxicos em gases inofensivos;
- Silenciador intermediário – reduz o ruído e melhora o rendimento do motor;
- Silenciador traseiro – completa a função do silenciador intermediário e reduz as ondas sonoras de baixa frequência.

De acordo com a GM (2012), o sistema de escapamento é um conjunto de tubos e silenciadores que têm como funções:

- Reduzir o nível de ruído do motor - utiliza uma série de tubos perfurados e câmaras para interrupção do fluxo de gases da combustão;
- Controlar a contrapressão dos gases - controlado através das curvas, volumes e vazões que são desenvolvidos para obter melhor rendimento do motor;
- Conduzir os gases para longe da cabine - evita a intoxicação dos passageiros;
- Redução de consumo de combustível.

Valle (2010) coletou dados de um motor Palio 1.0 com 8 válvulas, pelos seus estudos o motor com uma rotação de 1100 RPM tinha seus gases de exaustão a 118 °C e o motor com uma rotação de 2450 RPM tinha seus gases de exaustão a 300°C. Uma rotação de 1350 RPM teria seus gases de exaustão a aproximadamente 182 °C, considerando uma variação linear da temperatura dos gases de exaustão em função da rotação do motor.

4 ESTUDO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO

O estudo do módulo termoeletrico apresenta o ensaio experimental pesquisado, os dados obtidos pelo ensaio, o estudo do módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0, a análise da utilização do GTE para automóveis, a validação da modelagem matemática e os resultados de outros módulos termoeletricos para comparação.

A validação do modelo matemático é realizada por dados reais, obtidos por ensaios experimentais. Existem inúmeras possibilidades de configurações para obter resultados reais de módulos termoeletricos e a seguir um esquemático para testes de módulos termoeletrico com função de geração de energia elétrica será explicado.

4.1 Ensaio experimental

Dutra e Melo (2014) realizaram um ensaio experimental de GTE onde a fonte de calor são os gases de exaustão. Os módulos termoeletricos estão em contato direto com os gases de exaustão pois estão embutidos no cano de escapamento, como pode ser visto na figura 16. No projeto existem espaços para 21 módulos termoeletricos, mas o estudo não utilizou 21 módulos devido ao custo financeiro. Foram utilizados cinco módulos termoeletricos TEG1-12611-6.0 e os espaços sem módulos foram fechados por chapas metálicas para imitar o comportamento de troca de calor de módulos termoeletricos. Nesse trabalho serão analisados os resultados do módulo 1 e do módulo 2, o módulo 2 está ressaltado na figura 16 pelo ponto vermelho 1 e o módulo 1 está à esquerda do módulo 2.

O dissipador de calor selecionado é a aleta FNT-020-AL, que possui resistência térmica igual a 1,22 °C/W. Na figura 16 é possível ver o GTE montado, os dissipadores de calor de alumínio foram cortados para encaixe e aparafusados. A fiação dos módulos termoeletricos e do material de medição ocupa pequenas folgas que foram projetadas para impedir dano aos fios.

Figura 16 – GTE completo



Fonte: Dutra e Melo (2014)

O motor estacionário utilizado para gerar os gases de exaustão no teste foi o motor Perkins Q20B 4.236, motor 3.8 diesel de aspiração natural. A figura 17 mostra o GTE ligado ao cano de escape do motor diesel. A segurança é uma preocupação devido aos gases de exaustão serem gases tóxicos, portanto uma vedação bem-feita é prioridade para realização de testes.

Figura 17 – GTE acoplado ao cano de escapamento do motor diesel



Fonte: Dutra e Melo (2014)

Um compressor de ar, trabalhando como ventilador, foi utilizado para simular o fluxo de ar que passa pelo dissipador de calor devido ao movimento do automóvel. Isso é feito para estudar a variação de temperatura do lado frio e estudar a necessidade de outros métodos de dissipação de calor. Lembrando que o aumento da diferença de temperatura entre as faces do módulo termoeletrico significa um aumento do potencial de geração do GTE.

Durante o experimento as medições de temperatura do lado quente e do lado frio do módulo termoeletrico foram medidas através da utilização termopares tipo J, termopar composto de Ferro/Constantan. O termopar tipo J tem faixa de temperatura de 0 – 760 °C e limite de erro padrão igual a 0,75 %.

Um circuito de resistores com resistência equivalente de $1,2 \Omega$ foi utilizado para simular a carga ligada ao módulo termoeletrico e é medida a tensão em cima dessa resistência

No experimento são utilizados 3 *SuperLogics* Série 8000, módulos de aquisição de sinais. O primeiro é o módulo *SuperLogics* 8017 que é utilizado para medir tensão. O segundo é o módulo *SuperLogics* 8018 que é utilizado para receber as medições de temperatura. O terceiro é o módulo conversor *SuperLogics* 8520 que recebe os sinais dos outros módulos e trata o sinal para ser enviado via conexão RS-232 para um computador. A utilização de um sistema de aquisição de dados é para obter medições de forma mais precisa e confiável. Os erros nas medições de temperatura são em torno de 0,05 % e nas medições de tensão são em torno de 0,1 %, portanto os erros de medições são desprezíveis.

Nesse experimento realizado na Universidade de Brasília as medições de interesse são as tensões nos módulos, a temperatura do lado quente do módulo termoeletrico 1 e a temperatura do lado frio do módulo termoeletrico 1. Com as informações obtidas é possível calcular a potência elétrica gerada por cada módulo termoeletrico. Fazendo uma aproximação que a temperatura das faces do módulo termoeletrico 2 é igual as temperaturas medidas no módulo 1.

4.1.1 Resultados

A tabela 8 apresenta os dados referentes ao módulo 1, o anexo A contém a tabela completa. Os dados obtidos através do experimento são a temperatura do lado quente, a temperatura do lado frio e a tensão do módulo.

Tabela 8 – Dados experimentais do módulo 1

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
1	92,7	34	0,91	58,7	0,913	0,690	0,695
2	92,9	34,1	0,91	58,8	0,915	0,690	0,697
3	93,1	34,2	0,91	58,9	0,916	0,690	0,699
4	93,2	34,2	0,92	59	0,918	0,705	0,702
5	93,3	34,2	0,92	59,1	0,919	0,705	0,704
6	93,6	34,3	0,92	59,3	0,922	0,705	0,709
...
322	180,9	46,9	2,06	134	2,084	3,536	3,621
323	181	47,2	2,06	133,8	2,081	3,536	3,610
324	181,1	47,4	2,06	133,7	2,080	3,536	3,604
325	181,2	47,7	2,07	133,5	2,077	3,571	3,594
326	181,3	47,9	2,07	133,4	2,075	3,571	3,588
327	181,2	47,6	2,07	133,6	2,078	3,571	3,599

Fonte: adaptado de Dutra e Melo (2014) e próprio autor

A tabela 9 apresenta os dados referentes ao módulo 2, o anexo B contém a tabela completa. Os dados obtidos através do experimento são a temperatura do lado quente, a temperatura do lado frio e a tensão do módulo.

Tabela 9 – Dados experimentais do módulo 2

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
1	92,7	34	0,91	58,7	0,913	0,690	0,695
2	92,9	34,1	0,91	58,8	0,915	0,690	0,697
3	93,1	34,2	0,91	58,9	0,916	0,690	0,699
4	93,2	34,2	0,92	59	0,918	0,705	0,702
5	93,3	34,2	0,92	59,1	0,919	0,705	0,704
6	93,6	34,3	0,92	59,3	0,922	0,705	0,709
...
322	180,9	46,9	1,87	134	2,084	2,914	3,621
323	181	47,2	1,88	133,8	2,081	2,945	3,610
324	181,1	47,4	1,88	133,7	2,080	2,945	3,604
325	181,2	47,7	1,88	133,5	2,077	2,945	3,594
326	181,3	47,9	1,89	133,4	2,075	2,977	3,588
327	181,2	47,6	1,89	133,6	2,078	2,977	3,599

Fonte: adaptado de Dutra e Melo (2014) e próprio autor

A variável ΔT é a diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio. A tensão teórica, a potência do módulo e a potência teórica do módulo são explicadas na seção análise de resultados.

4.2 Módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0

A definição do módulo termoeletrico utilizado na geração de energia elétrica em automóveis é feita a partir dos modelos disponíveis no mercado. Aplicações reais devem considerar a necessidade de substituição de módulos danificados ou defeituosos. Apesar do estudo ser realizado em temperaturas em torno de 170 °C o módulo termoeletrico deve possuir temperatura máxima de lado quente maior que isso para garantir a integridade física do equipamento, pois os gases de exaustão podem chegar a temperaturas maiores em aplicações reais. Outro fator importante é a potência máxima de saída com carga.

O módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0 fabricado pela Thermoelectric Gencell Technology foi utilizado no estudo de Dutra e Melo (2014). A tabela 10 apresenta as especificações do TEG1-12611-6.0.

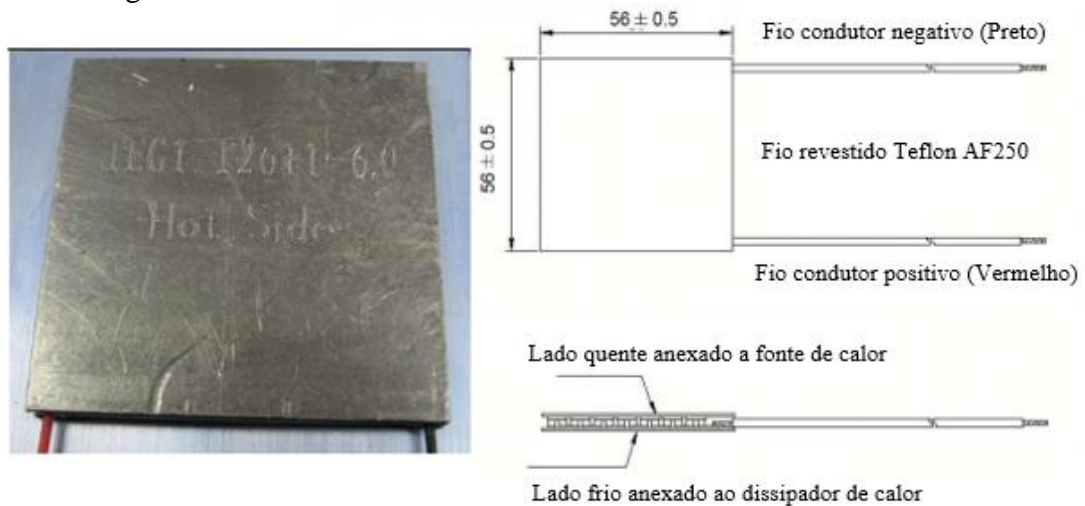
Tabela 10 –Especificações do módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0

Temperatura máxima do lado quente [°C]	300
Temperatura do lado frio [°C]	30
Resistência elétrica interna [Ω]	1,2
Tensão de circuito aberto [V]	8,4
Tensão de saída [V]	4,2
Corrente de saída [A]	3,4
Potência máxima de saída com carga [W]	14,6
Fluxo de calor no módulo termoeletrico [W]	365
Densidade do fluxo de calor [W/cm^2]	11,6
Condutância Térmica [$\text{W}/^\circ\text{C}$]	0,83
Resistência CA [Ω] Medição em 27°C e 1000Hz	0,5~0,7

Fonte: adaptado do Datasheet TEG1-12611-6.0

O módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0 é encapsulado em um invólucro metálico e também é chamado de GTE. A figura 18 apresenta o módulo termoeletrico e suas características geométricas, as dimensões são dadas em milímetro.

Figura 18 – Módulo termoeletrico e suas características geométricas

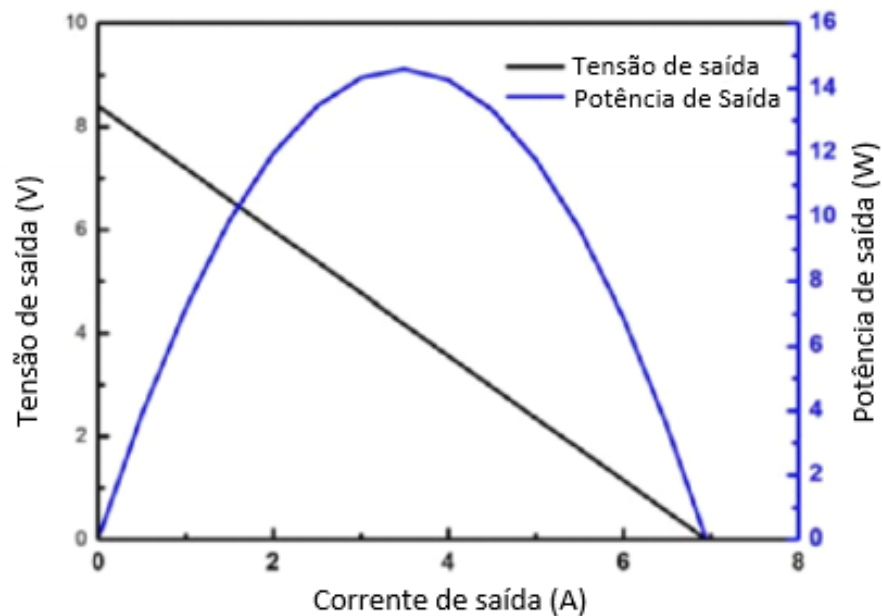


Fonte: adaptado do Datasheet TEG1-12611-6.0

A figura 19 apresenta as curvas características de potência de saída na carga e tensão de saída de acordo com a corrente, para uma diferença de temperatura de $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_q = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_f = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pela figura 19 e pela tabela 10, a tensão de circuito aberto é igual a $8,4\text{ V}$ para uma diferença de temperatura igual a $270\text{ }^{\circ}\text{C}$. O coeficiente de Seebeck do módulo termoeletrico obtido pela equação 22 é igual a $31,111\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, isso indica que o módulo termoeletrico possui características de um bom material termoeletrico, alta condutividade elétrica e baixa condutividade térmica.

Para um GTE ter uma geração grande o suficiente para suprir as cargas elétricas de um automóvel seria necessário o uso de múltiplos módulos termoeletricos. Na utilização de múltiplos módulos termoeletricos deve ser levado em consideração o espaço disponível, nesse caso espaço não seria um problema pois as dimensões do módulo TEG1-12611-6.0 de $56 \times 56\text{ mm}$ são pequenas quando comparadas ao escapamento automotivo. A alocação de módulos termoeletricos que criam oposição ao fluxo dos gases de exaustão deve ser estudada antes, pois caso os gases não sejam totalmente expulsos ocorrerá a contaminação da câmara de explosão do MCI e por consequência o rendimento do motor diminuirá, esse efeito é chamado de *backpressure*.

Figura 19 – Curva de tensão, corrente e potência a 300°C dada pelo datasheet



Fonte: Datasheet TEG1-12611-6.0

De acordo com Dutra e Melo (2014), os alternadores atuais instalados em automóveis são de aproximadamente 1 kW, com 85 A e 12,6 V. Falando de potência instalada seria necessário o GTE ser contruído com 69 unidades do módulo TEG1-12611-6.0, ligados em série, para chegar ao valor igual à 1007,4 W. Teoricamente os GTEs possuem as características necessárias para substituir os alternadores, mas existem dois problemas.

O primeiro problema é que o aumento da temperatura do lado quente não é instantâneo e a potência elétrica gerada pelo módulo termoeletrico depende da diferença de temperatura. Por esse motivo seria mais proveitoso a utilização de GTE em ônibus, caminhões e táxis, que são veículos de maior tempo de circulação.

O segundo problema seria o custo de implantação. O preço dado no site da empresa Thermoelectric Gencell Technology é de \$44,50 por cada módulo, quando são comprados mais de 51 módulos, e foi considerado a cotação do dólar do dia 22 de outubro de 2016 onde o dólar valia R\$3,16. Fazendo um comparativo de preço, alternadores custam entre R\$ 800 e R\$ 3.000,00 e as 69 unidades do TEG1-12611-6.0 custariam R\$ 9.702,78, isso mostra que a implantação teria uma diferença de custo elevada, mas a troca aumentaria a eficiência do combustível e portanto teria um retorno a longo prazo.

De acordo com Yang (2007), a utilização do GTE em automóveis reduz o consumo de combustível em até 10%. Considerando o gasto médio mensal com combustível sendo igual

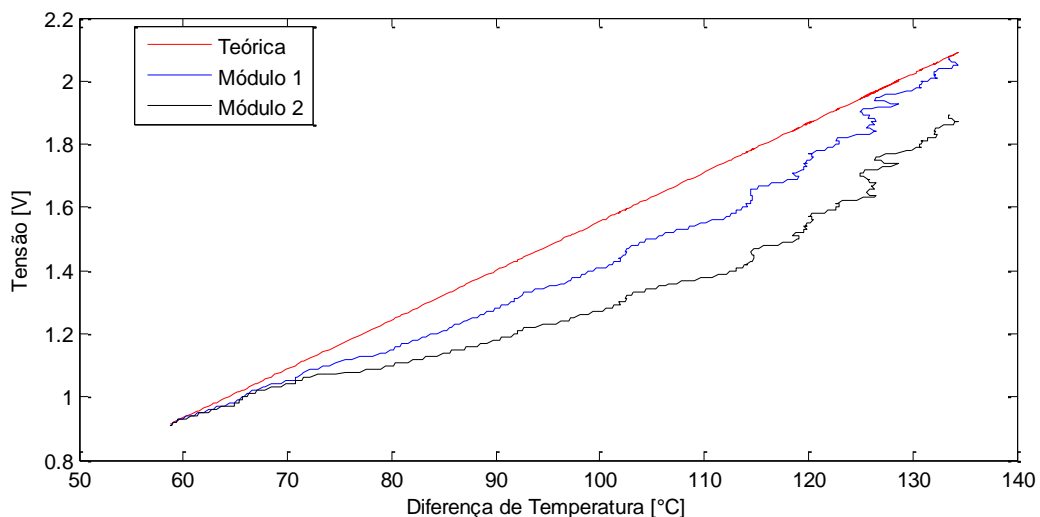
à R\$ 344, a utilização do GTE pouparia R\$ 34,40 por mês. O retorno pela redução do consumo de combustível em 10 anos seria de R\$ 4.128,00.

Uma alternativa futura é o uso de GTE juntamente com os alternadores, pois a demanda de energia por parte do sistema elétrico vem crescendo pelas novas tecnologias que vem sendo instaladas nos automóveis. O sistema de alternador e bateria na tensão de 14V tem limite em torno de 3 kW, pois esse valor esgota a capacidade do alternador tipo Lundell e os cabos elétricos necessários são de bitola impraticáveis no espaço disponível (ALVES e LOURENÇO, 2009).

4.3 Análise dos resultados

A curva de tensão de saída teórica é calculada através da equação 25, utilizando os dados da tabela 10 e a diferença de temperatura entre as faces dada pelas tabelas 8 e 9 (Tabelas completas no anexo A e no anexo B). Utilizando as tensões dos módulos dadas pelas tabelas 8 e 9, obtidas pelo ensaio experimental, é traçada a curva da tensão na carga devido ao módulo. A curva teórica e as curvas dos módulos estão apresentadas na figura 20, como esperado elas crescem com o aumento da diferença de temperatura. A tensão gerada pelo módulo está dentro do esperado, parte do erro é causado pela variação de temperatura do lado frio do módulo termoelétrico, pela variação das características dada na tabela 10 devido ao processo de construção do equipamento e pela aproximação da temperatura feita para o módulo 2.

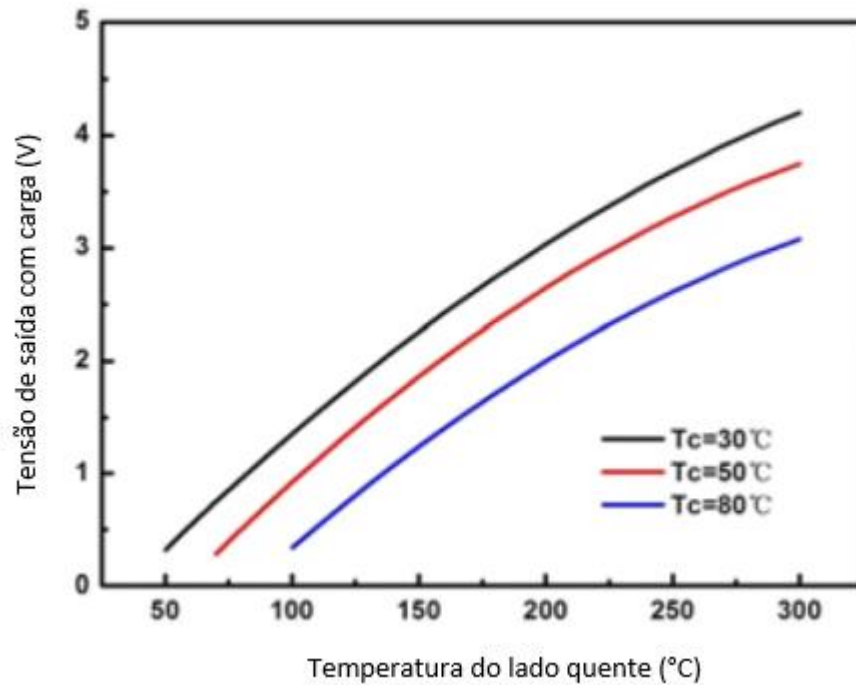
Figura 20 – Tensão de saída versus Diferença de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 21 mostra a curva de tensão de saída do módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0 dada pelo *datasheet* do equipamento. A curva teórica dada pela equação 25 está condizente, o que comprova que o modelo matemático está correto.

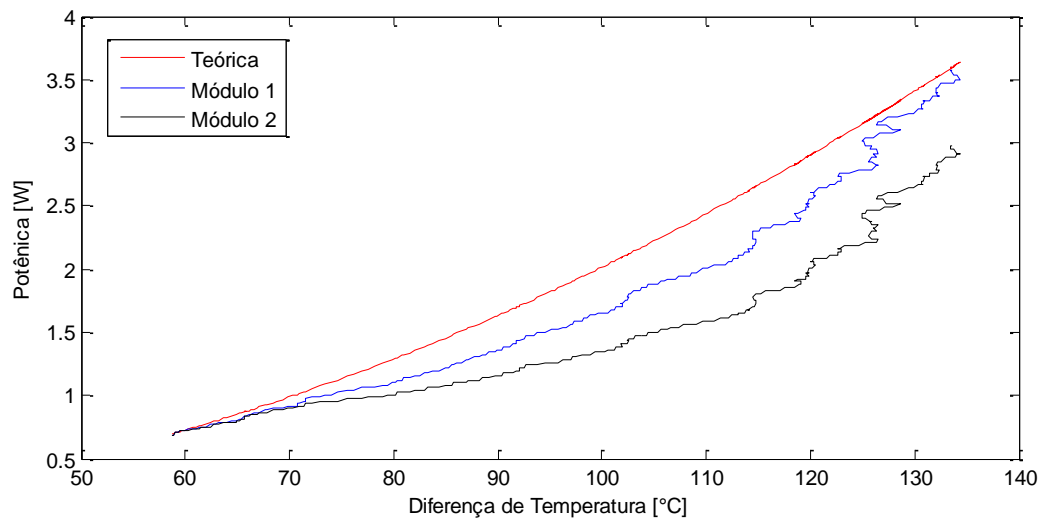
Figura 21 – Curva de tensão de saída dada pelo Datasheet



Fonte: adaptado do Datasheet TEG1-12611-6.0

A curva da potência teórica fornecida a carga é calculada através da equação 26, utilizando os dados da tabela 10 e os dados das tabelas 8 e 9. Utilizando as tensões adquiridas pela análise experimental foi traçada a curva da potência fornecida as cargas pelos módulos, através da equação 26. A carga é uma resistência de $1,2 \Omega$. A curva teórica e as curvas dos módulos estão apresentadas na figura 22.

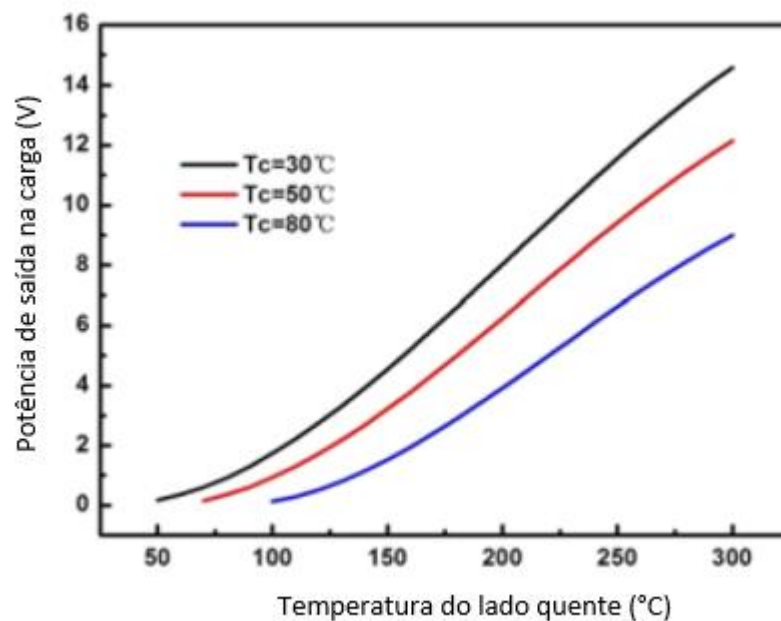
Figura 22 – Potência de saída na carga versus Diferença de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 23 mostra a curva da potência fornecida a carga pelo módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0 dada pelo *datasheet* do equipamento. A curva da potência teórica dada pela equação 26 está condizente, o que comprova que o modelo matemático está correto.

Figura 23 – Curva de potência de saída dada pelo datasheet



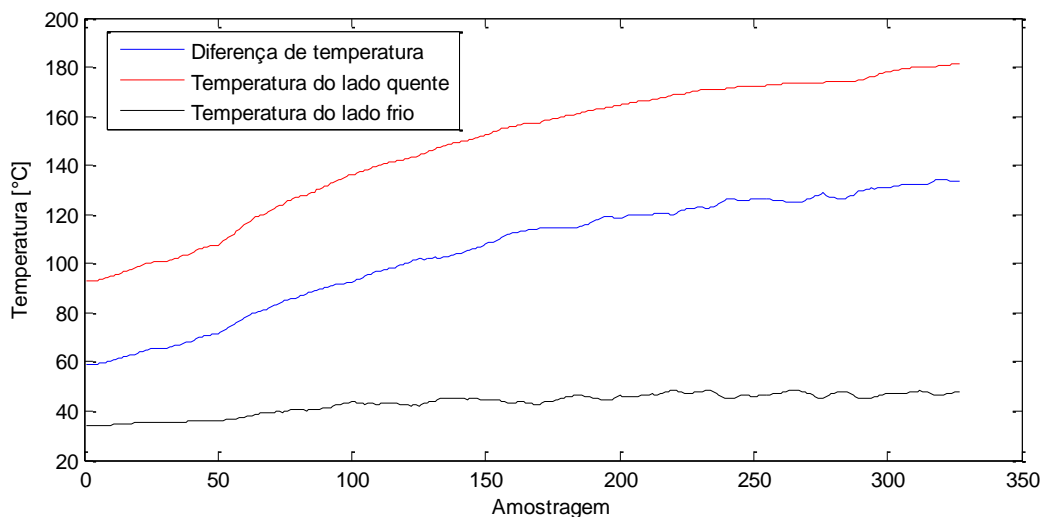
Fonte: adaptado do Datasheet TEG1-12611-6.0

A expectativa de geração era de 3,6 W, para uma diferença de temperatura de 133,6 °C. Na realidade o módulo 1 gerou 3,57 W, apresentando um erro de 0,83 %, e o módulo 2

gerou 2,98 W, apresentando um erro de 17,2 %. Os resultados obtidos foram bastantes satisfatórios. Considerando o módulo termoeétrico 1 e 2 como um par, um GTE composto por 8 pares seria capaz de gerar 52,4 W, essa potência seria o suficiente para suprir 5,24 % dos consumidores (luz de freio, buzina e pequenos equipamentos, como um GPS de 7.5 W).

Utilizando as temperaturas medidas pelo ensaio experimental, dadas pela tabela 8, foram traçada as curvas das temperaturas pela amostragem do experimento, como mostra a figura 24.

Figura 24 – Temperatura do lado quente, do lado frio e diferença de temperatura

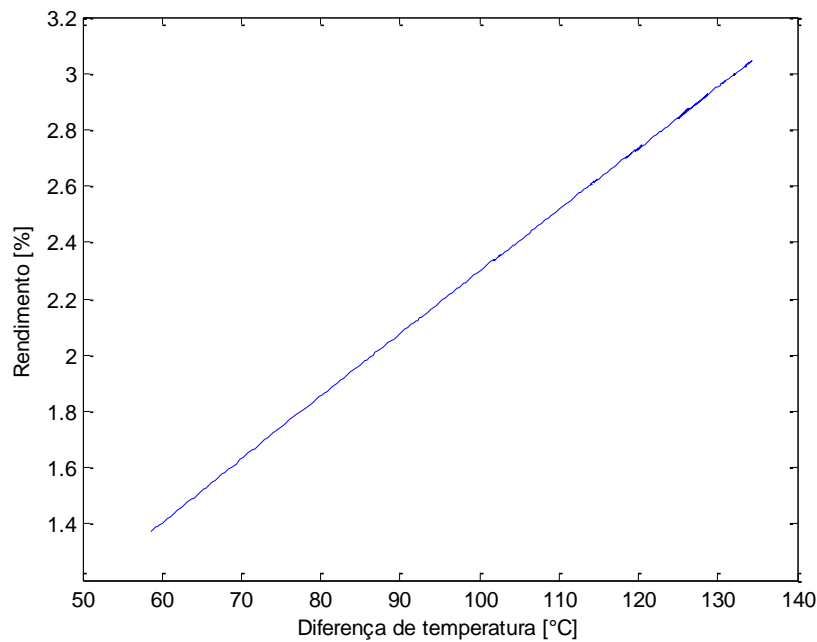


Fonte: Elaborado pelo autor

Os dissipadores de calor estão moderadamente eficientes, pois no experimento a temperatura do lado frio não permaneceu igual a temperatura ambiente, ocorreu uma variação de 13,6 °C. Um sistema de dissipação de calor melhor faria a temperatura do lado frio ficar mais próxima a temperatura ambiente e por isso uma maior diferença de temperatura estaria presente. O aumento da diferença de temperatura causaria um aumento da tensão e como consequencia um aumento da potência fornecida a carga pelo módulo termoeétrico, por isso é vantajoso investir em um sistema de dissipação de calor mais adequado.

Através da equação 35, utilizando os dados da tabela 8 e os dados da tabela 10, é calculado o rendimento do módulo termoeétrico, mostrado na figura 25, comprovando que o rendimento cresce com o aumento da diferença de temperatura entre as faces.

Figura 25 – Rendimento do módulo termoeletrico



Fonte: Elaborado pelo autor

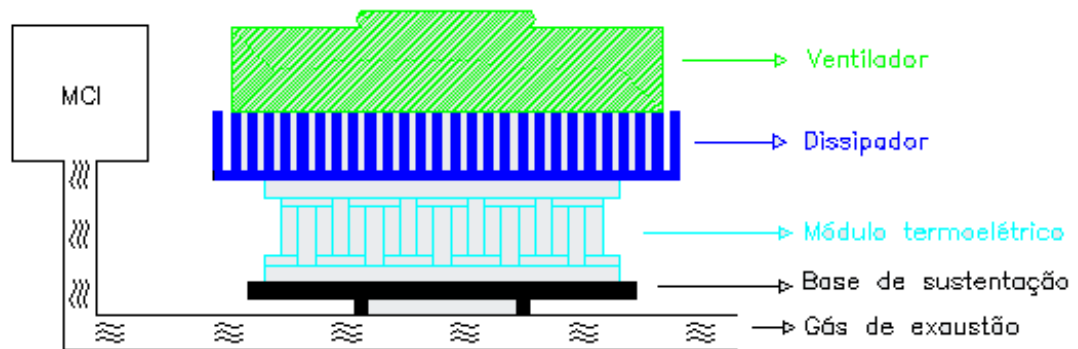
Os módulos da linha TG da Marlow tem eficiência em torno de 5%, portanto o rendimento do TEG1-12611-6.0 está dentro da realidade do mercado, lembrando que essa temperatura não é o limite de operação.

Pelos dados da tabela 10 e pelas equações 18 e 19 a figura de mérito (Z) do módulo termoeletrico TEG1-12611-6.0 é igual a $971,781 \mu K^{-1}$ e $Z_{T(300K)}$ é igual a 0,295. A figura de mérito é um indicador de eficiência e as pesquisas de materiais termoeletricos buscam criar materias com figuras de mérito maior, no momento são menores do que 1, para obter uma maior eficiência.

4.4 Comparativo de módulos termoeletricos

Santos (2010) e Carvalho (2012) realizaram seus experimentos sobre o mesmo esquemático experimental, representado na figura 26. O esquemático experimental utilizado simula o uso de um GTE onde a fonte de calor são gases de exaustão proveniente de um motor de combustão interna.

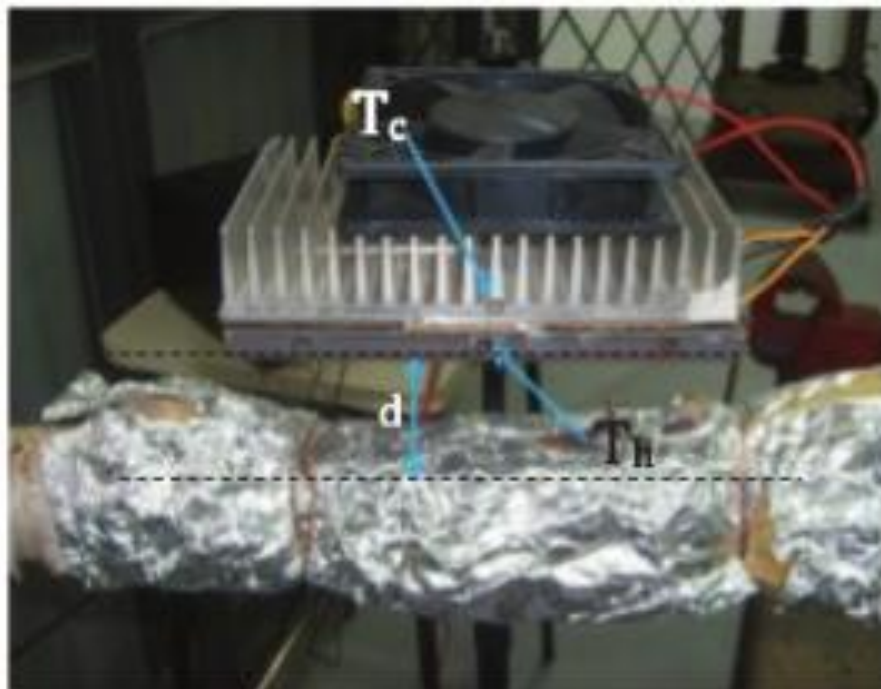
Figura 26 – Representação do experimento proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 27 apresenta o experimento feito por Carvalho (2012) na Universidade de Taubaté em São Paulo, é um módulo termoeletrico montado sobre um suporte de ferro de altura regulável, um dissipador de calor com sistema de ventilação acoplado, uma carga resistiva e uma fonte de calor.

Figura 27 – Montagem Real do GTE com ventilação forçada



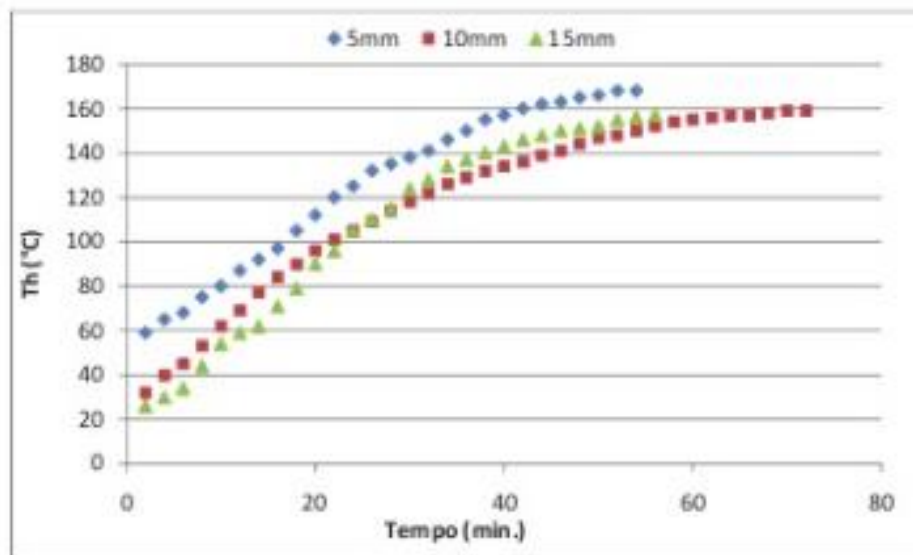
Fonte: Carvalho (2012)

Um motor 2 tempos modelo intek I/CR OHV 10HP foi utilizado para produzir os gases de exaustão. Durante o experimento as medições de temperatura do lado quente e do lado frio do módulo termoeletrico foram medidas através da utilização de termopares tipo J – Sensor

Termoelemento Fe-Co, modelo TE/AA. Uma resistência elétrica, de $5,7 \, \Omega$ para o estudo de Carvalho (2012) e de $50 \, \Omega$ para o estudo de Santos (2010), foi utilizado para simular a carga ligada ao módulo termoeletrico e foram utilizados multímetros Minipa ET-1502 e Minipa ET-2052 para medição de corrente e tensão na carga. Para manter a temperatura do lado frio aproximadamente constante foram utilizados um dissipador de calor de alumínio, com 20 aletas e espaçamento de 10 mm entre aletas, e um ventilador para aumentar a eficiência do dissipador.

Para o módulo termoeletrico trabalhar na faixa de temperatura desejada foi utilizado um suporte de ferro de altura regulável, regulando a distância d mostrada na figura 27, e medida a temperatura do lado quente do módulo termoeletrico em 3 alturas diferentes como mostra a figura 28. Essa medição garante que o módulo não trabalhará fora da faixa de temperatura definida pelo fabricante, assim garante a integridade do equipamento. A distância escolhida foi a de 5 mm, pois estabiliza em uma temperatura maior e mais rapidamente.

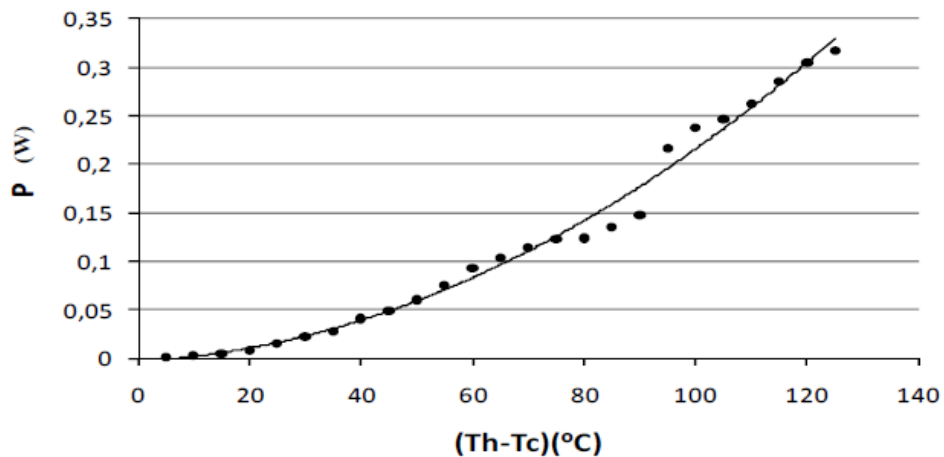
Figura 28 – Temperatura do lado quente variando a altura do suporte



Fonte: Carvalho (2012)

Santos (2010) estudou o módulo termoeletrico HT8-12-40, onde a carga era simulada por uma resistência de $50 \, \Omega$, obtendo através de seus experimentos a potência descrita pela figura 29. O módulo produzia 0,32 W quando submetido a uma diferença de temperatura de $132 \, ^\circ\text{C}$. A fonte de calor são gases de exaustão.

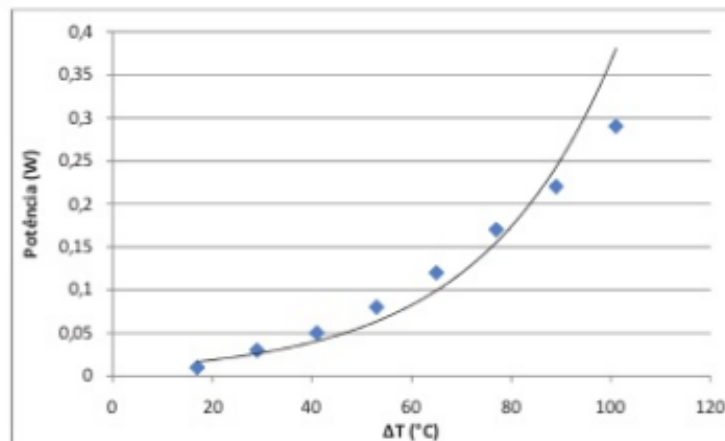
Figura 29 – Potência de saída pela diferença de temperatura do módulo HT8-12-40



Fonte: Santos (2010)

Carvalho (2012) estudou o módulo termoeétrico TE Technology 40mm x 40mm x 3,9mm, onde a carga era simulada por uma resistência de 5,7 Ω , obtendo através de seus experimentos a potência descrita pela figura 30. O módulo produziu 0,37 W quando submetido a uma diferença de temperatura de 100 °C. A fonte de calor são gases de exaustão.

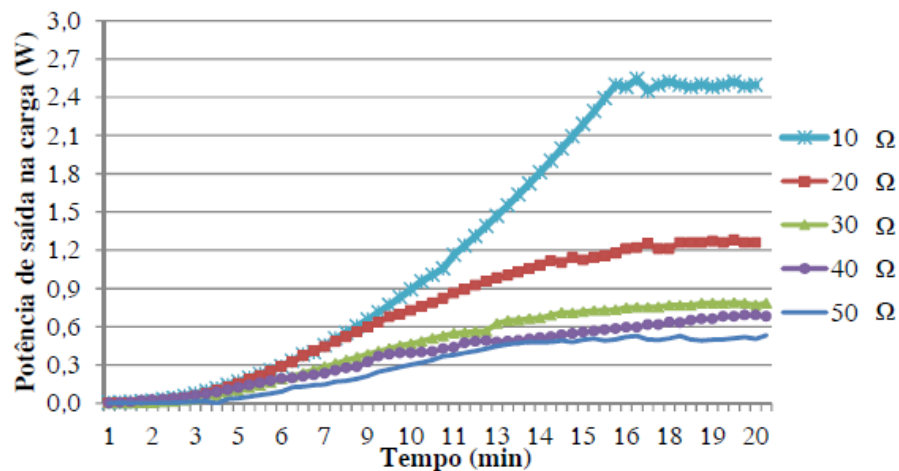
Figura 30 – Potência de saída pela diferença de temperatura do módulo TE Technology 40x40x3,9 mm



Fonte: Carvalho (2012)

Pereira (2014) estudou o módulo termoeétrico TEHP1-1264-0.8, onde a carga foi simulada por diferentes resistências, obtendo através de seus experimentos a potência descrita pela figura 31. O módulo chegou a produzir 2,5 W, para uma resistência de 10 Ω , quando submetido a uma diferença de temperatura de 160 °C. A fonte de calor é um aquecedor.

Figura 31 – Potência de saída em função do tempo do módulo TEHP1-1264-0.8

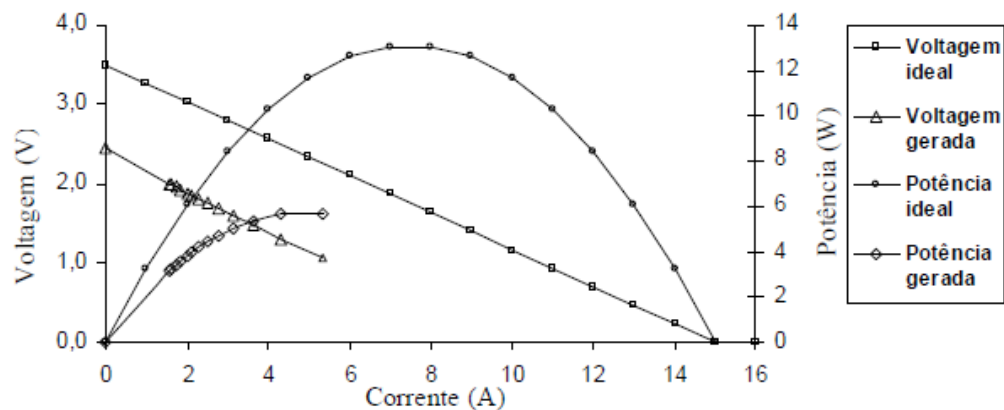


Fonte: Pereira (2014)

Santos (2007) estudou o módulo termoeletrico HZ-14, onde a carga foi simulada por diferentes resistências. O módulo chegou a produzir 5,643 W, para uma resistência de 0,198 Ω, quando submetido a uma diferença de temperatura de 138 °C. A fonte de calor é um lampião a GLP. A figura 32 mostra os resultados obtidos por Santos (2007), o experimento não atingiu a diferença de temperatura esperada.

Figura 32 – Potência e tensão de saída em função da corrente do módulo HZ-14

Curva de Potência e Tensão x Corrente - HZ 14 (valores ideais c/ dif. de temp.=200°C e valores gerados c/ dif. de temp.=138°C)



Fonte: Santos (2007)

Os trabalhos de Santos (2010) e Carvalho (2012) usaram módulos que foram projetados para serem utilizados como pastilhas de Peltier, apesar de poderem ser utilizados

como GTE eles são inferiores aos outros módulos citados. O trabalho de Pereira (2014) obteve níveis de potências melhores, próximo ao do TEG1-12611-6.0. O trabalho de Santos (2007) obteve os maiores níveis de potência. Com os resultados desses experimentos já constam 3 módulos termoelétricos com capacidade de assumir parte das cargas elétricas de um automóvel.

5 CONCLUSÃO

O GTE produz energia elétrica sem produzir resíduos ou poluição e por isso é considerado uma fonte “limpa” de energia. Como hoje em dia existe uma grande preocupação com o meio ambiente e uma procura por fontes “limpas” de energia isso leva a um investimento na área de fontes alternativas e o GTE está sendo beneficiado por isso. A principal área de aplicação de GTE é a cogeração. A grande desvantagem do GTE é o baixo rendimento de módulos termoeletrônicos, em torno de 5%, e por isso é necessário o investimento em pesquisas por melhores materiais e módulos termoeletrônicos.

Pelo modelo matemático apresentado e pela análise dos resultados foi observado que a tensão gerada pelo módulo termoeletrônico depende da diferença de temperatura entre as faces e das especificações do módulo. As especificações do módulo termoeletrônico são características do material e do método de construção, portanto após a fabricação do módulo são parâmetros fixos. Os principais parâmetros a serem observados são a temperatura do lado quente e a temperatura do lado frio, pois a diferença de temperatura é que define a tensão gerada e por consequência a potência elétrica disponibilizada à carga.

A utilização de GTE para transformar a energia térmica dos gases de exaustão de automóveis em energia elétrica para alimentação das cargas elétricas dos automóveis é possível e pode contribuir para redução do consumo de combustíveis fósseis, reduzindo a emissão de dióxido de carbono emitida pelos meios de transporte. De acordo com Yang (2007), a utilização do GTE em automóveis reduz o consumo de combustível em até 10%.

É necessário observar a importância de manter a temperatura do lado frio do módulo termoeletrônico a menor possível. Um bom sistema de dissipação de calor é necessário e o custo da sua implantação é justificado pelo aumento da tensão gerada pelo módulo. No caso de automóveis o sistema de arrefecimento junto com o radiador poderia ser utilizado para a função de dissipador de calor.

O GTE tem condições de substituir o alternador quanto à potência elétrica instalada, sendo necessária a utilização de 69 módulos termoeletrônicos na construção do GTE para substituir o alternador, conforme cálculos desenvolvidos.

O módulo termoeletrônico TEG1-12611-6.0 é capaz de gerar 3,57 W para uma diferença de temperatura igual a 133,6 °C utilizando gases de exaustão como fonte de calor. A utilização de 16 módulos já é o suficiente para suprir 5,24% da carga (luz de freio, buzina e pequenos equipamentos, como um GPS de 7,5 W).

O alto custo para implantação de 69 módulos termoeletricos, da ordem de R\$ 9.700,00, ainda é um problema, por isso é necessária a melhoria dos materiais termoeletricos para aumentar a eficiência do módulo termoeletrico de maneira que haja o aumento do custo benefício do equipamento. Outro problema é que a energia elétrica produzida pelo GTE é dependente da diferença de temperatura e em automóveis a temperatura do lado quente sofre uma mudança gradual, não é instantânea. O alternador já produz energia elétrica desde a partida do carro e o GTE leva mais tempo devido ao tempo do aquecimento. Por esse fato se indica o GTE para veículos de alto tempo de rotação, como táxis, caminhões e ônibus que possuem pelo menos 8 horas diárias de uso.

Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são propostos alguns tópicos de estudo relacionados.

- Estudo da viabilidade da utilização de GTE em automóveis, aproveitando gases de exaustão e perdas por atrito;
- Criação de um modelo computacional para simulação de GTE;
- Utilização de GTE em usinas termelétricas onde a fonte de calor é o resíduo de energia térmica do vapor d'água.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE, Leilões de energia. Brasília, DF. 2016. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/leiloes-de-energia>. Acessado em 29 de novembro de 2016.
- ABREU, Y. V., **Estudo comparativo da eficiência energética da indústria da cerâmica de revestimento via úmida no Brasil e na Espanha**. 2003. 135f. Tese (Doutorado em engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- ALVES, M. J.; LOURENÇO, M. D. **Automóvel: Sistema de Carga**. 1. Ed. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto 2009. 81f.
- ANEEL. **Resolução nº 21**, de 2006. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/003/documento/minuta_resolucao.pdf. Acessado em 17 de outubro de 2016.
- ANEEL. **Resolução nº 482**, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acessado em 17 de outubro de 2016.
- Antunes, J. A. A., **Reaproveitamento de calor para geração de energia eléctrica no automóvel**. 2011 Dissertação (Mestrado em engenharia eléctrica) Universidade de Minho, Guimarães, Portugal.
- ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 968p.
- BIRKHOLZ, U. *et al.* **Conversion of waste exhaust heat in automobile using FeSi₂ thermoelements**. Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. 1988, Arlington, USA, pp. 124-128.
- BLANKE, B. C.; BIRDEN, J. H.; JORDAN, K. C.; MURPHY, E. L. **Nuclear battery – thermocouple type summary report**. 1960. 72f. Pesquisa (United State Atomic energy commission), Ohio.
- BOBEAN, C.; PAVEL, V., **The study and modeling of a thermoelectric generator module**. The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electric Engineering, p. 1 – 4, maio 2013.
- BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 672p.
- CAILLAT, T., **STATUS OF SKUTTERUDITE – based segmented thermoelectric technology components development at JPL**. 23rd SYMPOSIUM ON SPACE NUCLEAR POWER AND PROPULSION. 2013
- Carros Infoco, Funcionamento e detalher do sistema elétrico automotivo, 2015. Disponível em: <http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2015/08/funcionamento-e-detahes-do-sistema-eletrico-automotivo/>. Acessado em 21 de outubro de 2016.

CARVALHO, Carlos Alfredo. **Estudo de viabilidade do aproveitamento do calor de escape para geração de energia elétrica em automóveis**. 2012. 68f. Tese (Mestrado de Engenharia Mecânica) Universidade de Taubaté.

COUTO, E. F., ALVES, L. M., **Medição do coeficiente Seebeck de amostras semicondutoras a base de Si-Ge**. VI SEMEL, Ponta Grossa – PR, 2009.

Datasheet TEG1-12611-6.0. Disponível em: <http://tecteg.com/wp-content/uploads/2014/09/SpecTEG1-12611-6.0TEG-POWERGENERATOR-new.pdf>. Acessado em 09 de outubro de 2016.

DUARTE, Guilherme Felipe Reis; Carlson, Brett Vern. **Geradores Termoelétricos Radioisotópicos**. 2005. 6p. Dissertação (Departamento de Física) Instituto Tecnológico da Aeronáutica.

DUTRA, N. G., MELO, S. R. **Estudo do aproveitamento dos gases de exaustão de um motor de combustão interna para geração de energia**. 2014. 127p. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade de Brasília.

EPE. **Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese** (ano 2016). Rio de Janeiro, RJ. 2016. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf. Acessado em 17 de outubro de 2016.

FARIAS, S. R. A., **Protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido: cogeração a gás**. 2009. 98p. Tese (Mestrado em ciência e engenharia do petróleo) Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

GLOBAL THERMOELECTRIC. **Case studies**: Grant County Education Service District. 2016. Disponível em: <http://www.genthermglobalpower.com/case-studies/grant-county-education-service-district-esd>. Acessado em: 16 de Setembro de 2016.

GÓMEZ, Luiz Alberto. **ECV 5240 Instrumentação de ensaio**. 2006. 11p. Universidade Federal de Santa Catarina.

GONÇALVES, L. M. **Microssistema termoelétrico baseado em telureto de bismuto e antimônio**. 2008. Tese (Doutorado em engenharia elétrica) Universidade de Minho, Guimarães, Portugal.

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

GOUPIL, C.; SEIFERT, W.; ZABROCKI, K.; MÜLLER, E.; SNYDER, G. J., **Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications**: Entropy. V.13. Agosto 2011. 1517p.

GM. **Verdade genuína:** Sistema de escapamento. AnoIV - Nº 37, Julho de 2012. Disponível em: http://www.novoservicochevrolet.com.br/template-distribuidores/pdf/GM_Julho_2012.pdf. Acessado em: 31 de Outubro de 2016.

HEIKES, R. R.; URE JUNIOR, R. W., **Thermoelectricity: Science and Engineering**. Interscience publisher's. 1961, 569 p., 1961.

HOPKINS, J., **Thermo-Eletric Generators. Julho 2008**. Disponível em: http://www.gogetpapers.com/Papers/Thermo_electric_effect/5. Acessado em: 05 de Janeiro de 2009.

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

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

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

Instituto Newton C. Braga, 2016. Tabela de resistividade de materiais. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/203-tabela-de-resistividades-de-materiais-.html>. Acessado em: 26 de setembro de 2016.

Instituto Newton C. Braga, 2016. Dissipadores de calor (ART208). Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/1405-art208>. Acessado em 29 de setembro de 2016.

ISMAIL, B. I.; AHMED, W. H., **Thermoelectric Power Generator Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology**. Recent Patents on Electrical Engineering, V. 2, p. 27 – 39, 2009.

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

KAO, P. H.; SHIH, P. J.; DAI, C. L.; LIU, M. C., **Fabrication and characterization of CMOS-MEMS Thermoelectric Micro Generators**. Sensors, n. 10, p. 1315-1325, 2010.

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

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

MONTEIRO, M. S. **Avaliação metrológica da estabilidade termoeétrica de termopar AuPt**. 2002. 70f. Dissertação (Mestrado Programa em Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial) – Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro.

National Aeronautics and Space Administration, 2016. A legacy of exploration. Disponível em: <http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm>. Acessado em: 20 de Setembro de 2016.

NEILD, A. B. Jr. **Portable thermoelectric generators**. SAE-645A. 1963.

NETO, Manuel R. B.; CARVALHO, Paulo. **Geração de energia elétrica**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012. 158p.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Electric Circuits**. 8. Ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 855p.

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

OLIVEIRA, K. S. M., **Avaliação numérica do desempenho termodinâmico de células termoeétricas**. 2014. 144p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) Universidade Federal do Paraná.

Pares termoeétricos (ART138). Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/952-pares-termoeetricos-art138>. Acessado em 26 de setembro de 2016.

PEREIRA, R. I. S., **Projeto e construção de sistema embarcado para monitoramento online via wifi aplicado à microgeração de módulos termoeétricos**. 2014. 98p. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) Universidade Federal do Ceará.

Portal Wikipédia, Efeito Peltier. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Peltier. Acessado em 24 de setembro de 2016.

Portal Wikipédia, Lei de Joule. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Joule. Acessado em 27 de setembro de 2016.

Portal Wikipédia, Radioisotope thermoelectric generator. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator. Acessado em: 20 de Setembro de 2016.

PUC-RIO – Certificação Digital N°0016225/CA. Termometria termelétrica. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3668/3668_5.PDF. Acessado em 28 de setembro de 2016.

ROCKENDORF, G.; SIILMAN, R.; PODLOWSKI, L.; LITZENBURGER, B., **PV-híbrido and thermoelectric collectors**, Solar energy, n. 67, p. 227-237, 2000.

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

ROWE, D. M., **Thermoelectrics, na environmentally-friendly source of electrical power.** Renewable Energy, 16, p. 1251-1256, 1999.

SANTANILLA, C. E. C. **Generación y aprovechamiento de energia termoeléctrica.** 2004. 61f. Tesis (Maestría em Ciencias e Física) – Universidad de Puerto Rico.

SANTOS, I. M. **Protótipo de uma unidade com tri-geração de energia para utilizações remotas:** aplicação de módulo semicondutivo gerador termoelétrico. 2007. 95f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SANTOS, L. P., **Análise de desempenho de um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck.** 2010. 48f. Tese (Mestrado de Engenharia Mecânica) Universidade de Taubaté.

SCHERRER, H.; VIKHOR, L.; LENOIR, B.; POINAS, P., **Solar thermoelectric generation bases on skutterudites.** Journal of Power Sources 115, p141-148. 2003

SILVERIO, L. B., **Análise de um condicionador de ar automotivo utilizando o efeito termoelétrico.** Dissertação de mestrado, DEM – Universidade de Taubaté – SP, 2011.

SOUZA, C. L. **Avaliação metrológica da estabilidade termoelétrica do termopar tipo K.** 2004. Tese (Mestrado de metrologia) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SOUZA, M. L. V. **Utilização de termogeradores como fonte de energia alternativa.** 2004. Graduação engenharia mecatrônica.

SuaPesquisa, Protocolo de Kyoto. Disponível em:

http://www.suapesquisa.com/geografia/protocolo_kyoto.htm. Acessado em 24 de outubro de 2016.

SNYDER, G. J. **Small thermoelectric generators.** The Electrochemical Society Interface, 54-56, 2008.

Termopares. Disponível em:

http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_introducao/. Acessado em 28 de setembro de 2016.

Thermoelectric Gencell Technology, TEG1-12611-6.0. Disponível em:

<http://tecteg.com/product/teg1-12611-6-0/>. Acessado em 22 de outubro de 2016.

VALLE, R. M., 2010. **Roteiro de aula prática nº2 – balanço térmico de motores.** Departamento de Engenharia mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.

Yang, Bao. **Thermoelectric technology assessment.** Maryland University, College Park. 2007.

ZHANG, Q. J.; TANG, X. F.; ZHAI, P. C.; NIINO, M.; ENDO, C. **Recent development in nano and graded thermoelectric materials,** Materials Science Forum, p. 492-493, 135-140, 2005.

ANEXO A – DADOS EXPERIMENTAIS DO MÓDULO 1

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
1	92,7	34	0,91	58,7	0,913	0,690	0,695
2	92,9	34,1	0,91	58,8	0,915	0,690	0,697
3	93,1	34,2	0,91	58,9	0,916	0,690	0,699
4	93,2	34,2	0,92	59	0,918	0,705	0,702
5	93,3	34,2	0,92	59,1	0,919	0,705	0,704
6	93,6	34,3	0,92	59,3	0,922	0,705	0,709
7	93,8	34,3	0,93	59,5	0,926	0,721	0,714
8	94	34,3	0,93	59,7	0,929	0,721	0,719
9	94,4	34,4	0,93	60	0,933	0,721	0,726
10	94,7	34,4	0,94	60,3	0,938	0,736	0,733
11	95,2	34,5	0,94	60,7	0,944	0,736	0,743
12	95,5	34,5	0,94	61	0,949	0,736	0,750
13	95,9	34,6	0,95	61,3	0,954	0,752	0,758
14	96,1	34,6	0,95	61,5	0,957	0,752	0,763
15	96,7	34,7	0,95	62	0,964	0,752	0,775
16	97,2	34,7	0,96	62,5	0,972	0,768	0,788
17	97,6	34,8	0,96	62,8	0,977	0,768	0,795
18	97,8	34,9	0,96	62,9	0,978	0,768	0,798
19	98,3	35,1	0,97	63,2	0,983	0,784	0,805
20	98,8	35,1	0,97	63,7	0,991	0,784	0,818
21	99,1	35,2	0,97	63,9	0,994	0,784	0,823
22	99,7	35,3	0,98	64,4	1,002	0,800	0,836
23	100,2	35,3	0,98	64,9	1,01	0,800	0,849
24	100,2	35,3	0,98	64,9	1,01	0,800	0,849
25	100,5	35,3	0,99	65,2	1,014	0,817	0,857
26	100,6	35,3	0,99	65,3	1,016	0,817	0,860
27	100,7	35,3	0,99	65,4	1,017	0,817	0,862
28	100,9	35,3	1	65,6	1,02	0,833	0,868
29	101	35,3	1	65,7	1,022	0,833	0,870
30	101	35,3	1	65,7	1,022	0,833	0,870
31	101,1	35,3	1	65,8	1,024	0,833	0,873
32	101,4	35,3	1,01	66,1	1,028	0,850	0,881
33	101,6	35,3	1,01	66,3	1,031	0,850	0,886
34	101,9	35,3	1,02	66,6	1,036	0,867	0,894
35	102,3	35,4	1,02	66,9	1,041	0,867	0,902
36	102,6	35,5	1,02	67,1	1,044	0,867	0,908
37	103,2	35,6	1,03	67,6	1,052	0,884	0,921
38	103,6	35,7	1,03	67,9	1,056	0,884	0,930
39	103,7	35,8	1,03	67,9	1,056	0,844	0,930
40	104,3	35,9	1,04	68,4	1,064	0,901	0,943
41	104,7	35,9	1,04	68,8	1,07	0,901	0,954
42	105,2	35,9	1,04	69,3	1,078	0,901	0,968
43	105,8	35,9	1,05	69,9	1,087	0,919	0,985

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
44	106,3	36	1,05	70,3	1,094	0,919	0,996
45	106,8	36,1	1,05	70,7	1,1	0,919	1,008
46	106,9	36,2	1,06	70,7	1,1	0,936	1,008
47	107,1	36,2	1,06	70,9	1,103	0,936	1,014
48	107,6	36,2	1,07	71,4	1,111	0,954	1,028
49	107,6	36,1	1,07	71,5	1,112	0,954	1,031
50	107,7	36,1	1,08	71,6	1,114	0,972	1,034
51	108,3	36,1	1,09	72,2	1,123	0,990	1,051
52	109,2	36,2	1,09	73	1,136	0,990	1,075
53	109,8	36,4	1,1	73,4	1,142	1,008	1,086
54	110,5	36,5	1,1	74	1,151	1,008	1,104
55	111,2	36,6	1,11	74,6	1,160	1,027	1,122
56	112,2	36,7	1,12	75,5	1,174	1,045	1,149
57	113	36,9	1,12	76,1	1,184	1,045	1,168
58	114	37,1	1,13	76,9	1,196	1,064	1,192
59	115	37,5	1,13	77,5	1,206	1,064	1,211
60	115,7	37,6	1,13	78,1	1,215	1,064	1,230
61	116,7	37,8	1,14	78,9	1,227	1,083	1,255
62	117,5	38,1	1,14	79,4	1,235	1,083	1,271
63	118,1	38,3	1,15	79,8	1,241	1,102	1,284
64	118,9	38,7	1,15	80,2	1,248	1,102	1,297
65	119,2	38,9	1,16	80,3	1,25	1,121	1,300
66	119,8	39	1,16	80,8	1,257	1,121	1,316
67	120,1	39,1	1,17	81	1,26	1,141	1,323
68	120,5	39	1,17	81,5	1,268	1,141	1,339
69	121	39	1,18	82	1,276	1,160	1,356
70	121,6	39,1	1,18	82,5	1,283	1,160	1,372
71	122,3	39,4	1,19	82,9	1,29	1,180	1,386
72	123	39,7	1,19	83,3	1,296	1,180	1,399
73	123,5	39,8	1,2	83,7	1,302	1,200	1,413
74	124	39,6	1,2	84,4	1,313	1,200	1,436
75	124,7	39,8	1,21	84,9	1,321	1,220	1,453
76	125,4	40,2	1,21	85,2	1,325	1,220	1,464
77	125,9	40,3	1,22	85,6	1,332	1,240	1,477
78	126,3	40,6	1,22	85,7	1,333	1,240	1,481
79	126,8	40,7	1,23	86,1	1,339	1,261	1,495
80	127,3	40,8	1,23	86,5	1,346	1,261	1,509
81	127,6	40,7	1,24	86,9	1,352	1,281	1,528
82	127,7	40,5	1,24	87,2	1,356	1,281	1,533
83	128	40,2	1,25	87,8	1,366	1,302	1,554
84	128,5	40,3	1,25	88,2	1,372	1,302	1,569
85	129	40,5	1,26	88,5	1,377	1,323	1,579
86	129,3	40,5	1,26	88,8	1,381	1,323	1,590
87	130	40,8	1,27	89,2	1,388	1,344	1,604
88	130,6	40,9	1,27	89,7	1,395	1,344	1,622

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
89	130,9	41	1,28	89,9	1,398	1,365	1,630
90	131,5	41,1	1,28	90,4	1,406	1,365	1,648
91	131,9	41,3	1,29	90,6	1,409	1,387	1,655
92	132,6	41,6	1,29	91	1,416	1,387	1,670
93	133,2	42	1,29	91,2	1,419	1,387	1,677
94	133,7	42,3	1,3	91,4	1,422	1,408	1,684
95	134,1	42,4	1,3	91,7	1,426	1,408	1,696
96	134,5	42,7	1,31	91,8	1,428	1,430	1,699
97	135	43	1,31	92	1,431	1,430	1,707
98	135,5	43,4	1,31	92,1	1,433	1,430	1,710
99	135,9	43,4	1,32	92,5	1,439	1,452	1,725
100	136,3	43,7	1,32	92,6	1,44	1,452	1,729
101	136,5	43,8	1,33	92,7	1,442	1,474	1,733
102	136,9	43,5	1,33	93,4	1,453	1,474	1,759
103	137,2	43,4	1,34	93,8	1,459	1,496	1,774
104	137,6	43,1	1,34	94,5	1,47	1,496	1,801
105	138	42,9	1,35	95,1	1,479	1,519	1,824
106	138,4	43	1,35	95,4	1,484	1,519	1,835
107	138,9	43,1	1,35	95,8	1,49	1,519	1,851
108	139,2	43	1,36	96,2	1,496	1,541	1,866
109	139,5	42,9	1,36	96,6	1,503	1,541	1,882
110	139,9	42,9	1,37	97	1,509	1,564	1,897
111	140,2	43	1,37	97,2	1,512	1,564	1,905
112	140,5	43,2	1,38	97,3	1,514	1,587	1,909
113	140,8	43,3	1,38	97,5	1,517	1,587	1,917
114	141,2	43,1	1,38	98,1	1,526	1,587	1,940
115	141,3	43,1	1,39	98,2	1,528	1,610	1,944
116	141,6	43,1	1,39	98,5	1,532	1,610	1,956
117	141,8	43	1,4	98,8	1,537	1,633	1,967
118	142,1	42,8	1,4	99,3	1,545	1,633	1,988
119	142,2	42,5	1,41	99,7	1,551	1,657	2,004
120	142,6	42,4	1,41	100,2	1,559	1,657	2,024
121	142,8	42,3	1,41	100,5	1,563	1,657	2,037
122	143,1	42,2	1,42	100,9	1,569	1,680	2,053
123	143,5	42,3	1,42	101,2	1,574	1,680	2,065
124	143,7	42,3	1,43	101,4	1,577	1,704	2,073
125	144,1	42,2	1,43	101,9	1,585	1,704	2,094
126	144,6	42,7	1,44	101,9	1,585	1,728	2,094
127	145	43,2	1,44	101,8	1,583	1,728	2,090
128	145,4	43,5	1,44	101,9	1,585	1,728	2,094
129	145,9	43,6	1,45	102,3	1,591	1,752	2,110
130	146,2	43,8	1,45	102,4	1,593	1,752	2,114
131	146,6	44	1,46	102,6	1,596	1,776	2,123
132	147	44,6	1,46	102,4	1,593	1,776	2,114
133	147,4	45	1,46	102,4	1,593	1,776	2,114

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
134	147,7	45,1	1,47	102,6	1,596	1,801	2,123
135	148	45,3	1,47	102,7	1,597	1,801	2,127
136	148,4	45,3	1,48	103,1	1,604	1,825	2,143
137	148,7	45,5	1,48	103,2	1,605	1,825	2,148
138	149	45,4	1,48	103,6	1,611	1,825	2,164
139	149,3	45,5	1,49	103,8	1,615	1,850	2,173
140	149,6	45,4	1,49	104,2	1,621	1,850	2,189
141	149,8	45,4	1,5	104,4	1,624	1,875	2,198
142	149,9	45	1,5	104,9	1,632	1,875	2,219
143	150,2	44,8	1,5	105,4	1,64	1,875	2,240
144	150,6	44,9	1,51	105,7	1,644	1,900	2,253
145	150,9	45	1,51	105,9	1,647	1,900	2,261
146	151,3	45,1	1,52	106,2	1,652	1,925	2,274
147	151,5	44,9	1,52	106,6	1,658	1,925	2,291
148	151,8	44,8	1,52	107	1,664	1,925	2,309
149	152	44,7	1,53	107,3	1,669	1,951	2,322
150	152,4	44,6	1,53	107,8	1,677	1,951	2,343
151	152,8	44,4	1,53	108,4	1,686	1,951	2,369
152	153,1	44,5	1,54	108,6	1,689	1,976	2,378
153	153,7	44,7	1,54	109	1,695	1,976	2,396
154	154,1	44,5	1,55	109,6	1,705	2,002	2,422
155	154,5	44,4	1,55	110,1	1,713	2,002	2,444
156	154,9	44,1	1,56	110,8	1,723	2,028	2,475
157	155	43,6	1,56	111,4	1,733	2,028	2,502
158	155,3	43,5	1,56	111,8	1,739	2,028	2,520
159	155,6	43,5	1,57	112,1	1,744	2,054	2,534
160	155,9	43,5	1,57	112,4	1,748	2,054	2,547
161	156	43,4	1,58	112,6	1,751	2,080	2,557
162	156,3	43,6	1,58	112,7	1,753	2,080	2,561
163	156,7	43,6	1,58	113,1	1,759	2,080	2,579
164	156,8	43,7	1,59	113,1	1,759	2,107	2,579
165	156,9	43,4	1,59	113,5	1,765	2,107	2,598
166	157	43,3	1,6	113,7	1,769	2,133	2,607
167	157	43,2	1,6	113,8	1,77	2,133	2,611
168	157	42,9	1,6	114,1	1,775	2,133	2,625
169	156,9	42,9	1,61	114	1,773	2,160	2,621
170	157,3	42,9	1,61	114,4	1,779	2,160	2,639
171	157,8	43,4	1,61	114,4	1,779	2,160	2,639
172	158,2	43,7	1,62	114,5	1,781	2,187	2,644
173	158,3	43,7	1,62	114,6	1,783	2,187	2,648
174	158,5	43,7	1,63	114,8	1,786	2,214	2,657
175	158,8	44,1	1,63	114,7	1,784	2,214	2,653
176	159,1	44,4	1,63	114,7	1,784	2,214	2,653
177	159,4	44,7	1,64	114,7	1,784	2,241	2,653
178	159,7	45,1	1,64	114,6	1,783	2,241	2,648

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
179	160	45,4	1,64	114,6	1,783	2,241	2,648
180	160,2	45,8	1,64	114,4	1,779	2,241	2,639
181	160,5	46	1,65	114,5	1,781	2,269	2,644
182	160,6	46,1	1,65	114,5	1,781	2,269	2,644
183	160,7	46,2	1,66	114,5	1,781	2,296	2,644
184	161	46,3	1,66	114,7	1,784	2,296	2,653
185	161,3	46,3	1,66	115	1,789	2,296	2,667
186	161,6	46,3	1,67	115,3	1,793	2,324	2,681
187	161,8	46,1	1,67	115,7	1,800	2,324	2,699
188	162,2	46,1	1,67	116,1	1,806	2,324	2,718
189	162,4	45,9	1,68	116,5	1,812	2,352	2,737
190	162,6	45,5	1,68	117,1	1,821	2,352	2,765
191	162,8	45,2	1,68	117,6	1,829	2,352	2,789
192	163	45	1,69	118	1,835	2,380	2,808
193	163,1	44,7	1,69	118,4	1,842	2,380	2,829
194	163,3	44,4	1,69	118,9	1,849	2,380	2,851
195	163,5	44,4	1,7	119,1	1,853	2,408	2,860
196	163,6	44,5	1,7	119,1	1,853	2,408	2,860
197	163,9	44,8	1,7	119,1	1,853	2,408	2,860
198	164,2	45,5	1,7	118,7	1,846	2,408	2,841
199	164,4	45,9	1,71	118,5	1,843	2,437	2,831
200	164,6	46,2	1,71	118,4	1,842	2,437	2,827
201	164,7	46	1,71	118,7	1,846	2,437	2,841
202	165	45,6	1,72	119,4	1,857	2,465	2,875
203	165,2	45,6	1,72	119,6	1,860	2,465	2,884
204	165,4	45,8	1,72	119,6	1,860	2,465	2,884
205	165,6	46	1,73	119,6	1,860	2,494	2,884
206	165,8	46	1,73	119,8	1,863	2,494	2,894
207	166	46,1	1,73	119,9	1,865	2,494	2,899
208	166	46,4	1,74	119,6	1,860	2,523	2,884
209	166,2	46,3	1,74	119,9	1,865	2,253	2,899
210	166,5	46,8	1,74	119,7	1,862	2,253	2,889
211	166,6	46,8	1,75	119,8	1,863	2,552	2,894
212	166,8	46,9	1,75	119,9	1,865	2,552	2,899
213	166,9	46,7	1,75	120,2	1,870	2,552	2,913
214	167,1	46,6	1,76	120,5	1,874	2,581	2,928
215	167,4	47	1,76	120,4	1,873	2,581	2,923
216	167,6	47,3	1,76	120,3	1,871	2,581	2,948
217	167,8	47,5	1,76	120,3	1,871	2,581	2,918
218	168,2	47,9	1,77	120,3	1,871	2,611	2,918
219	168,3	48,3	1,77	120	1,867	2,611	2,904
220	168,6	48,5	1,77	120,1	1,868	2,611	2,908
221	168,8	48,5	1,77	120,3	1,871	2,611	2,918
222	168,9	48,1	1,78	120,8	1,879	2,640	2,942
223	169,2	47,7	1,78	121,5	1,89	2,640	2,977

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
224	169,2	47,3	1,79	121,9	1,896	2,670	2,996
225	169,6	47,4	1,79	122,2	1,901	2,670	3,011
226	169,8	47,4	1,79	122,4	1,904	2,670	3,021
227	170,1	47,4	1,8	122,7	1,909	2,700	3,036
228	170,3	47,6	1,8	122,7	1,909	2,700	3,036
229	170,5	47,6	1,8	122,9	1,912	2,700	3,046
230	170,7	47,8	1,81	122,9	1,912	2,730	3,046
231	170,9	48	1,81	122,9	1,912	2,730	3,046
232	170,9	48,3	1,81	122,6	1,907	2,730	3,031
233	171	48,3	1,81	122,7	1,909	2,730	3,036
234	171,1	48,3	1,82	122,8	1,910	2,760	3,041
235	171,2	47,9	1,82	123,3	1,918	2,760	3,066
236	171,1	47,4	1,82	123,7	1,934	2,760	3,085
237	171,2	46,6	1,83	124,6	1,938	2,791	3,131
238	172,1	45,9	1,83	125,2	11,947	2,791	3,161
239	171,2	45,4	1,83	125,8	1,957	2,791	3,191
240	171,3	45	1,84	126,3	1,965	2,821	3,217
241	171,5	45	1,84	126,5	1,968	2,821	3,227
242	171,7	45,2	1,84	126,5	1,968	2,821	3,227
243	171,8	45,5	1,84	126,3	1,965	2,821	3,217
244	171,9	46	1,85	125,9	1,958	2,852	3,196
245	171,9	46,3	1,85	125,6	1,954	2,852	3,181
246	172	46,5	1,85	125,5	1,952	2,852	3,176
247	172,1	46,6	1,85	125,5	1,952	2,852	3,176
248	172,2	46,4	1,86	125,8	1,957	2,883	3,191
249	172,1	45,9	1,86	126,2	1,963	2,883	3,211
250	172,3	46	1,86	126,3	1,965	2,883	3,217
251	172,4	46,1	1,86	126,3	1,965	2,883	3,217
252	172,4	46,3	1,87	126,1	1,961	2,914	3,206
253	172,4	46,3	1,87	126,1	1,961	2,914	3,206
254	172,5	46,3	1,87	126,2	1,963	2,914	3,211
255	172,7	46,2	1,87	126,5	1,968	2,914	3,227
256	172,8	46,5	1,88	126,3	1,965	2,945	3,217
257	172,7	46,9	1,88	125,8	1,957	2,945	3,191
258	172,8	47,1	1,88	125,7	1,955	2,945	3,186
259	173	47,1	1,89	125,9	1,958	2,977	3,196
260	173,1	47,2	1,89	125,9	1,958	2,977	3,196
261	173,2	47,5	1,89	125,7	1,955	2,977	3,186
262	173,2	48	1,89	125,2	1,947	2,977	3,161
263	173,3	48,2	1,9	125,1	1,946	3,008	3,156
264	173,3	48,3	1,9	125	1,944	3,008	3,151
265	173,3	48,3	1,9	125	1,944	3,008	3,151
266	173,4	48,4	1,9	125	1,944	3,008	3,151
267	173,4	48,4	1,9	125	1,944	3,008	3,151
268	173,4	48,1	1,91	125,3	1,949	3,040	3,166

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	$\Delta T_{125,4}$ [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
269	173,3	47,9	1,91	125,4	1,951	3,040	3,171
270	173,5	47,4	1,91	126,1	1,961	3,040	3,206
271	173,6	47	1,92	126,6	1,969	3,072	3,232
272	173,6	46,5	1,92	127,1	1,977	3,072	3,257
273	173,6	46	1,92	127,6	1,985	3,072	3,283
274	173,4	45,5	1,92	127,9	1,989	3,072	3,299
275	173,6	45	1,93	128,6	2	3,104	3,335
276	173,8	45,1	1,93	128,7	2,002	3,104	3,340
277	173,9	46	1,93	127,9	1,989	3,104	3,299
278	174	46,7	1,94	127,3	1,980	3,136	3,268
279	174,1	47,1	1,94	127	1,975	3,136	3,252
280	174,2	47,4	1,94	126,8	1,972	3,136	3,242
281	174,2	47,9	1,94	126,3	1,965	3,136	3,217
282	174,2	47,7	1,95	126,5	1,968	3,169	3,227
283	174,3	47,7	1,95	126,6	1,969	3,169	3,232
284	174,4	47,8	1,95	126,6	1,969	3,169	3,232
285	174,4	47,6	1,95	126,8	1,972	3,169	3,242
286	174,4	47	1,96	127,4	1,982	3,201	3,273
287	174,3	46,4	1,96	127,9	1,989	3,201	3,299
288	174,3	45,9	1,96	128,4	1,997	3,201	3,324
289	174,6	45,2	1,97	129,4	2,013	3,234	3,376
290	174,8	45	1,97	129,8	2,019	3,234	3,397
291	175	45,1	1,97	129,9	2,021	3,234	3,403
292	175,4	45,1	1,98	130,3	2,027	3,267	3,423
293	175,8	45,4	1,98	130,4	2,028	3,267	3,429
294	176,3	45,5	1,98	130,8	2,035	3,267	3,450
295	176,4	45,8	1,98	130,6	2,031	3,267	3,439
296	176,8	46,1	1,99	130,7	2,033	3,300	3,445
297	177,2	46,5	1,99	130,7	2,033	3,300	3,445
298	177,5	46,7	1,99	130,8	2,035	3,300	3,450
299	177,9	46,9	2	131	2,038	3,333	3,460
300	178	47,2	2	130,8	2,035	3,333	3,450
301	178,2	47,2	2	131	2,038	3,333	3,460
302	178,4	47	2	131,4	2,044	3,333	3,482
303	178,7	47,3	2	131,4	2,044	3,333	3,482
304	178,9	47,2	2,01	131,7	2,049	3,367	3,497
305	179,1	46,9	2,01	132,2	2,056	3,367	3,524
306	179,3	47	2,01	132,3	2,058	3,367	2,529
307	179,5	47,3	2,01	132,2	2,056	3,367	3,524
308	179,6	47,5	2,02	132,1	2,055	3,400	3,519
309	179,8	47,6	2,02	132,2	2,056	3,400	3,524
310	179,9	47,8	2,02	132,1	2,055	3,400	3,519
311	180,1	48,1	2,02	132	2,053	3,400	3,513
312	180,3	48,2	2,03	132,1	2,055	3,434	3,519
313	180,2	48	2,03	132,2	2,056	3,434	3,524

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
314	180,1	47,9	2,03	132,2	2,056	3,434	3,524
315	180,1	47,6	2,04	132,5	2,061	3,468	3,540
316	180,1	47,1	2,04	133	2,069	3,468	3,567
317	180,2	46,5	2,04	133,7	2,080	3,468	3,604
318	180,3	46,4	2,05	133,9	2,083	3,502	3,615
319	180,5	46,4	2,05	134,1	2,086	3,502	3,626
320	180,6	46,3	2,05	134,3	2,089	3,502	3,637
321	180,7	46,6	2,06	134,1	2,086	3,536	3,626
322	180,9	46,9	2,06	134	2,084	3,536	3,621
323	181	47,2	2,06	133,8	2,081	3,536	3,610
324	181,1	47,4	2,06	133,7	2,080	3,536	3,604
325	181,2	47,7	2,07	133,5	2,077	3,571	3,594
326	181,3	47,9	2,07	133,4	2,075	3,571	3,588
327	181,2	47,6	2,07	133,6	2,078	3,571	3,599

Fonte: Adaptado de Dutra e Melo (2014) e próprio autor

ANEXO B – DADOS EXPERIMENTAIS DO MÓDULO 2

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
1	92,7	34	0,91	58,7	0,913	0,690	0,695
2	92,9	34,1	0,91	58,8	0,915	0,690	0,697
3	93,1	34,2	0,91	58,9	0,916	0,690	0,699
4	93,2	34,2	0,92	59	0,918	0,705	0,702
5	93,3	34,2	0,92	59,1	0,919	0,705	0,704
6	93,6	34,3	0,92	59,3	0,922	0,705	0,709
7	93,8	34,3	0,93	59,5	0,926	0,721	0,714
8	94	34,3	0,93	59,7	0,929	0,721	0,719
9	94,4	34,4	0,93	60	0,933	0,721	0,726
10	94,7	34,4	0,93	60,3	0,938	0,721	0,733
11	95,2	34,5	0,94	60,7	0,944	0,736	0,743
12	95,5	34,5	0,94	61	0,949	0,736	0,750
13	95,9	34,6	0,94	61,3	0,954	0,736	0,758
14	96,1	34,6	0,95	61,5	0,957	0,752	0,763
15	96,7	34,7	0,95	62	0,964	0,752	0,775
16	97,2	34,7	0,95	62,5	0,972	0,752	0,788
17	97,6	34,8	0,96	62,8	0,977	0,768	0,795
18	97,8	34,9	0,96	62,9	0,978	0,768	0,798
19	98,3	35,1	0,96	63,2	0,983	0,768	0,805
20	98,8	35,1	0,97	63,7	0,991	0,784	0,818
21	99,1	35,2	0,97	63,9	0,994	0,784	0,823
22	99,7	35,3	0,97	64,4	1,002	0,784	0,836
23	100,2	35,3	0,97	64,9	1,01	0,784	0,849
24	100,2	35,3	0,98	64,9	1,01	0,800	0,849
25	100,5	35,3	0,98	65,2	1,014	0,800	0,857
26	100,6	35,3	0,98	65,3	1,016	0,800	0,860
27	100,7	35,3	0,99	65,4	1,017	0,817	0,862
28	100,9	35,3	0,99	65,6	1,02	0,817	0,868
29	101	35,3	0,99	65,7	1,022	0,817	0,870
30	101	35,3	1	65,7	1,022	0,833	0,870
31	101,1	35,3	1	65,8	1,024	0,833	0,873
32	101,4	35,3	1	66,1	1,028	0,833	0,881
33	101,6	35,3	1,01	66,3	1,031	0,850	0,886
34	101,9	35,3	1,01	66,6	1,036	0,850	0,894
35	102,3	35,4	1,01	66,9	1,041	0,850	0,902
36	102,6	35,5	1,02	67,1	1,044	0,867	0,908
37	103,2	35,6	1,02	67,6	1,052	0,867	0,921
38	103,6	35,7	1,02	67,9	1,056	0,867	0,930
39	103,7	35,8	1,02	67,9	1,056	0,867	0,930
40	104,3	35,9	1,03	68,4	1,064	0,884	0,943
41	104,7	35,9	1,03	68,8	1,07	0,884	0,954
42	105,2	35,9	1,03	69,3	1,078	0,884	0,968
43	105,8	35,9	1,04	69,9	1,087	0,901	0,985

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
44	106,3	36	1,04	70,3	1,094	0,901	0,996
45	106,8	36,1	1,04	70,7	1,1	0,901	1,008
46	106,9	36,2	1,05	70,7	1,1	0,919	1,008
47	107,1	36,2	1,05	70,9	1,103	0,919	1,014
48	107,6	36,2	1,05	71,4	1,111	0,919	1,028
49	107,6	36,1	1,06	71,5	1,112	0,936	1,031
50	107,7	36,1	1,06	71,6	1,114	0,936	1,034
51	108,3	36,1	1,06	72,2	1,123	0,936	1,051
52	109,2	36,2	1,07	73	1,136	0,954	1,075
53	109,8	36,4	1,07	73,4	1,142	0,954	1,086
54	110,5	36,5	1,07	74	1,151	0,954	1,104
55	111,2	36,6	1,07	74,6	1,160	0,954	1,122
56	112,2	36,7	1,08	75,5	1,174	0,972	1,149
57	113	36,9	1,08	76,1	1,184	0,972	1,168
58	114	37,1	1,08	76,9	1,196	0,972	1,192
59	115	37,5	1,09	77,5	1,206	0,990	1,211
60	115,7	37,6	1,09	78,1	1,215	0,990	1,230
61	116,7	37,8	1,09	78,9	1,227	0,990	1,255
62	117,5	38,1	1,1	79,4	1,235	1,008	1,271
63	118,1	38,3	1,1	79,8	1,241	1,008	1,284
64	118,9	38,7	1,1	80,2	1,248	1,008	1,297
65	119,2	38,9	1,11	80,3	1,25	1,027	1,300
66	119,8	39	1,11	80,8	1,257	1,027	1,316
67	120,1	39,1	1,11	81	1,26	1,027	1,323
68	120,5	39	1,11	81,5	1,268	1,027	1,339
69	121	39	1,12	82	1,276	1,045	1,356
70	121,6	39,1	1,12	82,5	1,283	1,045	1,372
71	122,3	39,4	1,12	82,9	1,29	1,045	1,386
72	123	39,7	1,13	83,3	1,296	1,064	1,399
73	123,5	39,8	1,13	83,7	1,302	1,064	1,413
74	124	39,6	1,13	84,4	1,313	1,064	1,436
75	124,7	39,8	1,14	84,9	1,321	1,083	1,453
76	125,4	40,2	1,14	85,2	1,325	1,083	1,464
77	125,9	40,3	1,14	85,6	1,332	1,083	1,477
78	126,3	40,6	1,15	85,7	1,333	1,102	1,481
79	126,8	40,7	1,15	86,1	1,339	1,102	1,495
80	127,3	40,8	1,15	86,5	1,346	1,102	1,509
81	127,6	40,7	1,15	86,9	1,352	1,102	1,528
82	127,7	40,5	1,16	87,2	1,356	1,121	1,533
83	128	40,2	1,16	87,8	1,366	1,121	1,554
84	128,5	40,3	1,16	88,2	1,372	1,121	1,569
85	129	40,5	1,17	88,5	1,377	1,141	1,579
86	129,3	40,5	1,17	88,8	1,381	1,141	1,590
87	130	40,8	1,17	89,2	1,388	1,141	1,604
88	130,6	40,9	1,18	89,7	1,395	1,160	1,622

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
89	130,9	41	1,18	89,9	1,398	1,160	1,630
90	131,5	41,1	1,18	90,4	1,406	1,160	1,648
91	131,9	41,3	1,19	90,6	1,409	1,180	1,655
92	132,6	41,6	1,19	91	1,416	1,180	1,670
93	133,2	42	1,19	91,2	1,419	1,180	1,677
94	133,7	42,3	1,19	91,4	1,422	1,180	1,684
95	134,1	42,4	1,2	91,7	1,426	1,200	1,696
96	134,5	42,7	1,2	91,8	1,428	1,200	1,699
97	135	43	1,2	92	1,431	1,200	1,707
98	135,5	43,4	1,21	92,1	1,433	1,220	1,710
99	135,9	43,4	1,21	92,5	1,439	1,220	1,725
100	136,3	43,7	1,21	92,6	1,44	1,220	1,729
101	136,5	43,8	1,22	92,7	1,442	1,240	1,733
102	136,9	43,5	1,22	93,4	1,453	1,240	1,759
103	137,2	43,4	1,22	93,8	1,459	1,240	1,774
104	137,6	43,1	1,23	94,5	1,47	1,261	1,801
105	138	42,9	1,23	95,1	1,479	1,261	1,824
106	138,4	43	1,23	95,4	1,484	1,261	1,835
107	138,9	43,1	1,23	95,8	1,49	1,261	1,851
108	139,2	43	1,24	96,2	1,496	1,281	1,866
109	139,5	42,9	1,24	96,6	1,503	1,281	1,882
110	139,9	42,9	1,24	97	1,509	1,281	1,897
111	140,2	43	1,25	97,2	1,512	1,302	1,905
112	140,5	43,2	1,25	97,3	1,514	1,302	1,909
113	140,8	43,3	1,25	97,5	1,517	1,302	1,917
114	141,2	43,1	1,26	98,1	1,526	1,323	1,940
115	141,3	43,1	1,26	98,2	1,528	1,323	1,944
116	141,6	43,1	1,26	98,5	1,532	1,323	1,956
117	141,8	43	1,26	98,8	1,537	1,323	1,967
118	142,1	42,8	1,27	99,3	1,545	1,344	1,988
119	142,2	42,5	1,27	99,7	1,551	1,344	2,004
120	142,6	42,4	1,27	100,2	1,559	1,344	2,024
121	142,8	42,3	1,28	100,5	1,563	1,365	2,037
122	143,1	42,2	1,28	100,9	1,569	1,365	2,053
123	143,5	42,3	1,28	101,2	1,574	1,365	2,065
124	143,7	42,3	1,29	101,4	1,577	1,387	2,073
125	144,1	42,2	1,29	101,9	1,585	1,387	2,094
126	144,6	42,7	1,29	101,9	1,585	1,387	2,094
127	145	43,2	1,3	101,8	1,583	1,408	2,090
128	145,4	43,5	1,3	101,9	1,585	1,408	2,094
129	145,9	43,6	1,3	102,3	1,591	1,408	2,110
130	146,2	43,8	1,3	102,4	1,593	1,408	2,114
131	146,6	44	1,31	102,6	1,596	1,430	2,123
132	147	44,6	1,31	102,4	1,593	1,430	2,114
133	147,4	45	1,31	102,4	1,593	1,430	2,114

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
134	147,7	45,1	1,32	102,6	1,596	1,452	2,123
135	148	45,3	1,32	102,7	1,597	1,452	2,127
136	148,4	45,3	1,32	103,1	1,604	1,452	2,143
137	148,7	45,5	1,33	103,2	1,605	1,474	2,148
138	149	45,4	1,33	103,6	1,611	1,474	2,164
139	149,3	45,5	1,33	103,8	1,615	1,474	2,173
140	149,6	45,4	1,33	104,2	1,621	1,474	2,189
141	149,8	45,4	1,34	104,4	1,624	1,496	2,198
142	149,9	45	1,34	104,9	1,632	1,496	2,219
143	150,2	44,8	1,34	105,4	1,64	1,496	2,240
144	150,6	44,9	1,35	105,7	1,644	1,519	2,253
145	150,9	45	1,35	105,9	1,647	1,519	2,261
146	151,3	45,1	1,35	106,2	1,652	1,519	2,274
147	151,5	44,9	1,36	106,6	1,658	1,541	2,291
148	151,8	44,8	1,36	107	1,664	1,541	2,309
149	152	44,7	1,36	107,3	1,669	1,541	2,322
150	152,4	44,6	1,37	107,8	1,677	1,564	2,343
151	152,8	44,4	1,37	108,4	1,686	1,564	2,369
152	153,1	44,5	1,37	108,6	1,689	1,564	2,378
153	153,7	44,7	1,37	109	1,695	1,564	2,396
154	154,1	44,5	1,38	109,6	1,705	1,587	2,422
155	154,5	44,4	1,38	110,1	1,713	1,587	2,444
156	154,9	44,1	1,38	110,8	1,723	1,587	2,475
157	155	43,6	1,39	111,4	1,733	1,610	2,502
158	155,3	43,5	1,39	111,8	1,739	1,610	2,520
159	155,6	43,5	1,39	112,1	1,744	1,610	2,534
160	155,9	43,5	1,4	112,4	1,748	1,633	2,547
161	156	43,4	1,4	112,6	1,751	1,633	2,557
162	156,3	43,6	1,4	112,7	1,753	1,633	2,561
163	156,7	43,6	1,4	113,1	1,759	1,633	2,579
164	156,8	43,7	1,41	113,1	1,759	1,657	2,579
165	156,9	43,4	1,41	113,5	1,765	1,657	2,598
166	157	43,3	1,41	113,7	1,769	1,657	2,607
167	157	43,2	1,42	113,8	1,77	1,680	2,611
168	157	42,9	1,42	114,1	1,775	1,680	2,625
169	156,9	42,9	1,42	114	1,773	1,680	2,621
170	157,3	42,9	1,43	114,4	1,779	1,704	2,639
171	157,8	43,4	1,43	114,4	1,779	1,704	2,639
172	158,2	43,7	1,43	114,5	1,781	1,704	2,644
173	158,3	43,7	1,43	114,6	1,783	1,704	2,648
174	158,5	43,7	1,44	114,8	1,786	1,728	2,657
175	158,8	44,1	1,44	114,7	1,784	1,728	2,653
176	159,1	44,4	1,44	114,7	1,784	1,728	2,653
177	159,4	44,7	1,45	114,7	1,784	1,752	2,653
178	159,7	45,1	1,45	114,6	1,783	1,752	2,648

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
179	160	45,4	1,45	114,6	1,783	1,752	2,648
180	160,2	45,8	1,46	114,4	1,779	1,776	2,639
181	160,5	46	1,46	114,5	1,781	1,776	2,644
182	160,6	46,1	1,46	114,5	1,781	1,776	2,644
183	160,7	46,2	1,46	114,5	1,781	1,776	2,644
184	161	46,3	1,47	114,7	1,784	1,801	2,653
185	161,3	46,3	1,47	115	1,789	1,801	2,667
186	161,6	46,3	1,47	115,3	1,793	1,801	2,681
187	161,8	46,1	1,48	115,7	1,8	1,825	2,699
188	162,2	46,1	1,48	116,1	1,806	1,825	2,718
189	162,4	45,9	1,48	116,5	1,812	1,825	2,737
190	162,6	45,5	1,48	117,1	1,821	1,825	2,765
191	162,8	45,2	1,49	117,6	1,829	1,85	2,789
192	163	45	1,49	118	1,835	1,85	2,808
193	163,1	44,7	1,49	118,4	1,842	1,85	2,829
194	163,3	44,4	1,5	118,9	1,849	1,875	2,851
195	163,5	44,4	1,5	119,1	1,853	1,875	2,860
196	163,6	44,5	1,5	119,1	1,853	1,875	2,860
197	163,9	44,8	1,51	119,1	1,853	1,900	2,860
198	164,2	45,5	1,51	118,7	1,846	1,900	2,841
199	164,4	45,9	1,51	118,5	1,843	1,900	2,831
200	164,6	46,2	1,51	118,4	1,842	1,900	2,827
201	164,7	46	1,52	118,7	1,846	1,925	2,841
202	165	45,6	1,52	119,4	1,857	1,925	2,875
203	165,2	45,6	1,52	119,6	1,86	1,925	2,884
204	165,4	45,8	1,53	119,6	1,86	1,951	2,884
205	165,6	46	1,53	119,6	1,86	1,951	2,884
206	165,8	46	1,53	119,8	1,863	1,951	2,894
207	166	46,1	1,53	119,9	1,865	1,951	2,899
208	166	46,4	1,54	119,6	1,860	1,976	2,884
209	166,2	46,3	1,54	119,9	1,865	1,976	2,899
210	166,5	46,8	1,54	119,7	1,862	1,976	2,889
211	166,6	46,8	1,55	119,8	1,863	2,002	2,894
212	166,8	46,9	1,55	119,9	1,865	2,002	2,899
213	166,9	46,7	1,55	120,2	1,870	2,002	2,913
214	167,1	46,6	1,56	120,5	1,874	2,028	2,928
215	167,4	47	1,56	120,4	1,873	2,028	2,923
216	167,6	47,3	1,56	120,3	1,871	2,028	2,948
217	167,8	47,5	1,56	120,3	1,871	2,028	2,918
218	168,2	47,9	1,57	120,3	1,871	2,054	2,918
219	168,3	48,3	1,57	120	1,867	2,054	2,904
220	168,6	48,5	1,57	120,1	1,868	2,054	2,908
221	168,8	48,5	1,58	120,3	1,871	2,080	2,918
222	168,9	48,1	1,58	120,8	1,879	2,080	2,942
223	169,2	47,7	1,58	121,5	1,89	2,080	2,977

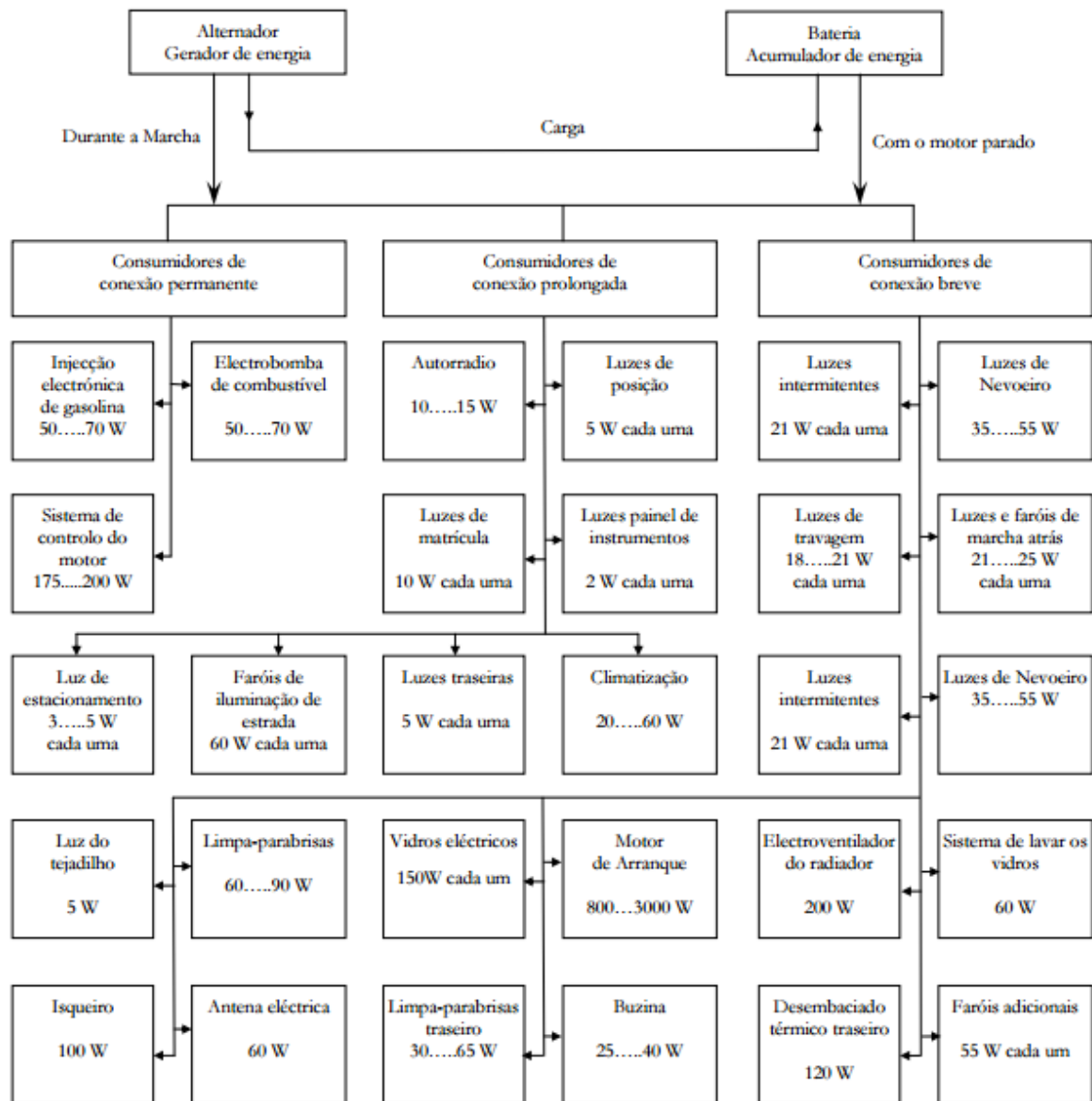
Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
224	169,2	47,3	1,59	121,9	1,896	2,107	2,996
225	169,6	47,4	1,59	122,2	1,901	2,107	3,011
226	169,8	47,4	1,59	122,4	1,904	2,107	3,021
227	170,1	47,4	1,59	122,7	1,909	2,107	3,036
228	170,3	47,6	1,6	122,7	1,909	2,133	3,036
229	170,5	47,6	1,6	122,9	1,912	2,133	3,046
230	170,7	47,8	1,6	122,9	1,912	2,133	3,046
231	170,9	48	1,61	122,9	1,912	2,160	3,046
232	170,9	48,3	1,61	122,6	1,907	2,160	3,031
233	171	48,3	1,61	122,7	1,909	2,160	3,036
234	171,1	48,3	1,61	122,8	1,910	2,160	3,041
235	171,2	47,9	1,62	123,3	1,918	2,187	3,066
236	171,1	47,4	1,62	123,7	1,934	2,187	3,085
237	171,2	46,6	1,62	124,6	1,938	2,187	3,131
238	172,1	45,9	1,63	125,2	11,947	2,214	3,161
239	171,2	45,4	1,63	125,8	1,957	2,214	3,191
240	171,3	45	1,63	126,3	1,965	2,214	3,217
241	171,5	45	1,64	126,5	1,968	2,241	3,227
242	171,7	45,2	1,64	126,5	1,968	2,241	3,227
243	171,8	45,5	1,64	126,3	1,965	2,241	3,217
244	171,9	46	1,64	125,9	1,958	2,241	3,196
245	171,9	46,3	1,65	125,6	1,954	2,269	3,181
246	172	46,5	1,65	125,5	1,952	2,269	3,176
247	172,1	46,6	1,65	125,5	1,952	2,269	3,176
248	172,2	46,4	1,66	125,8	1,957	2,296	3,191
249	172,1	45,9	1,66	126,2	1,963	2,296	3,211
250	172,3	46	1,66	126,3	1,965	2,296	3,217
251	172,4	46,1	1,66	126,3	1,965	2,296	3,217
252	172,4	46,3	1,67	126,1	1,961	2,324	3,206
253	172,4	46,3	1,67	126,1	1,961	2,324	3,206
254	172,5	46,3	1,67	126,2	1,963	2,324	3,211
255	172,7	46,2	1,68	126,5	1,968	2,352	3,227
256	172,8	46,5	1,68	126,3	1,965	2,352	3,217
257	172,7	46,9	1,68	125,8	1,957	2,352	3,191
258	172,8	47,1	1,69	125,7	1,955	2,380	3,186
259	173	47,1	1,69	125,9	1,958	2,380	3,196
260	173,1	47,2	1,69	125,9	1,958	2,380	3,196
261	173,2	47,5	1,69	125,7	1,955	2,380	3,186
262	173,2	48	1,7	125,2	1,947	2,408	3,161
263	173,3	48,2	1,7	125,1	1,946	2,408	3,156
264	173,3	48,3	1,7	125	1,944	2,408	3,151
265	173,3	48,3	1,71	125	1,944	2,437	3,151
266	173,4	48,4	1,71	125	1,944	2,437	3,151
267	173,4	48,4	1,71	125	1,944	2,437	3,151
268	173,4	48,1	1,71	125,3	1,949	2,437	3,166

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	$\Delta T_{125,4}$ [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
269	173,3	47,9	1,72	125,4	1,951	2,465	3,171
270	173,5	47,4	1,72	126,1	1,961	2,465	3,206
271	173,6	47	1,72	126,6	1,969	2,465	3,232
272	173,6	46,5	1,73	127,1	1,977	2,494	3,257
273	173,6	46	1,73	127,6	1,985	2,494	3,283
274	173,4	45,5	1,73	127,9	1,989	2,494	3,299
275	173,6	45	1,74	128,6	2	2,523	3,335
276	173,8	45,1	1,74	128,7	2,002	2,523	3,340
277	173,9	46	1,74	127,9	1,989	2,523	3,299
278	174	46,7	1,74	127,3	1,980	2,523	3,268
279	174,1	47,1	1,75	127	1,975	2,552	3,252
280	174,2	47,4	1,75	126,8	1,972	2,552	3,242
281	174,2	47,9	1,75	126,3	1,965	2,552	3,217
282	174,2	47,7	1,76	126,5	1,968	2,581	3,227
283	174,3	47,7	1,76	126,6	1,969	2,581	3,232
284	174,4	47,8	1,76	126,6	1,969	2,581	3,232
285	174,4	47,6	1,76	126,8	1,972	2,581	3,242
286	174,4	47	1,77	127,4	1,982	2,611	3,273
287	174,3	46,4	1,77	127,9	1,989	2,611	3,299
288	174,3	45,9	1,77	128,4	1,997	2,611	3,324
289	174,6	45,2	1,78	129,4	2,013	2,640	3,376
290	174,8	45	1,78	129,8	2,019	2,640	3,397
291	175	45,1	1,78	129,9	2,021	2,640	3,403
292	175,4	45,1	1,79	130,3	2,027	2,670	3,423
293	175,8	45,4	1,79	130,4	2,028	2,670	3,429
294	176,3	45,5	1,79	130,8	2,035	2,670	3,450
295	176,4	45,8	1,79	130,6	2,031	2,670	3,439
296	176,8	46,1	1,8	130,7	2,033	2,700	3,445
297	177,2	46,5	1,8	130,7	2,033	2,700	3,445
298	177,5	46,7	1,8	130,8	2,035	2,700	3,450
299	177,9	46,9	1,81	131	2,038	2,730	3,460
300	178	47,2	1,81	130,8	2,035	2,730	3,450
301	178,2	47,2	1,81	131	2,038	2,730	3,460
302	178,4	47	1,81	131,4	2,044	2,730	3,482
303	178,7	47,3	1,82	131,4	2,044	2,760	3,482
304	178,9	47,2	1,82	131,7	2,049	2,760	3,497
305	179,1	46,9	1,82	132,2	2,056	2,760	3,524
306	179,3	47	1,83	132,3	2,058	2,791	2,529
307	179,5	47,3	1,83	132,2	2,056	2,791	3,524
308	179,6	47,5	1,83	132,1	2,055	2,791	3,519
309	179,8	47,6	1,84	132,2	2,056	2,821	3,524
310	179,9	47,8	1,84	132,1	2,055	2,821	3,519
311	180,1	48,1	1,84	132	2,053	2,821	3,513
312	180,3	48,2	1,84	132,1	2,055	2,821	3,519
313	180,2	48	1,85	132,2	2,056	2,852	3,524

Amostra	Temperatura Lado quente [°C]	Temperatura Lado frio [°C]	Tensão módulo [V]	ΔT [°C]	Tensão teórica [V]	Potência módulo [W]	Potência teórica [W]
314	180,1	47,9	1,85	132,2	2,056	2,852	3,524
315	180,1	47,6	1,85	132,5	2,061	2,852	3,540
316	180,1	47,1	1,86	133	2,069	2,883	3,567
317	180,2	46,5	1,86	133,7	2,080	2,883	3,604
318	180,3	46,4	1,86	133,9	2,083	2,883	3,615
319	180,5	46,4	1,87	134,1	2,086	2,914	3,626
320	180,6	46,3	1,87	134,3	2,089	2,914	3,637
321	180,7	46,6	1,87	134,1	2,086	2,914	3,626
322	180,9	46,9	1,87	134	2,084	2,914	3,621
323	181	47,2	1,88	133,8	2,081	2,945	3,610
324	181,1	47,4	1,88	133,7	2,080	2,945	3,604
325	181,2	47,7	1,88	133,5	2,077	2,945	3,594
326	181,3	47,9	1,89	133,4	2,075	2,977	3,588
327	181,2	47,6	1,89	133,6	2,078	2,977	3,599

Fonte: Adaptado de Dutra e Melo (2014) e próprio autor

ANEXO C – SISTEMA DE CARGA



Fonte: Alves e Lourenço (2009)

ANEXO D – DATASHEET TEG1-12611-6.0

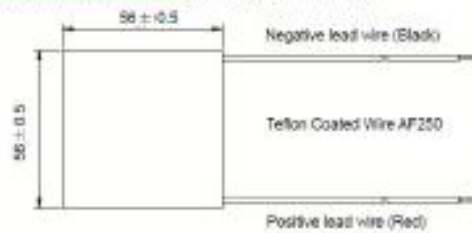
Specifications TEG Module TEG1-12611-6.0



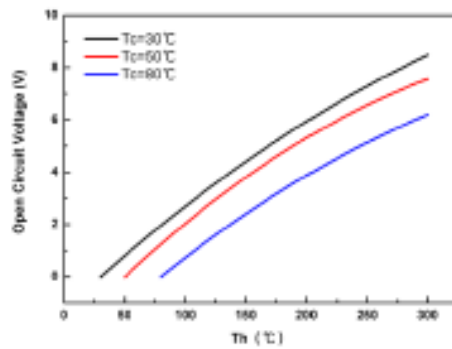
SNAPSHOT SPECIFICATION OF TEG1-12611-6.0

Hot Side Temperature (°C)	300
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	8.4
Matched Load Resistance (ohms)	1.2
Matched load output voltage (V)	4.2
Matched load output current (A)	3.4
Matched load output power (W)	14.6
Heat flow across the module(W)	~ 365
Heat flow density(W/cm ²)	~ 11.6
AC Resistance(ohms) Measured under 27 °C. at 1000Hz	0.5~0.7

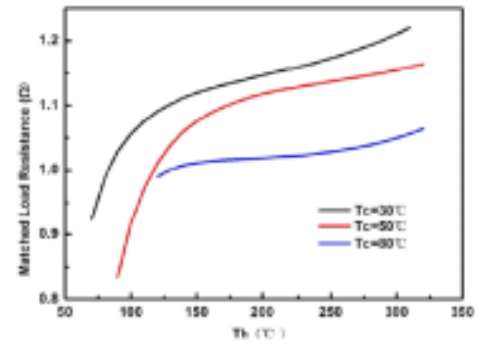
Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



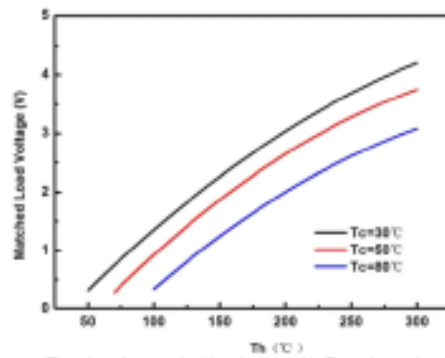
SNAPSHOT SPECIFICATION OF TEG1-12611-6.0



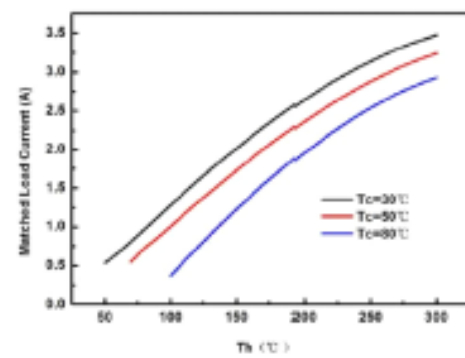
The chart for open circuit voltage Vs T_h under various T_c



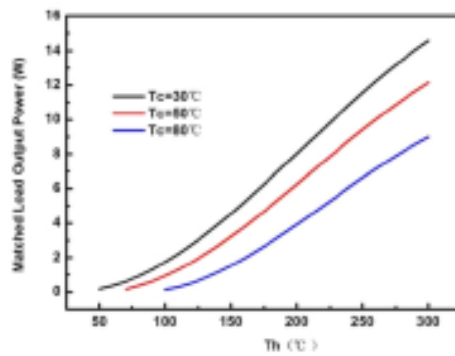
The chart for matched load resistance Vs T_h under various T_c



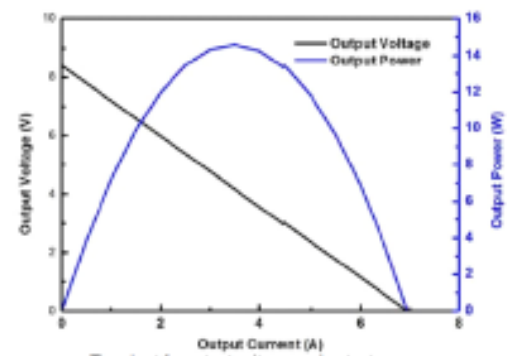
The chart for matched load voltage Vs T_h under various T_c



The chart for matched load current Vs T_h under various T_c



The chart for matched load output power Vs T_h under various T_c



The chart for output voltage and output power Vs output current under $T_h=300^\circ\text{C}$ and $T_c=30^\circ\text{C}$

Fonte: Datasheet TEG1-12611-6.0 (2016)