

Alessandro Cezario de Borba

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E ANALÍTICA DE GERADORES  
TERMOELÉTRICOS APLICADOS EM NANOSSATÉLITES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Vieira de Paiva

Joinville  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da  
UFSC.

Borba, Alessandro Cezario de  
Análise Experimental E Analítica De Geradores  
Termoelétricos Aplicados Em Nanossatélites /  
Alessandro Cezario de Borba ; orientador, Kleber  
Vieira de Paiva, 2019.  
211 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas,  
Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2.  
Termoeletricidade. 3. TEG/TEC. 4. CubeSat. 5.  
Geração de Energias Renováveis. I. Paiva, Kleber  
Vieira de. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e  
Ciências Mecânicas. III. Título.

Alessandro Cezario de Borba

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E ANALÍTICA DE GERADORES  
TERMOELÉTRICOS APLICADOS EM NANOSSATÉLITES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina

Joinville, 1 de março de 2019.

---

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Renato Oba, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.<sup>a</sup> Talita Sauter Possamai, Dr.<sup>a</sup>

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado ao meu pai  
Alvaro, a minha mãe Dirce e a minha  
esposa Katia.



## AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que superei e alcancei na vida.

Aos meus pais, Alvaro Ismael de Borba (*in memoriam*) e Dirce Mathias de Borba pelo exemplo, os ensinamentos, e a ótima educação que tive o privilégio de fruir. Agradeço a eles pelo incentivo aos estudos e ao trabalho qualidades que possibilitaram a realização deste trabalho.

Aos meus familiares pelo apoio e companheirismo.

À minha esposa Katia Regina Serra Corrêa de Borba, por sua paciência constante, apoio e compreensão durante toda a fase de preparação deste trabalho.

Ao professor Kleber Vieira de Paiva por sua orientação, compartilhando o seu conhecimento e experiência durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Anderson Wedderhoff Spengler e a todos os professores do mestrado da área de ciências térmicas que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

Para todo o pessoal do T2F em especial para André Luiz Alcantra Ostrufka e a Guilherme Lenfers.

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), pelo suporte logístico indispensável para a execução deste trabalho.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram com a realização deste trabalho.



"Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito.  
(Martin Luther King Jr, 1967) "



## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo experimental e analítico de geradores termoeletricos acoplados a um nanossatélite. Uma revisão bibliográfica foi realizada a respeito dos princípios físicos relacionados aos módulos termoeletricos, bem como métodos de modelagem com associação desses dispositivos. Uma bancada experimental para testes de dispositivos termoeletricos já construída é apresentada e uma nova seção de testes foi proposta. Os modelos analíticos desenvolvidos foram divididos em dois grandes grupos. O primeiro grupo de modelos avalia os efeitos de um gerador termoeletrico em temperaturas abaixo de 0 °C, permitindo prever o comportamento térmico e elétrico desses dispositivos. O segundo grupo avalia a energia gerada nas seis faces de um nanossatélite padrão CubeSat. Dentre esses modelos teóricos, destaca-se o modelo que introduz o conceito de condutividade térmica efetiva, evidenciando suas relações com as propriedades termoeletricas, fornecendo novas alternativas para a determinação de parâmetros de eficiência. Os resultados dos modelos foram comparados com resultados experimentais obtidos a partir de testes em laboratório. Verificou-se uma boa aderência entre os dados experimentais e teóricos, validando assim os modelos desenvolvidos.

**Palavras-chave:** Termoeletricidade, TEG/TEC, CubeSat, FloripaSat, geração de energias renováveis.



## ABSTRACT

In the present work an experimental and analytical study of thermoelectric generators for nanosatellite is presented. A literature review was made regarding the physical principles related to the thermoelectric modules, as well as modeling methods proposed by literature. An experimental test bench for already installed thermoelectric devices is presented and a new testing section has been proposed. The analytical models developed were divided into two major groups. The first group analysis the effects of a thermoelectric generator at temperatures below 0 °C, allowing to predict the thermal and electrical behavior of these devices. The second group evaluates the energy generated on the six faces of a CubeSat nanosatellite. Among these theoretical models, we highlight the model that introduces the concept of effective thermal conductivity, evidencing its relations with thermoelectric properties, providing new alternatives for the determination of efficiency parameters. The results of the models were compared with experimental results obtained from laboratory tests. The resulting data compared well with the models.

**Keywords:** Thermoelectricity, TEG / TEC, CubeSat, FloripaSat, renewable energy generation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cronologia com os principais cientistas e suas contribuições para área dos fenômenos Termoelétricos. ....	38
Figura 2 - Concentração de elétrons em um material termoelétrico.....	39
Figura 3 - Corrente em sentido contrário ao fluxo de calor no material termoelétrico. ....	40
Figura 4 - Efeito Seebeck. ....	41
Figura 5 - Efeito Peltier e Thomson. ....	43
Figura 6 - Número de mérito com a relação à temperatura para materiais termoelétricos. ....	46
Figura 7 - (a) Célula Unitária de uma Escuterudita. A descoberta foi determinada por Oftedal <i>et al.</i> 1928 (b), Célula unitária do $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . ....	48
Figura 8 - Condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck, condutividade térmica e número de mérito em função da temperatura para elemento tipo <i>p</i> . ....	50
Figura 9 - Condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck, condutividade térmica e número de mérito em função da temperatura para elemento tipo <i>n</i> . ....	51
Figura 10 - Detalhe da composição interna de um módulo termoelétrico operando como um TEG. ....	53
Figura 11 - Par termoelétrico, semicondutores tipo p e n de um gerador termoelétrico. ....	54
Figura 12 - Configuração de um Refrigerador Termoelétrico. ....	65
Figura 13 - Comparação de Geradores Segmentados e em Cascata. ....	66
Figura 14 - Gerador em cascata com 2 estágios. ....	66
Figura 15 - Eficiência intensiva reduzida x densidade de corrente reduzida. ....	69
Figura 16 - Eficiência x densidade de corrente reduzida. ....	69
Figura 17 - Diagrama de um único elemento de um gerador termoelétrico. ....	72
Figura 18 - Principais aplicações dos geradores termoelétricos. ....	76
Figura 19 - Tubo termoelétrico. ....	77
Figura 20 - Módulos termoelétricos orgânicos flexíveis. ....	77
Figura 21 Exaustores de gases de escapamento automobilísticos. ....	78
Figura 22 - Modelo do FloripaSat. ....	79
Figura 23 - Órbita do CubeSat obtida pelo STK. ....	80
Figura 24 - Inclinação orbital em satélites. ....	80
Figura 25 - Modelo do nanossatélite FloripaSat com vista explodida dos componentes. ....	81
Figura 26 - Fluxos de calor em satélite. ....	81

Figura 27 - Perfil de temperatura temporal para o ponto central das superfícies externas dos painéis solares para uma inclinação de 51.5°. 82	
Figura 28 - Fluxograma ilustrando a metodologia definida neste trabalho .....	83
Figura 29 - Fluxograma descrevendo as principais propostas deste trabalho. ....	87
Figura 30 - (a) Par Termoelétrico sem a presença de ar nas cavidades. (b) Modelo de resistência térmica equivalente. ....	92
Figura 31 - Modelo simplificado unidimensional para par termoelétrico (a) Ideal (b) Perdas por efeito Thomson Fonte: (a) e (b) Adaptado de Lee (2016). ....	94
Figura 32 - Fluxograma do modelo 1 simplificado para um gerador termoelétrico submetido a temperaturas abaixo de 0 °C. Existem duas divisões uma ideal e outra com perdas por efeito Thomson. ....	95
Figura 33 - Fluxograma do modelo simplificado para um gerador termoelétrico destinado a avaliações no CubeSat. Existem duas divisões uma ideal e outra com perdas por efeito Thomson. ....	96
Figura 34 - Modelo de global de um gerador termoelétrico a partir da condutividade térmica efetiva proposta por Baranowski; Snyder; Toberer. ....	100
Figura 35 - Modelo de condutividade térmica efetiva com efeitos Thomson proposta pelo autor. ....	105
Figura 36 - Modelo CTE. ....	107
Figura 37 - Modelo de condutividade térmica efetiva. ....	114
Figura 38 - Método CTE para determinação do número de pares. ....	124
Figura 39 - TEG 241-1.0-1.2. (a) Vista Externa. (b) Vista interna. ....	125
Figura 40 - Modelo TGPR 5W5V- 40S (a) Vista externa. (b) Imagem Interna. ....	126
Figura 41 - Módulo TGPR 10W4V-40S. (a) Vista externa. (b) Imagem Interna. ....	126
Figura 42 - Bancada de Testes 2018. ....	127
Figura 43 - Representação esquemática da bancada de testes. ....	128
Figura 44 - Bancada de testes em operação no laboratório T2F da Universidade Federal de Santa Catarina. ....	128
Figura 45 - Posição dos termopares na bancada. ....	129
Figura 46 - Configuração geral do aparato experimental. ....	130
Figura 47 - (a) Coeficiente de Seebeck x Temperatura para várias espessuras de Telureto de Bismuto, (b) Seebeck x Temperatura para materiais anisotrópicos do tipo p e n. ....	134
Figura 48 - Coeficientes de Seebeck, p e n, normalizados a partir de 260 K. ....	135

Figura 49 - (a) Resistividade elétrica em função da Temperatura para diferentes espessuras do Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , as diferentes cores representam as espessuras. (b) Curvas Extrapolação dos dados da resistividade elétrica a partir de 260 K para elementos <i>p</i> e <i>n</i> .....	136
Figura 50 - Condutividade térmica em função da temperatura. ....	137
Figura 51 - Condutividade Térmica, <i>p</i> e <i>n</i> , para os valores a partir de 260 K.....	138
Figura 52 - Resultados para os elementos do tipo <i>p</i> do Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , (a) Máxima Eficiência Reduzida e Eficiência Reduzida, (b) <i>s</i> e <i>u</i> (c) <i>zT</i> (d) <i>ZT</i> ...	140
Figura 53 - Resultados para os elementos do tipo <i>n</i> do Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , a) Máxima Eficiência Reduzida e Eficiência Reduzida, (b) <i>s</i> e <i>u</i> (c) <i>zT</i> (d) <i>ZT</i> ...	141
Figura 54 - Fluxograma das avaliações nos TEG's 10 W e 5W. ....	144
Figura 55 - Avaliação da tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo-se a temperatura da face fria em 260 K. ....	145
Figura 56 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 273 K. ....	147
Figura 57 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 283 K. ....	147
Figura 58 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 293 K. ....	148
Figura 59 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 260 K. ....	149
Figura 60 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 273 K. ....	150
Figura 61 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 283 K. ....	150
Figura 62 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 293 K. ....	151
Figura 63 - Avaliação das temperaturas superior, inferior e média durante a órbita do nanossatélite para o painel solar 1.....	152
Figura 64 - Variação da temperatura durante a jornada do TEG na face 1. ....	153
Figura 65 - Fluxograma das ações experimentais e teóricas. ....	154
Figura 66 - Resistências elétricas em função da temperatura média do TEG.....	155
Figura 67 - Validação da tensão máxima teórica sugerida pelo modelo 4 na célula 1. ....	156
Figura 68 - Comportamento da tensão elétrica máxima em função do tempo para um satélite em órbita utilizando um gerador termoelétrico. Avaliação com o modelo 1 na célula 1.....	157

Figura 69 - Tensões máximas e tensões de saída em função do tempo, modelo 1, célula 1, durante a órbita do satélite.....	160
Figura 70 - Comparação entre as tensões de saída experimental e as tensões de saídas, utilizando os conceitos de condutividade térmica efetiva, modelo 4, a partir de três tipos de resistências elétricas selecionadas e distintas na célula 1.....	160
Figura 71 - Potência elétrica em função do tempo experimental e teórica do modelo 1 na célula 1.....	161
Figura 72 - Comparativo da potência de saída utilizando conceitos de condutividade térmica efetiva, modelo 4 na célula 1, com relação aos dados experimentais.....	162
Figura 73 - Potência elétrica máxima experimental e potência elétrica teórica do modelo 1 ideal e com perdas (efeito Thomson) na célula 1.....	163
Figura 74 - Potência elétrica máxima experimental e potência elétrica teórica do modelo 4.....	164
Figura 75 - Estimativa das condutividades térmicas em função do tempo para os modelos propostos.....	165
Figura 76 - Comparativos entre as taxas de transferências de calor do modelo 1 em relação ao experimental.....	168
Figura 77 - Transferência de calor do modelo 1 em relação ao experimental.....	169
Figura 78 - Transferência de calor na face inferior da célula 1 do TEG durante a órbita do satélite. Comparação entre o modelo 3 e o experimental.....	169
Figura 79 - Transferência de calor na face inferior da célula 1 do TEG durante a órbita do satélite. Comparação entre o modelo 4 e o experimental.....	170
Figura 80 - Transferência de calor experimental, Fourier e comparação com o modelo de CTE.....	171
Figura 81 - Rendimentos na célula 1 do CubeSat em órbita.....	171
Figura 82 - Avaliação na face 1 das Figuras de mérito do dispositivo e número de mérito do material durante a órbita.....	172
Figura 83 - Número de pares avaliados com os dados do satélite em órbita na face 1 a partir do modelo 5.....	173
Figura 84 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10 $\Omega$ na célula 1 em função do tempo.....	175
Figura 85 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10 $\Omega$ na célula 2 em função do tempo.....	176
Figura 86 - Potências máxima e de saída na célula 3 em função do tempo.....	177

Figura 87 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10 $\Omega$ na célula 4 em função do tempo.....	178
Figura 88 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10 $\Omega$ na célula 5 em função do tempo.....	178
Figura 89 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10 $\Omega$ na célula 6 em função do tempo.....	179
Figura 90 - Par termoelétrico. ....	198
Figura 91 - Condutividade Térmica da Alumina x Temperatura. ....	199
Figura 92 - Valores extrapolados a partir de 260 K. Coeficiente de Seebeck, Condutividade térmica e resistividade elétrica em função da temperatura para os elementos p e n. Elemento <b>p</b> a esquerda com área gráfica em cinza e elemento <b>n</b> a direita com área gráfica em branco..	204
Figura 93 - Incerteza na potência durante a órbita do satélite na face 1. ....	209
Figura 94 - Folha de dados com especificações de performance. ....	210
Figura 95 - Principais propriedades termoelétricas do Telureto de Bismuto para elementos do tipo p e n. ....	211



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Abrangência do modelo teórico. ....	85
Tabela 2 - Detalhes dos modelos teóricos em relação ao grupo e os objetivos. ....	88
Tabela 3 - Modelos teóricos e suas respectivas equações. ....	89
Tabela 4 - Parâmetros geométricos do TEG, semicondutores p-n, Alumina, contatos elétricos de cobre. ....	90
Tabela 5 - Características dos Geradores Termoelétricos TEGpro™. Medidas aproximadas. ....	90
Tabela 6 - Demonstração das variações de temperatura externa e interna do TEG para TGPR 5W-5V-40S mantidas as respectivas temperaturas na face fria e elevando-se a temperatura em outra face .....	143
Tabela 7 - Potência geradas em cada face de um CubeSat. ....	180
Tabela 8 - Energia produzida nas faces do nanossatélite .....	180
Tabela 9 – Propriedades do Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> estimada a partir de 260 K para o tipo p. ....	203
Tabela 10 - Propriedades do Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> estimada a partir de 260 K para o tipo n. ....	203
Tabela 11 - Coeficiente de Seebeck, Resistividade elétrica e condutividade térmica em função da temperatura em [K] para elemento tipo <i>p</i> e <i>n</i> . ....	205
Tabela 12 - Tensões elétricas em circuito aberto avaliadas no TEG 5W-5V-40S. ....	206
Tabela 13 - Tensões elétricas em circuito aberto avaliadas no TEG 10W-4V-40S. ....	207
Tabela 14 - Dados do Fabricante para elementos do tipo p e n. ....	210



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTE	–	Conductividade térmica efetiva
CUBESAT	–	Acrônimo das palavras em inglês Cube e Satellite – Cubo e Satélite
EES	–	Engineering Equation Solver
LABVIEW	–	Acrônimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
NASA		National Aeronautics and Space Administration
MAPLE	–	Sistema Algébrico Computacional
PID	–	Controlador Proporcional Integral Derivativo
Pós-ECM	–	Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas
PWM	–	Pulse Width Modulation, modulação por largura de pulso
RTG	–	Gerador Termoelétrico de Radioisótopos
TEC	–	Refrigerador Termoelétrico
TEG	–	Gerador Termoelétrico
T2F	–	Thermal Fluid Flow
UFSC	–	Universidade Federal de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Alfabeto Latino

$A$	área, área seção transversal	[m <sup>2</sup> ]
$A_e$	área efetiva	[m <sup>2</sup> ]
$A_s$	área da superfície	[m <sup>2</sup> ]
$B$	razão de mérito	[-]
$c$	constante	[-]
$c_p$	calor específico a pressão constante	[J/kgK]
$E$	campo elétrico	[V/m]
$e$	carga elétrica	[C]
$Gr_L$	número de Grashof	[-]
$g$	aceleração gravitacional	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_c$	condutância térmica de contato	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_{comb}$	coeficiente de transferência de calor combinado	[W/m <sup>2</sup> K]
$h_{leg}$	altura da seção transversal do bloco semiconductor	[mm]
$h_r$	coeficiente de transferência de calor por radiação	[W/m <sup>2</sup> K]
$I$	corrente elétrica	[A]
$J$	densidade de corrente	[A/m <sup>2</sup> ]
$K$	condutância térmica	[W/m <sup>2</sup> K]
$k$	condutividade térmica	[W/mK]
$\bar{k}$	condutividade térmica média	[W/mK]
$k_B$	constante de Boltzmann	[J/K]
$k_e$	condutividade térmica eletrônica	[W/mK]
$k_{ef}$	condutividade térmica efetiva	[W/mK]
$k_{efh}$	condutividade térmica efetiva na face quente	[W/mK]
$k_{efc}$	condutividade térmica efetiva na face fria	[W/mK]
$k_f$	condutividade térmica fonônica	[W/mK]
$k_g$	constante	[-]
$k_s$	condutividade térmica efetiva proposta por Snyder	[W/mK]
$k_{sm}$	condutividade térmica efetiva de Snyder modificada	[W/mK]

$k_{\tau}$	condutividade térmica equivalente com efeito Thomson	[W/mK]
$k_{\perp}$	condutividade térmica total no plano perpendicular	[W/mK]
$L, l$	comprimento	[m]
$L_c$	comprimento característico da geometria	[m]
$L_o$	número de Lorentz	[W $\Omega$ /K <sup>2</sup> ]
$M$	razão entre resistências elétricas	[M]
$Nu$	número de Nusselt	[-]
$n$	número de pares	[-]
<b>n</b>	elemento semiconductor do tipo n	[-]
$P$	potência elétrica	[W]
$Pr$	número de Prandtl	[-]
<b>p</b>	elemento semiconductor do tipo p	[-]
$Q$	calor total transferido	[J]
$\dot{Q}$	taxa de transferência de calor	[W]
$q$	carga elétrica	[C]
$\dot{q}$	fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_g$	geração de calor volumétrica	[W/m <sup>3</sup> ]
$R$	resistência elétrica	[ $\Omega$ ]
$R_A$	resistência elétrica do TEG proposta Audiffred	[ $\Omega$ ]
$R_B$	resistência elétrica do TEG com dados do fabricante	[ $\Omega$ ]
$R_c$	resistência elétrica do TEG a partir dos dados do fabricante mais a influência dos contatos elétricos	[ $\Omega$ ]
$R_L$	resistência elétrica da carga externa	[ $\Omega$ ]
$Ra_L$	número de Rayleigh	[-]
$R_{eq}$	resistência elétrica equivalente	[ $\Omega$ ]
$R_{in}$	resistência interna total do dispositivo termoelétrico	[ $\Omega$ ]
$s$	fator de compatibilidade	[1/V]
$T$	temperatura	[K]
$\bar{T}$	temperatura média	[K]
$T_c$	temperatura fonte fria	[K]
$T_f$	temperatura do filme	[K]
$T_j$	temperatura da junção Alumina-contato elétrico	[K]
$T_h$	temperatura fonte quente	[K]

$T_s$	temperatura da superfície	[K]
$T_1$	temperatura na face quente do substrato cerâmico	[K]
$T_2$	temperatura na face fria do substrato cerâmico	[K]
$T_\infty$	temperatura do fluido	[K]
$t$	tempo	[s]
$U$	coeficiente global de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> K]
$u$	densidade de corrente reduzida	[1/V]
$V$	tensão elétrica, tensão de $n$ pares	[V]
$w_{leg}$	largura da seção transversal do bloco semiconductor	[mm]
$Z$	número de mérito do módulo termoeletrico	[1/K]
$ZT$	número de mérito adimensional do módulo termoeletrico	[-]
$z$	número de mérito de um material termoeletrico	[1/K]
$zT$	número de mérito adimensional de um material termoeletrico	[-]
$\overline{zT}$	número de mérito adimensional médio de um par termoeletrico	[-]

### Alfabeto Grego

$\alpha$	coeficiente de Seebeck diferencial	[V/K]
$\alpha_A$	coeficiente de Seebeck material A	[V/K]
$\alpha_B$	coeficiente de Seebeck material B	[V/K]
$\alpha_T$	difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	coeficiente de expansão volumétrica	[1/K]
$\Delta$	variação de quantidade finita	[-]
$\delta$	incerteza	[-]
$\varepsilon$	emissividade	[-]
$\eta$	eficiência real	[-]
$\eta_c$	eficiência de Carnot	[-]
$\eta_{max}$	eficiência máxima de conversão	[-]
$\eta_{mp}$	eficiência máxima	[-]
$\eta_r$	eficiência reduzida	[-]
$\eta_{r_{max}}$	eficiência reduzida local máxima	[-]
$\eta_{th}$	eficiência térmica ou de conversão	[-]
$\theta$	resistência térmica	[m <sup>2</sup> K/W]

$\theta_{alum}$	resistência térmica do substrato de alumina	$[m^2K/W]$
$\theta_c^n$	resistência térmica de contato	$[m^2K/W]$
$\mu$	densidade	$[kg/m^3]$
$\nu$	viscosidade cinemática do fluido	$[m^2/s]$
$\pi$	coeficiente de Peltier diferencial	$[V]$
$\pi_A$	coeficiente de Peltier material A	$[V]$
$\pi_B$	coeficiente de Peltier material B	$[V]$
$\rho$	resistividade elétrica	$[\Omega m]$
$\rho_j^n$	resistividade elétrica de contato na junção	$[\Omega m^2]$
$\sigma$	condutividade elétrica	$[1/\Omega m]$
$\tau$	coeficiente de Thomson diferencial	$[V/K]$
$\tau_A$	coeficiente de Thomson material A	$[V/K]$
$\tau_B$	coeficiente de Thomson material B	$[V/K]$
$\Phi$	potencial Termoelétrico	$[V]$

## Índices

ap	circuito aberto com perdas
alum	alumina, substrato cerâmico
c	frio, face fria, constante
ca	circuito aberto
cond	condução
conv	convecção
ef	efetiva
el	eletrônica
emiss	emissão
exp	experimental
ext	extrapolado
f	fonônica, filme, final
i	inicial
inf	inferior
h	quente, face quente
J	junção
Joule	Efeito Joule
leg	perna, bloco termoelétrico
m	modificado
max	máximo

med	médio
n	elemento semiconductor do tipo n, enésimo
Peltier	efeito Peltier
p	elemento semiconductor do tipo p, perdas por efeito Thomson, pico
rad	radiação
sup	superior
s	superfície, saída
$s_{exp}$	saída experimental
$s_p$	saída com perdas
$\tau$	efeito Thomson
T	total
TEG	gerador termoelétrico
v	variável
x, $x$	direção x
y	direção y
z	direção z
$\perp$	transversal
$\infty$	longe de uma superfície; condições de escoamento livre

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>33</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	34
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo específico .....</b>	<b>34</b>
1.2	JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES .....	35
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	35
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>37</b>
2.1	HISTÓRICO DA TERMOELETRICIDADE.....	37
2.2	FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS .....	39
<b>2.2.1</b>	<b>Efeito Seebeck .....</b>	<b>40</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Efeito Peltier.....</b>	<b>42</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Efeito Thomson .....</b>	<b>43</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Efeito Joule .....</b>	<b>44</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Relações entre coeficientes termoeletricos.....</b>	<b>44</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Número de mérito (z).....</b>	<b>45</b>
2.3	MATERIAIS TERMOELÉTRICOS.....	47
<b>2.3.1</b>	<b>Propriedades dos <math>\text{Bi}_2\text{Te}_3</math> para o tipo <math>p</math> .....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Propriedades dos <math>\text{Bi}_2\text{Te}_3</math> para o tipo <math>n</math>.....</b>	<b>51</b>
2.4	DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS.....	52
<b>2.4.1</b>	<b>Gerador termoeletrico (TEG).....</b>	<b>53</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Gerador termoeletrico com efeito Thomson.....</b>	<b>61</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Refrigerador termoeletrico (TEC) .....</b>	<b>64</b>
2.5	EFICIÊNCIA TERMOELÉTRICA E COMPATIBILIDADE .....	65
<b>2.5.1</b>	<b>Geradores segmentados e em cascata.....</b>	<b>65</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Eficiência intensiva reduzida .....</b>	<b>67</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Equação de calor em termos de <math>u</math>.....</b>	<b>71</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Solução numérica da densidade de corrente reduzida ....</b>	<b>73</b>
<b>2.5.5</b>	<b>Potencial termoeletrico.....</b>	<b>74</b>
<b>2.5.6</b>	<b>Eficiência reduzida local máxima .....</b>	<b>75</b>
<b>2.5.7</b>	<b>31 Eficiência de conversão ou térmica .....</b>	<b>75</b>
<b>2.5.8</b>	<b>Eficiência máxima de um gerador termoeletrico .....</b>	<b>75</b>
2.6	APLICAÇÕES DE GERADORES TERMOELÉTRICOS.....	76
2.7	CUBESAT.....	78
<b>2.7.1</b>	<b>FloripaSat .....</b>	<b>78</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Avaliação dos gradientes de temperatura do CubeSat ....</b>	<b>82</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>83</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE TEÓRICA .....</b>	<b>84</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TEG'S .....	90
4.2	CONSIDERAÇÕES TÉRMICAS .....	91
<b>4.2.1</b>	<b>Temperatura média .....</b>	<b>91</b>

4.2.2	<b>Varição de temperatura em geradores termoelétricos...</b>	<b>92</b>
4.3	MODELO 1 - MODELO SIMPLIFICADO PARA UM TEG ....	93
4.4	MODELO 2 – MODELO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA PROPOSTA POR BARANOWSKI; SNYDER; TOBERER PARA UM TEG .....	97
4.5	MODELO 3 - MODELO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE COM EFEITOS THOMSON.....	100
4.6	MODELO 4 - MODELO GLOBAL DE UM TEG A PARTIR DA CTE	105
4.6.1	<b>Modelo de condutividade térmica efetiva – CTE .....</b>	<b>108</b>
4.7	MODELO 5 - MÉTODO DA CTE PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PARES DE UM TEG.....	121
5	<b>ANÁLISE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>125</b>
5.1	A BANCADA EXPERIMENTAL .....	125
5.1.1	<b>Os modelos de TEG.....</b>	<b>125</b>
5.1.2	<b>Bancada de teste .....</b>	<b>126</b>
5.1.3	<b>Procedimento de teste .....</b>	<b>130</b>
5.1.4	<b>Limites físicos da bancada de testes.....</b>	<b>131</b>
5.2	ANÁLISE DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS .....	132
6	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>133</b>
6.1	PROPRIEDADES DO MATERIAL $Bi_2T_3$ .....	133
6.1.1	<b>Extrapolação e validação das propriedades dos elementos p e n</b>	<b>134</b>
6.1.2	<b>Avaliação das propriedades do Telureto de bismuto partir de temperaturas de 260 K.....</b>	<b>138</b>
6.2	GRADIENTES DE TEMPERATURA EM GERADORES TERMOELÉTRICOS .....	142
6.3	DESEMPENHO DOS TEGs DE 5 E 10 W – MODELO 1 .....	143
6.3.1	<b>Avaliação TEG 5W .....</b>	<b>145</b>
6.3.2	<b>Avaliação TEG 10 W .....</b>	<b>148</b>
6.4	RESULTADOS CUBESAT .....	151
6.4.1	<b>Avaliação dos gradientes de temperatura sobre o TEG no interior de um CubeSat.....</b>	<b>152</b>
6.4.2	<b>Fluxograma.....</b>	<b>153</b>
6.4.3	<b>Avaliação das resistências elétricas do TEG.....</b>	<b>155</b>
6.4.4	<b>Tensão máxima - circuito aberto .....</b>	<b>156</b>
6.4.5	<b>Tensão de saída – circuito fechado .....</b>	<b>158</b>
6.4.6	<b>Taxa de transferência de calor.....</b>	<b>165</b>
6.4.7	<b>Transferência de calor a partir de CTE – modelo 4 .....</b>	<b>170</b>
6.4.8	<b>Rendimentos .....</b>	<b>171</b>
6.4.9	<b>Número de mérito .....</b>	<b>172</b>

<b>6.4.10</b>	<b>Determinação do número de pares – modelo 5 .....</b>	<b>173</b>
6.5	RESULTADOS NAS 6 FACES DO CUBESAT – MODELO 1 174	
<b>6.5.1</b>	<b>Potências de saída e máxima nas faces do nanossatélite</b>	<b>174</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Energia gerada nas faces do nanossatélite .....</b>	<b>179</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>181</b>
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	187
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>189</b>
	<b>APÊNDICE A – FENÔMENOS ELÉTRICOS .....</b>	<b>198</b>
<b>A.1</b>	<b>RESISTÊNCIA ELÉTRICA E DE CONTATOS ELÉTRICOS .....</b>	<b>198</b>
	<b>APÊNDICE B – FENÔMENOS TÉRMICOS .....</b>	<b>199</b>
<b>B.1</b>	<b>CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO <math>Al_2O_3</math> .....</b>	<b>199</b>
<b>B.2</b>	<b>CORRELAÇÕES TÉRMICAS .....</b>	<b>199</b>
	<b>APÊNDICE C – FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS .....</b>	<b>200</b>
<b>C.1</b>	<b>PRINCIPAIS PROPRIEDADES .....</b>	<b>200</b>
<b>C.2</b>	<b>CONDUTIVIDADE TÉRMICA (EIBL) .....</b>	<b>200</b>
<b>C.3</b>	<b>EXTRAPOLAÇÃO A PARTIR DE 260 K .....</b>	<b>201</b>
<b>C.4</b>	<b>PROPRIEDADES DO TEG 241-1.0-1.2 .....</b>	<b>201</b>
<b>C.5</b>	<b>PROPRIEDADES DO <math>Bi_2Te_3</math> A PARTIR DE 260 K ....</b>	<b>203</b>
<b>C.6</b>	<b>ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DO <math>Bi_2Te_3</math> A PARTIR DE 260 K .....</b>	<b>204</b>
<b>C.7</b>	<b>RESULTADOS DO TEG 5W-5V-40S .....</b>	<b>206</b>
<b>C.8</b>	<b>RESULTADOS TEG 10W-4V-40S .....</b>	<b>207</b>
	<b>APÊNDICE D – INCERTEZAS .....</b>	<b>208</b>
<b>D.1</b>	<b>ANÁLISE DE INCERTEZAS .....</b>	<b>208</b>
	<b>ANEXO A – GERADORES TERMOELÉTRICOS .....</b>	<b>210</b>
<b>A.1</b>	<b>DADOS EVERREDTRONICS LTD .....</b>	<b>210</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os dispositivos termoeletrônicos são equipamentos responsáveis pela conversão de energia térmica em elétrica e vice-versa. Os que geram energia elétrica a partir de gradientes de temperatura são denominados geradores termoeletrônicos, TEG's. E os que convertem energia elétrica em térmica gerando diferenças de temperaturas entre as faces do dispositivo, de modo que uma delas fique mais fria em relação a temperatura do ambiente, são chamados de refrigeradores termoeletrônicos, TEC's. Esses equipamentos termoeletrônicos, com a evolução dos semicondutores, tiveram sua eficiência elevada, estimulando assim, suas aplicações, ganhando espaço no mercado, integrando-se às novas funcionalidades e simultaneamente acompanhando os avanços atuais.

Segundo G. Jeffrey Snyder (2018), a partir dos anos 60 os TEG's tiveram grande utilidade na área espacial, em missões de exploração, principalmente para trajetórias além do planeta Marte, onde a alimentação de uma nave no espaço com painéis solares é prejudica pela distância. Nesse tempo, geradores termoeletrônicos de radioisótopos (RTG) começaram a ser empregados em viagens espaciais gerando energia térmica a partir do decaimento radioativo de um radioisótopo e podiam atingir temperaturas de até 1200 K no núcleo. Essa fonte de calor era então acoplada aos TEG's que produziam energia elétrica, (VON LUKOWICZ *et al.*, 2016). O RTG ainda é utilizado pela NASA em diversas missões, como Apollo, Pionner, Viking, Voyager, Galileo, Cassini e após mais de 35 anos, os geradores termoeletrônicos da Voyager continuam operando (G. Jeffrey Snyder, 2018).

O uso de TEG's, que até então eram empregados apenas em satélites de grande porte, tornaram-se uma alternativa para geração de energia em nanosatélites, os CubeSats (abreviação das palavras em inglês - Cube e Satellite), um tipo de satélite miniaturizado. O primeiro desenho de CubeSat, segundo Helvajian e Janson (2008), foi proposto em 1999 pelos professores Jord Puig-Suari da California Polytechnic State University e Bob Twiggs da Universidade de Stanford. Segundo Gmbh (2018). O primeiro lançamento de CubeSats, aconteceu em 30 de Junho de 2003, colocando em órbita os CubeSats dinamarqueses AAU CubeSat DTUSat, os japoneses CubeSat XI-IV e CUTE-1, Can X-1 do Canadá e um CubeSat triplo dos Estados Unidos, o Quakesat. Os CubeSats padrão 1U possuem normalmente o volume de 1 litro (10 x 10 x 10 cm) e reduzida área disponível para alocação de painéis solares. Orbitam em ambiente hostil e remoto com exposição ao Sol, principal fonte de energia que é coletada por esses painéis solares junto ao corpo

do nanossatélite. Jacques (2009) afirma que a eficiência dessas células solares não supera 30 %, e além disso, os fenômenos de transferência de calor condutivos e de radiação captados pela energia do Sol elevam as temperaturas dos painéis solares, prejudicando ainda mais a sua eficiência. Logo, a utilização de dispositivos termoeletricos, adicionados em sua estrutura, para captar a energia excedente enquanto se desloca, pode ser uma complementação e/ou alternativa à geração de energia elétrica em nanossatélites.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é avaliar a energia produzida por um gerador termoeletrico aplicado em nanossatélites do padrão CubeSat. Sua eficiência foi medida em bancada experimental desenvolvida no presente trabalho. Diversas situações experimentais foram avaliadas, inclusive testes experimentais simulando condições orbitais de voo foram realizados. Modelos matematicos analíticos foram desenvolvidos para determinação da máxima capacidade de geração de energia. Comparando com os dados experimentais obtidos, os modelos foram validados com sucesso.

### 1.1.1 Objetivo específico

- Análise de viabilidade técnica para implementação de dispositivos termoeletricos em nanossatélites;
- Avaliação de TEG's a temperaturas abaixo de 0 °C;
- Avaliação das perdas por efeito Thomson na transferência de calor e potência elétrica;
- Demonstração de uma condutividade térmica equivalente a partir de um número de mérito do material submetido aos efeitos Thomson para análise transferência de calor;
- Utilização da condutividade térmica efetiva proposta por Baranowski, Snyder e Toberer (2013) em um dispositivo termoeletrico com inserção de um fator de ajuste para análise de transferência de calor;
- Introdução de um novo modelo geral de condutividade térmica efetiva (CTE), Estado da Arte do presente trabalho, que integra os efeitos térmicos e elétricos como um todo, possibilitando relacionar as principais variáveis termoeletricas e obter resultados;

- Uma metodologia voltada para a determinação do número de pares de um dispositivo termoelétrico a partir do modelo geral de condutividade térmica efetiva, CTE, Estado da Arte deste trabalho.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

As principais justificativas para a realização deste trabalho são:

- Utilização de energias alternativas e renováveis em locais remotos;
- Aproveitamento de energias residuais em nanossatélites;
- Análise da viabilidade de TEG's operando em conjunto com painéis solares;
- Aumento de eficiência energética em sistemas aeroespaciais.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Aplicação das técnicas de geração energética em nanossatélites no ramo industrial, aeroespacial, comercial, residencial urbano e rural visando o aumento da eficiência energética;
- Geração de energia em locais remotos inabitáveis
- Geração de energia em locais remotos habitáveis, promovendo melhoria na qualidade de vida das pessoas nessas regiões;
- O novo modelo (CTE) proposto pelo autor traz uma nova forma de determinar as principais propriedades termoelétricas de maneira prática e simples;
- CTE fornece uma relação entre o número de mérito do material e o número de mérito do dispositivo, e uma metodologia para determinação do número de pares de um dispositivo;
- CTE pode ser usado pode ser utilizado como algoritmo, em softwares numéricos ou algébricos e em simulações computacionais.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está estruturado da seguinte forma:

- 1) Capítulo 1 – Introdução: apresentação dos objetivos do trabalho;
- 2) Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: revisão dos principais conceitos sobre termoelectricidade, como número de mérito, os principais materiais termoeletricos, dispositivos como os TEG's e TEC's e suas aplicações. Apresentam-se as novas descobertas das literaturas especializadas, como o fator de compatibilidade e novos entendimentos sobre o potencial termoeletrico. Na parte final da revisão bibliográfica são apresentados dados sobre os CubeSats, o FloripaSat e a captação de energia Solar no espaço;
- 3) Capítulo 3 – Metodologia: apresentação geral dos métodos teóricos e experimentais abordados neste trabalho
- 4) Capítulo 4 - Análise Teórica: são apresentados os cinco modelos teóricos para a determinação de parâmetros como tensão de saída e potência elétrica;
- 5) Capítulo 5 – Análise Experimental: apresentação da bancada experimental desenvolvida, bem como os procedimentos de testes;
- 6) Capítulo 6 – Resultados: apresentação dos resultados experimentais e a comparação com os modelos teóricos;
- 7) Capítulo 7 – Conclusões: apresentação das conclusões do trabalho e proposta de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentada a fundamentação teórica e experimental do estado da arte de geradores termoelétricos e suas aplicações.

### 2.1 HISTÓRICO DA TERMOELETRICIDADE

Em 1821, Thomas J. Seebeck selecionou dois tipos de condutores elétricos, compostos por materiais diferentes, e os conecta formando um circuito elétrico. Aquecendo em uma das junções dos materiais constatou no circuito uma força eletromotriz. Essa foi a descoberta do primeiro efeito termoelétrico, batizado de “efeito Seebeck” em homenagem ao físico, (GOLDSMID, 2009).

Treze anos mais tarde, J. Peltier, um relojoeiro francês, descobre o segundo efeito termoelétrico, porém de modo reverso, aplicando uma corrente elétrica em um circuito composto por uma junção condutora com materiais diferentes. A configuração era análoga a que fizera Seebeck, entretanto em vez de aplicar um aquecimento inseriu uma corrente elétrica no circuito. Dessa forma, descobriu um pequeno aquecimento ou resfriamento nas junções condutoras. Peltier em seguida concluiu que as transferências de calor nas uniões condutoras estavam relacionadas com o sentido em que a corrente elétrica circulava pelos condutores, (GOLDSMID, 2009).

As relações entre os fenômenos Seebeck e Peltier não foram, segundo Goldsmid (2009), imediatamente identificadas até 1855. Nesse mesmo ano, W. Thomson (Lord Kelvin) identifica a interdependência entre os dois efeitos. Kelvin aplicando teorias da termodinâmica determinou uma relação entre os coeficientes de Seebeck e Peltier.

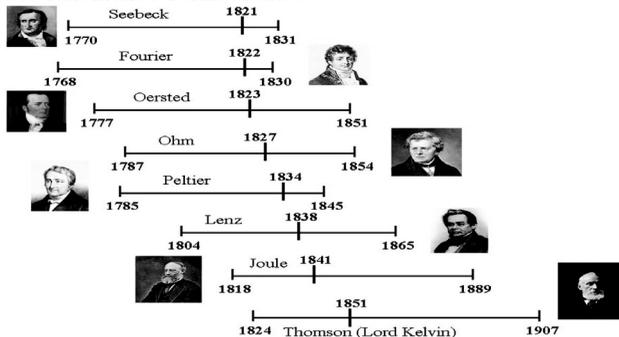
Além disso, previu teoricamente um terceiro efeito termoelétrico que posteriormente observou experimentalmente. Utilizando apenas um condutor homogêneo submeteu o metal a uma corrente elétrica e a um gradiente de temperatura simultaneamente, concluiu que além do efeito Joule, que libera calor, a intensidade de corrente provocava uma adicional liberação ou absorção de calor. Esse fenômeno é hoje chamado de “efeito Thomson”, (GOLDSMID, 2009).

A Figura 1 traz uma cronologia com os nomes dos principais cientistas responsáveis pelo desenvolvimento das grandes áreas das ciências térmicas, eletricidade e da termoeletricidade.

Entre 1949 e 1956, Ioffe avança nos estudos da termoeletricidade contribuindo com a inserção do número de mérito,  $Z$ , bem como o uso de

semicondutores. O número de mérito se tornou uma das propriedades mais importantes da termoelectricidade e, além disso, uma referência quanto a eficiência de materiais termoeletrônicos.

Figura 1 - Cronologia com os principais cientistas e suas contribuições para área dos fenômenos Termoeletrônicos.



Fonte: Maciá-Barber (2015).

Na década de 50, os dispositivos termoeletrônicos, hoje classificados de primeira geração, alcançavam a eficiência de cerca de 5% operando como geradores e atingiam um resfriamento do ambiente abaixo de 0 °C, como refrigeradores (G. JEFFREY SNYDER, 2018). Nessa década, o número de mérito  $ZT$ , grandeza que descreve a eficiência de um material termoeletrônico, ficava próximo de 1. Sua definição e equacionamento será apresentado a seguir. Ao final da década de 60, há um declínio nas pesquisas e desinteresse por parte das indústrias, levando em conta o pressuposto de que o número de mérito não poderia superar o valor de 1, mesmo com os estudos do momento afirmando a ocorrência de números de número de mérito superiores a 1, (EUA, 2018). Nos anos 90, avanços experimentais proporcionaram uma redução significativa na condutividade térmica da rede, possibilitaram ainda, progressos com as sucessivas abordagens de pesquisa contribuindo para a quase duplicação do número de mérito em altas temperaturas. Esse momento definiu a segunda geração de materiais termoeletrônicos em grandes quantidades com  $ZT$  na faixa de 1,3 a 1,7. Foi o início do uso metodológico, incluindo precipitantes e inserindo heterogeneidades em nanoescala com o objetivo de reduzir eficientemente a condutividade térmica da rede. Esses materiais termoeletrônicos atingiam eficiências de conversão de 11 a 15% (ZHAO; DRAVID; KANATZIDIS, 2014). Hoje, os materiais termoeletrônicos de terceira geração possuem melhorias no coeficiente de Seebeck por intermédio de técnicas que permitem convergências na

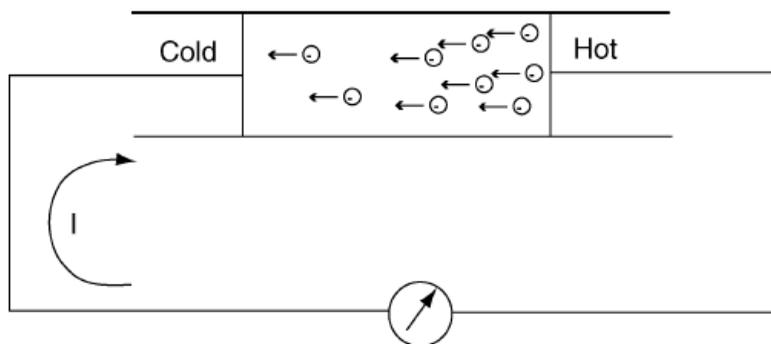
banda de valência. As soluções atuais permitem minimizar os contornos energéticos entre a matriz e os precipitados, impedindo a mobilidade de cargas. Tudo isso associado com a contínua melhoria na redução da condutividade térmica da rede resultando em aumentos significativos no número de mérito de 1,8 a 2,2; dependendo da diferença de temperatura. Atualmente a eficiência de conversão de um dispositivo pode chegar na faixa de 15 a 20% (LEE, 2016).

## 2.2 FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS

A termoelectricidade foi melhor compreendida a partir da descoberta dos elétrons no final do século 19. Hoje sabe-se que a energia solar, um campo elétrico ou energia térmica podem liberar alguns elétrons da sua ligação atômica mesmo na temperatura ambiente, deslocando-se da banda de valência para a banda de condução, onde os elétrons são livres para se mover, (LEE, 2016). A energia eletrostática presente em todos os lugares comprova esse fato.

Quando uma diferença de temperatura é aplicada através de um condutor, Figura 2, a região quente do condutor produz mais elétrons livres do que a região fria.

Figura 2 - Concentração de elétrons em um material termoeletrico.



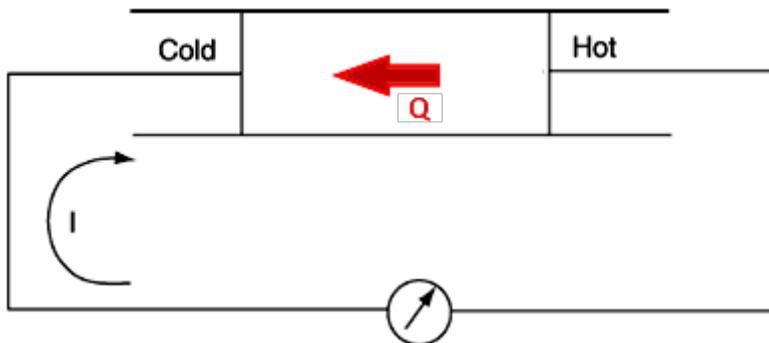
Fonte: Lee (2016).

Na região quente, elétrons e lacunas, ambos portadores de carga, se difundem de forma espontânea do lado quente em direção ao lado o frio. De fato, no lado quente existe um acúmulo de elétrons livres e por causa desse arranjo de elétrons no condutor, um campo elétrico é criado. Esse campo elétrico desloca os elétrons livres acumulados do local quente para

o local frio. O deslocamento dos elétrons da região quente para a fria acontece, devido as Forças de Coulumb. Finalmente, uma força eletromotriz se estabelece de forma que uma corrente elétrica flui no sentido contrário ao gradiente de temperatura, (LEE, 2016).

O inverso também é verdadeiro, se uma corrente é aplicada a um condutor, os elétrons se movem através do condutor e geram energia térmica, criando nos extremos do condutor uma região de temperatura alta e baixa, conforme Figura 3. Devido a esse gradiente de temperaturas, calor é transferido do local quente para o frio. Observa-se que a corrente elétrica circula na direção oposta ao fluxo de calor (LEE, 2016).

Figura 3 - Corrente em sentido contrário ao fluxo de calor no material termoelétrico.



Fonte: Adaptado de Lee (2016).

### 2.2.1 Efeito Seebeck

Seja dois condutores diferentes A e B conectados em ambos os lados formando um circuito fechado conforme Figura 4. Quando um dos lados é aquecido cria-se uma diferença de temperatura entre as junções e ocorre circulação de corrente elétrica que flui continuamente pelo circuito e por fim calor é rejeitado no outro lado. Isso é chamado de efeito Seebeck, e acontece devido ao surgimento de um potencial elétrico quando pares térmicos são submetidos a uma diferença de temperatura. Assim, segundo Çengel (2012), o efeito Seebeck forma a base de geração de potência termoelétrica pois absorve calor na junção aquecida, rejeita na junção na fria e a diferença entre essas quantidades resulta no trabalho líquido produzido.

Os efeitos Seebeck e Peltier ocorrem na junção de dois condutores diferentes o que levou a especulações quanto ao fenômeno ocorrer na

interface da união, porém eles dependem das propriedades dos materiais envolvidos. As explicações atuais apontam que o aquecimento na união impele os elétrons do material com nível de energia mais baixo para o material com nível de energia mais alto, gerando uma força eletromotriz. Além de geração de energia elétrica, este fenômeno é utilizado em medições de temperatura com os dispositivos “termopares”. O coeficiente de Seebeck diferencial,  $\alpha$ , é definido como a razão entre a tensão elétrica e a variação de temperatura conforme (1), (GOLDSMID, 2009).

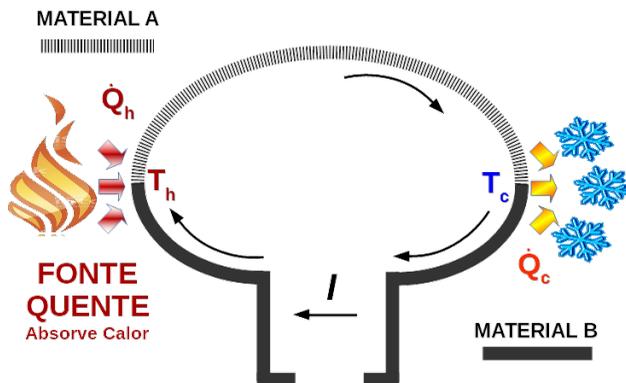
$$\alpha = \frac{V}{\Delta T} \quad (1)$$

Onde  $V$  é definida como a tensão elétrica em Volt, [V],  $T$  a temperatura em Kelvin, [K] e  $\alpha$  em [V/K].

Rearranjando a equação acima determina-se uma expressão para a tensão elétrica em (2).

$$V = \alpha \Delta T \quad (2)$$

Figura 4 - Efeito Seebeck.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Neste trabalho, o coeficiente de Seebeck diferencial ou relativo é a variação entre o valor de  $\alpha$  para um material **A**, atribuído como  $\alpha_A$ , em relação de um material **B**,  $\alpha_B$ . Ou seja,  $\alpha = \alpha_A - \alpha_B$ . O valor de  $\alpha$  será positivo se a força eletromotriz produzir uma corrente elétrica na direção da junção quente para a fria e assumirá valor negativo no caso contrário.

Na Figura 4, pode-se observar um circuito termoelétrico que incorpora os efeitos térmicos e elétricos. Uma corrente elétrica circula na direção do material **A**, junta quente com temperatura  $T_h$ , para o material **B**, junta fria com temperatura  $T_c$ . Segundo Morelli (1997), o coeficiente de Seebeck é uma propriedade intrínseca dos materiais, é também chamado de poder termoelétrico. Assim, o coeficiente de Seebeck diferencial pode ser interpretado como “a diferença do poder termoelétrico dos dois materiais”. Geralmente o coeficiente de Seebeck é medido em  $\mu\text{V}$ . Para os metais,  $\alpha$  é muito baixo, possui valores inferiores a  $10 \mu\text{V}$ , para semicondutores, alto, tipicamente  $200\text{-}300 \mu\text{V}$  e atualmente chega a se aproximar de  $400 \mu\text{V}$ , (ROSA, 2005). Evidentemente, o efeito Seebeck somente irá ocorrer se as temperaturas nas juntas quente e fria forem diferentes  $T_h \neq T_c$  e assim  $\Delta T \neq 0$ .

### 2.2.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier, reverso do efeito Seebeck, é a absorção ou geração de calor em decorrência da passagem de corrente elétrica em junções condutoras. Neste caso uma corrente elétrica é inserida no circuito provocando em uma junção a dissipação de calor e na outra a absorção. Segundo Lee (2016), quando uma corrente inserida em um circuito composto por dois diferentes materiais condutores flui, verifica-se que o calor deve ser continuamente adicionado e subtraído nas junções para manter a temperatura constante. O coeficiente de Peltier, é definido como a razão entre a taxa de transferência de calor, e a corrente elétrica conforme (3), (GOLDSMID, 2009).

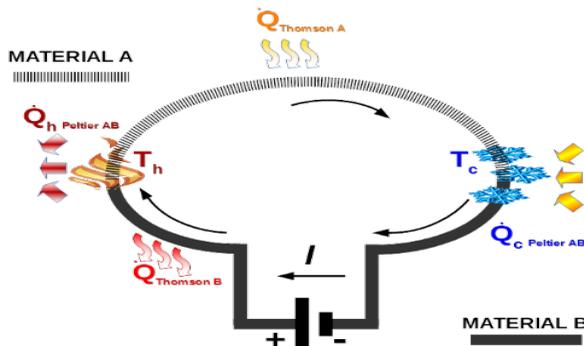
$$\pi = \frac{\dot{Q}_{\text{Peltier}}}{I} \quad (3)$$

Onde  $\dot{Q}$  é a taxa de transferência de calor em [W],  $I$  a corrente elétrica em Amperes, [A] e  $\pi$  o coeficiente de Peltier em [V].

A partir da definição do coeficiente de Peltier entende-se que a taxa de transferência de calor é proporcional a corrente que percorre o circuito termoelétrico conforme equação (4). A Figura 5 mostra esse efeito com as respectivas formas de calor indicadas.

$$\dot{Q}_{\text{Peltier}} = \pi I \quad (4)$$

Figura 5 - Efeito Peltier e Thomson.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O calor pode ser liberado ou absorvido a depender do sentido da corrente. O coeficiente de Peltier,  $\pi$ , será positivo se a corrente elétrica transcorrer da junção com temperatura aquecida, junta quente, em direção a junção com temperatura fria, junta fria. Caso o sentido da corrente seja o reverso, junta fria para a junta quente, o coeficiente de Peltier será negativo. Neste trabalho, o termo coeficiente de Peltier diferencial é a variação entre o valor de  $\pi$  para um material A, atribuído como  $\pi_A$  em relação a de um material B,  $\pi_B$ , portanto  $\pi = \pi_A - \pi_B$ .

### 2.2.3 Efeito Thomson

Em 1851, Thomson verificou a existência de um efeito térmico específico em um único condutor homogêneo submetido a uma corrente elétrica e a um gradiente de temperatura, simultaneamente (ROWE *et al.*, 1995). Devido a isso, constatou que conforme o sentido da corrente, o efeito térmico resultava em liberação ou absorção de uma quantidade de calor. A Figura 5 mostra que o calor é absorvido no material A devido a um gradiente de temperatura negativo e, em B, o calor é liberado por causa de um gradiente de temperatura positivo, (LEE, 2016). É um fenômeno reversível entre o calor e a eletricidade, assim como depende das propriedades do material. A equação (5) avaliada direção  $x$  demonstra que a transferência de calor de Thomson é proporcional à corrente elétrica e ao gradiente de temperatura. O sinal de menos da equação significa que

para um gradiente de temperatura negativo, o material absorve calor enquanto que para gradientes positivos, o material transfere calor.

$$\frac{d\dot{Q}_{Thomson}}{dx} = -\tau I \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

O coeficiente de Thomson,  $\tau$ , na equação (5) é definido como a taxa de transferência de calor por unidade de comprimento resultante da passagem de uma corrente elétrica unitária ao longo de um condutor, (GOLDSMID, 2009). É o único dos três coeficientes termoeletricos que pode ser medido com apenas um material condutor individualmente e a sua unidade é expressa em [V/K] conforme será demonstrado na equação (8). O termo coeficiente de Thomson diferencial adotado neste trabalho se refere a variação entre o valor de  $\tau_A$  para um material **A** em relação a de um material **B**,  $\tau_B$ , ou seja,  $\tau = \tau_A - \tau_B$ .

### 2.2.4 Efeito Joule

Quando uma corrente elétrica passa através de um material condutor, ocorre geração de calor devido ao choque dos elétrons com os átomos do condutor. O efeito Joule dissipa energia, é um fenômeno irreversível e expresso pela equação (6), HALLIDAY (2009):

$$\dot{Q}_{Joule} = RI^2 \quad (6)$$

Onde R é a resistência elétrica do material em Ohm [ $\Omega$ ].

### 2.2.5 Relações entre coeficientes termoeletricos

A equação (7) é descrita como a primeira relação de Thomson. Essa equação relaciona os coeficientes de Peltier e Seebeck, bem como cria um elo entre um refrigerador termoeletrico e um gerador termoeletrico.

$$\pi = \alpha T \quad (7)$$

A segunda relação de Thomson, por outro lado, também pode ser determinada através das relações de Kelvin e está expressa na equação

(6). É importante destacar que essa expressão não considera o efeito Joule.

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (8)$$

O termo  $T$  nas equações (7) e (8) indica a temperatura na junção, ponto de contato entre os dois diferentes materiais termoelétricos, localizado nas extremidades. Exemplificando, uma das junções é a quente onde existe  $T_h$  e a outra a fria com  $T_c$ , logo  $T$  assume os valores da temperatura quente ou fria dependendo da localização da junção.

Uma outra equação muito utilizada na refrigeração devido ao efeito Peltier é encontrada a partir do entendimento que o coeficiente de Peltier é igual ao produto entre o coeficiente de Seebeck e a temperatura da junção conforme (7), (LEE, 2016). Incluindo (7) na expressão (4) chega-se a equação (9), uma forma opcional para a determinação da transferência de calor por Peltier. Neste caso, a energia térmica é expressa em função do coeficiente de Seebeck, temperatura na junção e a corrente elétrica que circula através dos pares termoelétricos.

$$\dot{Q}_{Peltier} = \alpha TI \quad (9)$$

### 2.2.6 Número de mérito (z)

O número de mérito, fator termoelétrico ou ainda número de Ioffe, define o desempenho dos dispositivos termoelétricos, (LEE, 2016). Ioffe (1957) nos anos 50, descreve em seu livro que o número de mérito é “a mais importante característica dos termoelementos”. A grandeza  $z$ , [1/K], está relacionada com as propriedades do material, isto é, condutividade elétrica, condutividade térmica, coeficiente de Seebeck que por sua vez dependem da temperatura. Todas essas propriedades variam com a temperatura e, por isso, as temperaturas das faces quente ou fria influenciam nessas propriedades. O número de mérito é definido pela equação (10).

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (10)$$

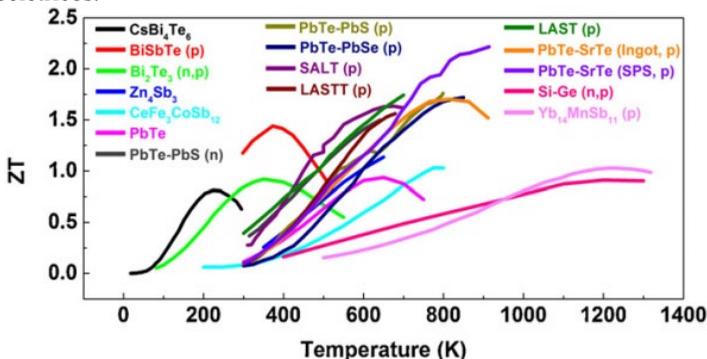
Onde  $\sigma$  é a condutividade elétrica, [ $\Omega\text{m}$ ]<sup>-1</sup>,  $\rho$  a resistividade elétrica em [ $\Omega\text{m}$ ] e  $k$  a condutividade térmica em [ $\text{W/mK}$ ].

O parâmetro  $z$  pode indicar tanto a eficiência como a conversão de energia, servindo para caracterizar e logo classificar os materiais termoelétricos. É função da temperatura e possui forma adimensional  $zT$ , que é o modo mais usual na literatura conforme descrito na equação (11), onde  $\bar{T}$  é a temperatura média dos valores nas extremidades quente e fria do material termoelétrico.

$$zT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \bar{T} = \frac{\alpha^2}{\rho k} \bar{T} \quad (11)$$

O melhor material termoelétrico possui maior  $z$ , ou seja, elevado coeficiente de Seebeck, elevado valor de condutividade elétrica e valores baixos de condutividade térmica. Se a condutividade elétrica for elevada, ocorre a redução do aquecimento por efeito Joule, enquanto que uma baixa condutividade térmica impede refluxos de calor do lado quente em direção ao lado frio. Materiais com elevado número de mérito são geralmente semicondutores que passaram por processos de dopagem. A dopagem, segundo Mello e Intrator (1980), derivado do inglês *doping* é a adição de pequena quantidade de impureza ao cristal (os mais comuns são silício ou germânio), com propriedades adequadas, a fim de alterar o comportamento elétrico do semicondutor. A Figura 6 demonstra o comportamento do número de mérito adimensional para diversos materiais termoelétricos. Alguns materiais atingem valores de  $zT > 2$ , porém, atualmente, nenhum ultrapassa o valor de 3.

Figura 6 - Número de mérito com a relação à temperatura para materiais termoelétricos.



Fonte: He, Kanatzidis e Dravid, (2013).

Neste trabalho, a letra  $z$  minúsculo se refere ao número de mérito de um único elemento termoelétrico, enquanto que  $Z$  representa o número de mérito de todo o conjunto de elementos termoelétricos que compõe o módulo termoelétrico. Tendo como exemplo  $zT$ , que é o número de mérito adimensional de um material e, por outro lado,  $ZT$  como o número de mérito adimensional de todo o dispositivo.

Segundo Rowe (1995), para um par termoelétrico e, portanto, para um dispositivo, o número de mérito é dado conforme a equação (12), e o número de mérito adimensional pela (13).

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{KR} \quad (12)$$

$$ZT = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{KR} \bar{T} \quad (13)$$

Onde  $K$  é a condutância térmica em  $[W/m^2K]$ .

Desenvolvendo a equação (12) e sua forma adimensional (13) a partir das definições de condutância térmica ( $K$ ) e resistência elétrica ( $R$ ), que serão abordadas mais à frente em (25) e (26), chega-se as seguintes expressões para o número de mérito de um par termoelétrico ou um dispositivo em (14) e, em sua forma adimensional, (15).

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[ (k_p \rho_p)^{1/2} + (k_n \rho_n)^{1/2} \right]^2} \quad (14)$$

$$ZT = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[ (k_p \rho_p)^{1/2} + (k_n \rho_n)^{1/2} \right]^2} \bar{T} \quad (15)$$

## 2.3 MATERIAIS TERMOELÉTRICOS

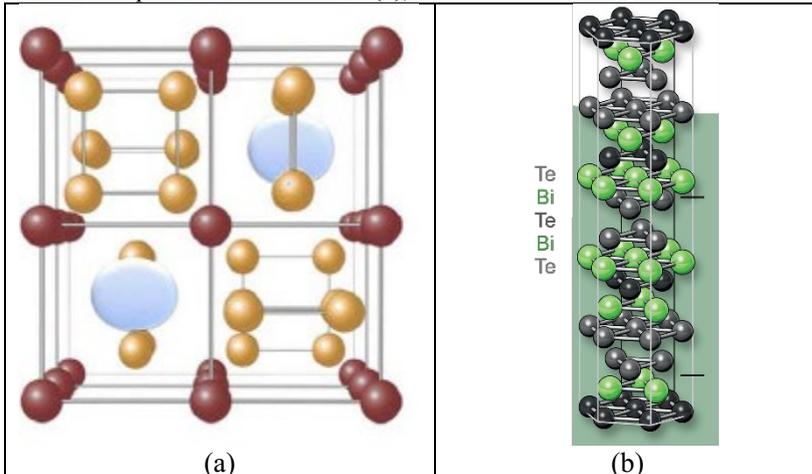
Escuterudita (Skutterudita), segundo ROSA (2015) é o nome genérico de um minério de cobalto ou de níquel encontrado perto de Skuterud, na Noruega, que apresenta um tipo peculiar de cristalização, outras fontes apontam para minerais de arseneto estreitamente relacionados com taxas variáveis de cobalto, níquel e as vezes ferro. Rull-Bravo *et al.* (2015) afirma que essa descoberta ocorreu em 1845 na

Noruega e que a descrição da estrutura cúbica contendo 32 átomos no espaço tridimensional, conforme Figura 7 (a), ocorreria em 1928.

Materiais deste tipo nos últimos anos foram amplamente pesquisados, contribuindo assim com o aumento do desempenho termoelétrico, melhor compressão dos fenômenos envolvidos e a descoberta de novos compostos. As escuteruditas constituem os materiais como por exemplo o Telureto de Bismuto encontrado na maior parte dos dispositivos termoelétricos.

A eficiência de um material termoelétrico depende de vários fatores entre eles as conexões elétricas, perdas de calor nas laterais, resistências de contato, entretanto o fator mais importante está em si mesmo, ou seja, suas propriedades como por exemplo o número de mérito que será avaliado amplamente neste trabalho. O número de mérito é uma propriedade do material derivada do conjunto de outras propriedades conforme (10). A otimização desta variável tem sido um desafio para os cientistas até hoje devido às propriedades físicas garantirem que um aumento no coeficiente de Seebeck implica no decréscimo da condutividade elétrica, além da contribuição eletrônica na condutividade térmica estar relacionada a condutividade elétrica, Rull-Bravo *et al.* (2015).

Figura 7 - (a) Célula Unitária de uma Escuterudita. A descoberta foi determinada por Oftedal *et al.* 1928 (b), Célula unitária do  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .



Fonte: (a) Rull-Bravo *et al.* (2015), (b) Eibl *et al.* (2015).

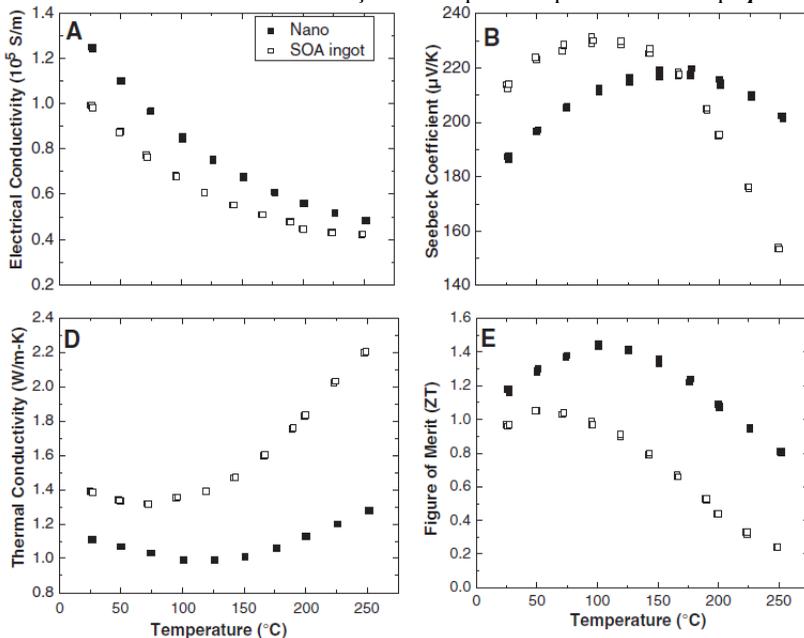
Segundo Rull-bravo et al. (2015) até os anos a 60 a maior parte dos materiais semicondutores altamente dopados eram o  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$ ,  $\text{Si-Ge}$  e o  $\text{Te-Ag-Ge-Sb}$ . Nessa época o valor do número de mérito chegava em torno de 1 o que não gerou um atrativo para o financiamento das pesquisas por causa da pequena geração de energia aliada ao custo-benefício do mercado. Por esse motivo, até antes dos anos 90 não houveram grandes saltos em estudos científicos nesta área, ressaltando apenas os desenvolvimentos a níveis especificamente industriais. Foi nessa tendência industrial que o Telureto de Bismuto se torna o material termoelétrico mais utilizado comercialmente, ele demonstrou potências significativas. Isso levou, a partir da década de 90, a produção de módulos termoelétricos baseados na família do Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), amplamente utilizados em aquecimento de cadeiras, resfriamento de chips e servindo como refrigeradores portáteis, (RULL-BRAVO *et al.*, 2015). A partir dos anos 90 até o momento as tentativas para as melhorias das eficiências termoelétricas estão voltadas para fabricação de nanoestruturas e o estudo de novos materiais, (RULL-BRAVO *et al.*, 2015).

O Telureto de Bismuto é o material que faz parte do gerador termoelétrico, tema desta dissertação e logo será o mais abordado nas seções seguintes. A Figura 7 (b) ilustra uma célula unitária deste material, formada por uma célula unitária romboédrica, entretanto é frequentemente descrita em termos de célula primitiva hexagonal com três lamelas com cinco átomos (EIBL *et al.*, 2015).

### 2.3.1 Propriedades dos $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ para o tipo $p$

Os dados de Poudel *et al.* (2008) para o Telureto de Bismuto,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , do tipo  $p$  constam na Figura 8. O autor utiliza o termo “Nano” para demonstrar os resultados de materiais nanocristalinos em comparação com o “SOA ingot”, material desenvolvido por ele. Entende-se como principais propriedades para o modelo teórico o comportamento das três grandezas físicas que são: coeficiente de Seebeck, condutividade elétrica e a condutividade térmica. Essas propriedades são associadas à temperatura média dentro do dispositivo termoelétrico. O número de mérito presente na Figura 8 (E) é uma propriedade importante neste trabalho, mas neste caso específico servirá para fins de comparação de resultados. Isso ocorre pelo fato de que com as propriedades citadas anteriormente é possível deduzir o valor do número de mérito a partir de (10).

Figura 8 - Condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck, condutividade térmica e número de mérito em função da temperatura para elemento tipo *p*.



Fonte: Poudel et al. (2008).

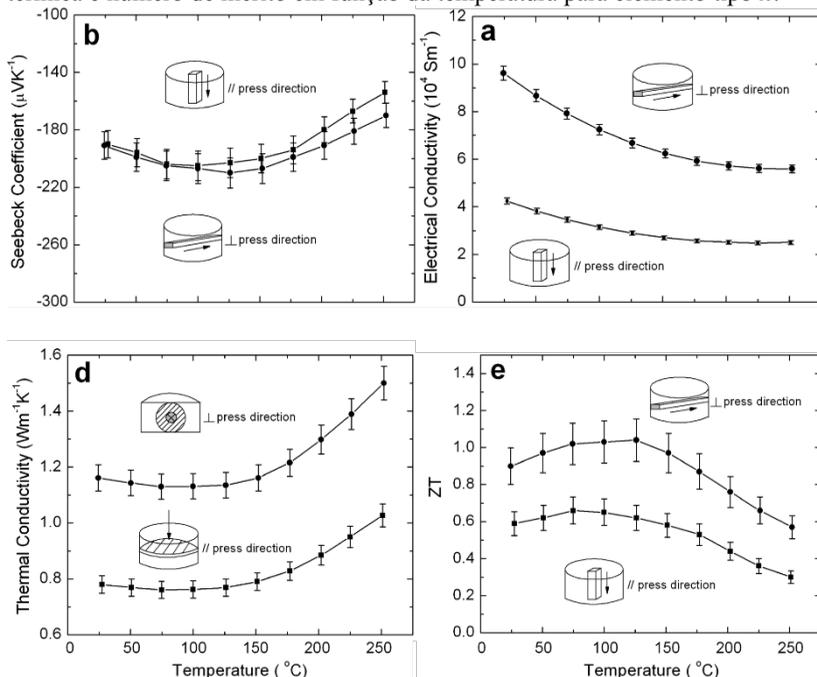
Os valores coletados na Figura 8 (B) para o coeficiente de Seebeck, Figura 8 (D) condutividade térmica e Figura 8 (E) resistividade elétrica constam na Tabela 11 do Apêndice C. Nela vemos o comportamento das variáveis em função da temperatura média em escala Kelvin com um intervalo de temperatura compreendido em torno de  $300 \leq T \leq 550$  K, isso para todos os principais parâmetros de um elemento do tipo *p*. Por isso o coeficiente de Seebeck possui valor positivo por se tratar deste tipo de elemento. A condutividade elétrica permite determinar os valores da resistividade elétrica de forma indireta a partir da relação  $\rho = 1/\sigma$ . Desta forma, os valores coletados de ( $\sigma$ ) possibilitam determinar os valores da resistividade elétrica ( $\rho$ ) que é a propriedade pretendida no modelo. Informações sobre esta propriedade em função da temperatura constam na Tabela 11 do Apêndice C. A condutividade térmica decresce para valores de 300 K até a proximidade de 490 K prosseguindo com uma retomada de crescimento a partir deste valor. As expressões (209), (210) e (211), que podem ser conferidas no Apêndice C, descrevem os comportamentos das variáveis em função da temperatura média do

material semiconductor tipo *p* e por isso recebem o subscrito com a letra “p”. A primeira expressão em (209) revela o coeficiente de Seebeck, a equação (210) exibe a resistividade elétrica e por fim, a equação (211) descreve a condutividade térmica. Todas essas variáveis estão relacionadas à temperatura média do material que por sua vez varia e são válidas para o intervalo de  $300 \leq T \leq 550$  K.

### 2.3.2 Propriedades dos $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ para o tipo *n*

O método para avaliação dos elementos do tipo “*n*” é similar ao empregado na Seção anterior para o elemento do tipo “*p*”. A partir de dados de Yan *et al.* (2010) observa-se a variação das propriedades do Telureto de Bismuto para elementos do tipo “*n*” na Figura 9.

Figura 9 - Condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck, condutividade térmica e número de mérito em função da temperatura para elemento tipo *n*.



Fonte: Yan *et al.* (2010).

A partir desses dados são obtidas as equações (212), (213) e (214) que constam no Apêndice C para o coeficiente de Seebeck, resistividade

elétrica e condutividade térmica. A resistividade elétrica foi determinada indiretamente a partir da condutividade elétrica conforme anteriormente explicado para o elemento do tipo  $p$ .

## 2.4 DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS

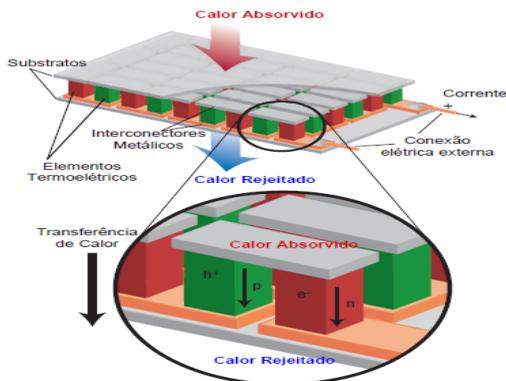
Conforme Çengel (2012), “o circuito que incorpora os efeitos térmico e elétrico é chamado de **circuito termoeletrico**, e o dispositivo que opera nesse circuito é chamado de **dispositivo termoeletrico**”. Módulos termoeletricos, ou pastilhas termoeletricas, ou ainda, “células” são dispositivos termoeletricos compostos de diversos pares de semicondutores do tipo  $p$  e  $n$ . Além de conduzir eletricidade, os materiais dos dispositivos termoeletricos são condutores térmicos.

As vantagens desses dispositivos estão relacionadas a sua simplicidade, são compactos, possuem grande confiabilidade, pequenas dimensões e peso praticamente desprezível, adequados para pequenas e remotas aplicações. Destacam-se por serem fontes de energias renováveis, enquanto sua principal desvantagem é a sua baixa eficiência chegando a 1/6 do rendimento de Carnot. (ISMAIL; AHMED, 2009).

Os módulos termoeletricos que funcionam conforme o efeito Seebeck são denominados de TEG e os que operam sob o efeito Peltier são chamados de TEC. Ambos os tipos de módulos são formados por duas placas de substrato de material cerâmico, geralmente feitas a partir da Alumina ( $Al_2O_3$ ). Elas servem de suporte para o material semicondutor, são isolantes elétricos e garantem a integridade mecânica do conjunto. Possuem condutividade térmica intermediária e baixa condutividade elétrica. Segundo Tritt (2006), a alumina é um material cerâmico amplamente empregado devido a sua abundância, compõe a crosta terrestre em cerca de 15%. No entanto não é o material cerâmico que possui a maior condutividade térmica e, por isso, nos casos de elevados fluxo de calor são utilizados outros materiais. A Figura 10 mostra em detalhes as principais partes de um módulo termoeletrico operando como gerador termoeletrico, TEG. Observando a composição interna do módulo termoeletrico é possível visualizar os semicondutores em pares  $p-n$  conectados por condutores elétricos dispostos nas partes superior e inferior, envoltos pelas duas placas de alumina.

O tamanho dos dispositivos convencionais varia de 4 a 75 mm<sup>2</sup> de área e de 1 a 5 mm de espessura. No interior dos módulos comerciais os números de termopares mais comuns (pares  $p$  e  $n$ ) variam entre 97 a 127 pares termoeletricos.

Figura 10 - Detalhe da composição interna de um módulo termoeétrico operando como um TEG.



Fonte: Adaptado de Snyder *et al.* (2008).

Hoje, esse número supera 241 e atinge cerca 450 pares conforme disponibilizam alguns fabricantes como Everredtronics Ltd (2018). No presente trabalho será utilizado um dispositivo com 241 pares e outros dois de 126 pares *p-n*.

#### 2.4.1 Gerador termoeétrico (TEG)

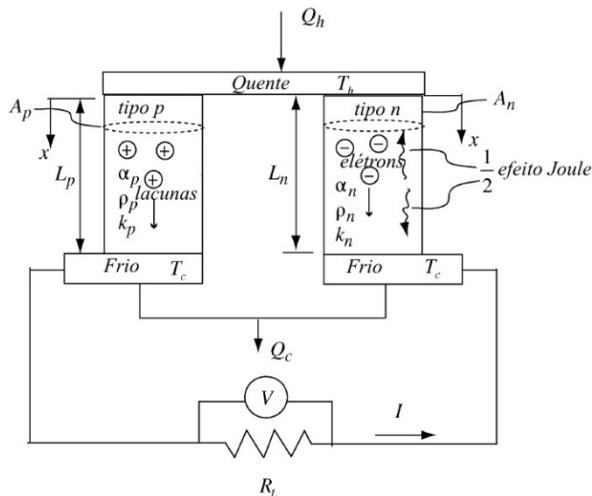
Vining (2008) demonstra que os equipamentos termoeétricos para potências inferiores a 100 W são mais eficientes que motores térmicos mecânicos. Suas aplicações são diversas como em fontes de alimentação para espaçonaves e automotivos, em ciclos “topping” para sistemas de cogeração de energia, geradores para instalações petrolíferas, fornecedores de potência elétrica para ventiladores residenciais que operam durante falhas de energia entre outras utilidades.

Focando na geração de potência, quando uma fonte quente através de um gradiente de temperatura produz um fluxo de calor na face do módulo termoeétrico, a energia térmica flui por condução. Esse fluxo atravessa as paredes da alumina, passando pelas placas de condutores metálicos até chegar nas extremidades dos termopares *p-n*. O fluxo de calor total gerado pela fonte quente é então dividido igualmente entre os termopares, ou seja, se difunde por todos os elementos termoeétricos na forma de energia térmica de condução. Portanto, os elementos termoeétricos estão termicamente ligados em paralelo. Além do mais, todos os pares térmicos estão conectados em suas extremidades por condutores elétricos o que configura uma ligação elétrica em série.

Devido a diferença de temperatura entre as bordas quente e fria dos diversos pares termoeletricos, surge uma diferença de potencial nos dois pontos das conexões elétricas condutoras conforme Figura 10 e, por consequência, uma corrente flui pelo circuito termoeletrico. Além da geração de corrente elétrica, calor é rejeitado para a fonte fria, que no caso da Figura 10 é o ambiente externo. Perdas por efeito Joule e transferência de calor por efeito Thomson estão presentes durante a operação do dispositivo.

Avaliando apenas um par termoeletrico do tipo *p* e *n* unidos sob diferentes temperaturas em suas faces é possível examinar como se comportam os elementos termoeletricos e, assim abranger essa análise para todo o dispositivo. Eletricamente em série e termicamente em paralelo, o gradiente de temperatura nos dois materiais provoca a excitação das cargas positivas (lacunas) e negativas (elétrons) resultando em uma movimentação espontânea dos elementos *p* para os elementos *n*. As lacunas do tipo *p* “percebem” os elétrons livres no elemento do tipo *n* e migram apenas para o outro lado da junção. Enfim, as lacunas se transportam para o elemento *n*, enquanto que um elétron livre se desloca somente em direção ao elemento *p*. Assim é criada uma diferença de potencial e, por consequência, há passagem de corrente elétrica nos cabos do módulo termoeletrico conforme Figura 11.

Figura 11 - Par termoeletrico, semicondutores tipo p e n de um gerador termoeletrico.



Fonte: Lee (2016).

Assumindo que os materiais são isotrópicos, a equação de continuidade de corrente elétrica é dada pela expressão (16):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (16)$$

O campo elétrico  $\vec{E}$  é influenciado pela densidade de corrente  $\vec{J}$  e o gradiente de temperatura  $\vec{\nabla}T$ , conforme segue em (17):

$$\vec{E} = \vec{J}\rho + \alpha\vec{\nabla}T \quad (17)$$

Em 1824, Thomson percebeu que o fluxo de calor é afetado pelo campo elétrico e também pelo gradiente de temperatura. Considerou que os fenômenos termoelétricos e a condução térmica seriam independentes. Em 1931, Onsager validou essas relações apresentando o princípio recíproco que fora comparado experimentalmente. Logo as relações de Thomson e os princípios de Onsager possibilitaram gerar a equação termoelétrica em (18):

$$\vec{q} = \alpha T \vec{J} - k \vec{\nabla}T \quad (18)$$

Onde  $\vec{q}$  é o fluxo de calor em  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

Segundo Lee (2016) a relação termoelétrica em (18) é a mais importante equação no estudo da termoeletricidade. Portanto, a equação geral de difusão fica descrita como segue em (19):

$$-\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \dot{q}_g = \mu c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

Onde  $\dot{q}_g$  é a geração volumétrica em  $[\text{W}/\text{m}^3]$ ,  $\mu$  é a densidade do material e  $c_p$  o calor específico do material  $[\text{J}/\text{kgK}]$ . Para regime permanente a equação (19) resulta na equação (20).

$$-\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \dot{q}_g = 0 \quad (20)$$

Sabendo que a geração volumétrica de calor é dada pela equação (21):

$$\dot{q}_g = \vec{E} \cdot \vec{J} = J^2 \rho - \vec{J} \alpha \vec{\nabla} T \quad (21)$$

Inserindo o fluxo de calor da expressão (18) e a geração volumétrica de calor da equação (21) em (20) chega-se a equação (22) que rearranjada resulta em (23).

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + J^2 \rho - \alpha T \vec{\nabla} \cdot \vec{J} - \vec{J} T \vec{\nabla} \alpha - \vec{J} \alpha \vec{\nabla} T + \vec{J} \alpha \vec{\nabla} T = 0 \quad (22)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + J^2 \rho - \vec{J} T \vec{\nabla} \alpha = 0 \quad (23)$$

Segundo Landau e Lifshitz (1984) a variação de  $\alpha$  é devido somente ao gradiente de temperatura, e pode ser arranjado conforme (24).

$$\vec{\nabla} \alpha = \frac{d\alpha}{dT} \vec{\nabla} T \quad (24)$$

Inserindo (24) em (23) chega-se a equação (25):

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + J^2 \rho - T \frac{d\alpha}{dT} \vec{J} \cdot \vec{\nabla} T = 0 \quad (25)$$

O primeiro termo da equação representa a condução térmica, o segundo o efeito Joule e o terceiro o efeito Thomson. Lembrando que o coeficiente de Thomson é dado pela equação (6). Se o coeficiente de Seebeck for independente da temperatura, o efeito Thomson é nulo. Lee (2016) afirma que a equação (18) e (25) “governam os fenômenos termoelétricos”. Considerando que as resistências de contato térmico e resistências de contato elétrico são desprezíveis, assumindo não haver transferência de calor por convecção e radiação na face dos elementos, coeficiente de Seebeck constante, isto é, sem efeito Thomson, condução de calor unidimensional em regime permanente e que  $J = I/A$  a equação (25) resulta em (26):

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{I^2 \rho}{A^2} = 0 \quad (26)$$

Onde  $x$  representa a direção por onde ocorre a transferência de calor por condução conforme Figura 11, “A” representa a área da seção transversal

dos elementos **p** e **n**, L o comprimento das pernas (blocos) termoeletricos **p** e **n** de forma que  $A = A_p = A_n$  e  $L = L_p = L_n$ . A solução geral para o gradiente de temperatura na Figura 11, é obtida através de duas condições de contorno, sabendo que  $T_{x=0} = T_h$  e  $T_{x=L} = T_c$  conforme é apresentada pela equao (27).

$$\frac{dT}{dx} = \frac{I^2 \rho L}{kA^2} \left( \frac{L}{2} - x \right) - \frac{T_h - T_c}{L} \quad (27)$$

Onde  $T_h$  é a temperatura na face quente e  $T_c$  é a temperatura na face fria.

Logo em (28) encontra-se a expressão para o gradiente de temperatura quando  $x = 0$ .

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \frac{I^2 \rho L}{2kA^2} - \frac{T_h - T_c}{L} \quad (28)$$

Multiplicando ambos os lados da equao (18) pela área, considerando o fluxo unidimensional na direo  $x$  e expressando em termos dos elementos **p** e **n** encontra-se a taxa de transferência de calor na face quente,  $\dot{Q}_h$  em [W], conforme equao (29).

$$\dot{Q}_h = n \left[ (\alpha_p - \alpha_n) T_h I + \left( -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \right)_p + \left( -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \right)_n \right] \quad (29)$$

Inserindo o gradiente de temperatura na direo  $x$ , determinado pela equao (28), em (29) expande-se a taxa de transferência de calor na face quente, conforme (30).

$$\dot{Q}_h = n \left[ (\alpha_p - \alpha_n) T_h I - \frac{1}{2} I^2 \left( \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) + \left( \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) (T_h - T_c) \right] \quad (30)$$

Segundo Lee (2016) a resistência elétrica é definida conforme apresentado na equao (31) e  $K$  pela equao (32). Ambos são referentes a um par termoeletrico, **p** e **n**:

$$R = \left( \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) \quad (31)$$

$$K = \left( \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) \quad (32)$$

No presente trabalho será adotado que o coeficiente de Seebeck diferencial ou total de um par contendo os elementos termoelétricos **p-n** conforme segue na equação (33). O elemento semiconductor **n** possui coeficiente de Seebeck negativo e portanto, pode ser adotado em módulo segundo a equação (34).

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (33)$$

$$\alpha = \alpha_p + |\alpha_n| \quad (34)$$

A resistividade elétrica total para um par **p-n** assim como a condutividade térmica total de um par termoelétrico serão definidas respectivamente pelas expressões (35) e (36).

$$\rho = \rho_p + \rho_n \quad (35)$$

$$k = k_p + k_n \quad (36)$$

No caso dos termopares **p-n** possuírem o mesmo comprimento e área da seção transversal as equações (25) e (26) se reduzem respectivamente a (37) e (38).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (37)$$

$$K = \frac{kA}{L} \quad (38)$$

Assumindo que os termopares do tipo **p** e **n** são idênticos, finalmente chega-se a equação ideal de calor dada pela equação (39), (LEE, 2016).

$$\dot{Q}_h = n \left[ \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) \right] \quad (39)$$

Onde  $n$  representa o número de pares  $p$ - $n$  dentro do gerador termoeletrico.

A equação (39) descreve a taxa de transferência de calor da face quente. O mesmo procedimento pode ser aplicado para a parte fria onde a taxa de transferência de calor no lado frio,  $\dot{Q}_c$ , é dada pela equação (40).

$$\dot{Q}_c = n \left[ \alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) \right] \quad (40)$$

Denominando-se  $P$  como potência elétrica e aplicando a primeira lei da termodinâmica ( $P = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c$ ), respectivamente a partir da subtração de (39) e (40), chega-se a expressão (41) que representa a potência elétrica total em termos das propriedades internas do gerador termoeletrico.

$$P = n \left[ \alpha I(T_h - T_c) - I^2 R \right] \quad (41)$$

A potência elétrica sobre a resistência elétrica externa ou resistência de carga,  $R_L$  é expressa pela equação (42):

$$P = I^2 R_L = \frac{V^2}{R_L} \quad (42)$$

A resistência externa,  $R_L$ , é ilustrada na Figura 11.

Sabe-se que  $P = VI$ , e a partir das equações (41) e (42) obtêm-se as expressões (43) e (44):

$$V = n[\alpha(T_h - T_c) - IR] \quad (43)$$

$$V = IR_L \quad (44)$$

Igualando as equações (43) e (44) determina-se a corrente que circula pelo módulo termoeletrico de acordo com a expressão (45).

$$I = \frac{n\alpha(T_h - T_c)}{R_L + nR} \quad (45)$$

Mais duas expressões úteis, uma para tensão elétrica e outra para potência elétrica são determinadas a partir dos fundamentos até agora expostos. Elas estão em função das temperaturas do lado quente e frio, número de pares, coeficiente de Seebeck e resistência elétrica interna e externa. Para a tensão elétrica inserindo (45) em (43) ou (44) obtém-se a equação (46):

$$V = \frac{n\alpha(T_h - T_c)R_L}{R_L + nR} \quad (46)$$

A partir de (45) é inserida a relação (42) e chega-se a equação da potência elétrica em (47):

$$P = \frac{n^2\alpha^2(T_h - T_c)^2 R_L}{(R_L + nR)^2} \quad (47)$$

Os parâmetros máximos de um módulo termoeétrico em termos de corrente elétrica e tensão elétrica são apresentados abaixo. A duas condições são obtidas para valores em que resistência elétrica externa igual é zero,  $R_L = 0$ .

$$I_{\max} = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R} \quad (48)$$

$$V_{\max} = n\alpha(T_h - T_c) \quad (49)$$

A potência elétrica máxima é determinada igualando-se a zero a derivada da potência elétrica, equação (47), em relação a resistência externa. O resultado dessas operações matemáticas mostra que a potência elétrica somente será máxima quando a resistência de carga externa for igual a resistência interna total do gerador termoeétrico conforme (50).

$$R_L = nR = R_m \quad (50)$$

A potência máxima é encontrada inserindo (50) em (47) conforme (51).

$$P_{\max} = \frac{n^2 \alpha^2 (T_h - T_c)^2}{4R_{in}} \quad (51)$$

#### 2.4.2 Gerador termoelétrico com efeito Thomson

Voltando à atenção para a Figura 10 vemos o módulo termoelétrico como um todo assim como os detalhes das suas partes, na Figura 11 por sua vez, vemos um par termoelétrico com suas respectivas propriedades e sem a presença de ar no interior do módulo. O objetivo dessa etapa consiste em avaliar o módulo termoelétrico integralmente, ou seja, com todos os elementos em plena operação sem os efeitos da presença do ar entre eles e assumindo como desprezíveis a troca térmica com o ar. Aquecendo a face quente ocorre uma transferência de calor que atravessa os dispositivos termoelétricos gerando corrente elétrica e também rejeitando calor na face fria que se encontra a uma temperatura maior que a do ambiente. Desta forma, considerando todos os pares termoelétricos constituintes e através da primeira lei da termodinâmica é possível chegar a mesma conclusão que Kaushik e Manikandan (2015), e Lamba e Kaushik (2017) de acordo com a expressão (52) para transferência de calor na face quente, (53) na face fria e (54) para a potência elétrica.

$$\dot{Q}_h = n \left[ \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) - \frac{\tau I (T_h - T_c)}{2} \right] \quad (52)$$

$$\dot{Q}_c = n \left[ \alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) + \frac{\tau I (T_h - T_c)}{2} \right] \quad (53)$$

$$P = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c \quad (54)$$

Kaushik e Manikandan (2015) avaliam o coeficiente de Thomson em relação a temperatura média de forma que a equação (8) torna-se (55).

$$\tau = \bar{T} \frac{d\alpha}{dT} \quad (55)$$

As equações (52), (53) e (54) são as expressões gerais para os efeitos termoelétricos que ocorrem em um módulo termoelétrico com a inclusão do efeito Thomson, neste caso para um gerador termoelétrico pois, absorve calor na face quente, gera corrente elétrica e rejeita calor na face fria. Assim, a equação (52) permite a absorção de calor de todos os elementos termoelétricos e a (53) rejeição de calor na face fria. A potência elétrica na equação (54) é obtida através de um balanço de energia sobre todo o dispositivo, a diferença entre a taxa de calor que entra menos a que sai resulta em potência elétrica, a energia térmica foi transformada em energia elétrica.

Ainda nessas três equações supracitadas, observam-se as inclusões dos efeitos Thomson, assumindo que sua ação ocorre de forma simetricamente distribuída entre as junções quente e fria. Inevitavelmente, o efeito Joule ocorre sempre no sentido de perdas de energia enquanto que o efeito Thomson pode tanto gerar um efeito concorrente como colaborativo, isto é, pode fornecer energia reduzindo as perdas ou pode aumentar dissipando calor em conjunto com o efeito Joule. Na face quente tomando como referência a equação (52) verifica-se que esse efeito, na hipótese de  $\alpha > 0$ , implica em perdas de calor que atuam em conjunto com o efeito Joule. Na face fria atua conforme equação (53) provocando um aumento na rejeição de calor. Evidentemente esse fato provoca perda na potência elétrica e conseqüentemente redução no desempenho do gerador termoelétrico conforme se verifica pela equação (56):

$$P = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c = n[(\alpha - \tau)(T_h - T_c)I - I^2R] = I^2R_L \quad (56)$$

A equação (56) é na verdade a equação (41), com as inclusões dos efeitos de Thomson. Ela fornece a potência elétrica relacionada aos fenômenos internos, assim como, possui uma relação para a resistência elétrica externa. A mesma abordagem pode ser utilizada para se determinar a tensão elétrica analogamente conforme realizado anteriormente em (43) e (44) resultando respectivamente (57) e (58):

$$V = n[(\alpha - \tau)(T_h - T_c) - IR] \quad (57)$$

$$V = IR_L \quad (58)$$

Igualando as equações (57) e (58) chega-se a uma expressão para a corrente elétrica que independe do número de pares termoeletrônicos mas é afetada pelo efeito Thomson em (59):

$$I = \frac{n(\alpha - \tau)(T_h - T_c)}{R_L + nR} \quad (59)$$

Realizando uma análise simétrica com relação a equação (46) para a tensão de saída e (47) para a potência de saída chega-se a duas expressões úteis que serão utilizadas no modelo termoeletrico. A primeira em (60) a tensão de saída com influências do efeito Thomson e a segunda em (61) descreve a potência de saída com influência do mesmos efeitos.

$$V = \frac{n(\alpha - \tau)(T_h - T_c)R_L}{R_L + nR} \quad (60)$$

$$P = \frac{n^2(\alpha - \tau)^2(T_h - T_c)^2 R_L}{(R_L + nR)^2} \quad (61)$$

O rendimento independe do número de pares termoeletrônicos e por sua vez fica na forma da expressão (62):

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{[(\alpha - \tau)(T_h - T_c)I - I^2 R]}{\left[ \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) - \frac{\tau I (T_h - T_c)}{2} \right]} \quad (62)$$

Condutância térmica, já visto na equação (38), é o inverso da resistência térmica,  $\theta$ , conforme demonstra equação (63).

$$K = \frac{kA}{L} = \frac{1}{\theta} \quad (63)$$

Em que  $\theta$  é a resistência térmica em  $[m^2K/W]$ .

Rearranjando a equação (52), (53), (62) e inserindo o conceito de resistência térmica no lugar da condutância tem-se como resultado respectivamente as formas descritas em (64), (65) e (66):

$$\dot{Q}_h = n \left[ \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + \frac{(T_h - T_c)}{\theta} - \frac{\tau I (T_h - T_c)}{2} \right] \quad (64)$$

$$\dot{Q}_c = n \left[ \alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R + \frac{(T_h - T_c)}{\theta} + \frac{\tau I (T_h - T_c)}{2} \right] \quad (65)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{[(\alpha - \tau)(T_h - T_c)I - I^2 R]}{\left[ \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + \frac{(T_h - T_c)}{\theta} - \frac{\tau I (T_h - T_c)}{2} \right]} \quad (66)$$

Os parâmetros de máximo são para tensão elétrica máxima conforme (67) e a potência elétrica máxima em (68):

$$V_{\max} = n(\alpha - \tau)(T_h - T_c) \quad (67)$$

$$P_{\max} = \frac{n^2 (\alpha - \tau)^2 (T_h - T_c)^2}{4R_{in}} \quad (68)$$

### 2.4.3 Refrigerador termoeletrico (TEC)

É o dispositivo que utiliza efeito Peltier, nesse caso a aplicação de corrente contínua entre os cabos de alimentação das células termoeletricas provoca absorção de calor em uma das faces do ambiente e rejeição de calor em outra face para o ambiente. A eletricidade quando passa pelos pares termoeletricos p-n promove uma redução de temperatura da junta do “lado frio” causando uma absorção de calor do ambiente. Essa energia térmica é transferida pelo módulo através de transportes dos elétrons, um estado de energia alto para um estado de energia baixo resultando em emissão de calor no lado quente, isto é, o efeito Peltier. A Figura 12 mostra em detalhes um TEC, uma fonte de tensão elétrica externa conectada entre os cabos localizados nos polos positivo e negativo faz

com que uma corrente elétrica circule pelo dispositivo e então, calor é absorvido na face fria e rejeitado na face quente.

Figura 12 - Configuração de um Refrigerador Termoelétrico.



Fonte: Adaptado de Melcore (2006).

## 2.5 EFICIÊNCIA TERMOELÉTRICA E COMPATIBILIDADE

Nesta Seção serão demonstradas as teorias desenvolvidas por Ursell e Snyder (2002), Snyder e Ursell (2003). Inicialmente, é exibida uma abordagem sobre as configurações dos geradores termoelétricos. Na sequência as definições da propriedade densidade de corrente reduzida e sua relação com a taxa de transferência de calor. Uma metodologia numérica que permite estimar essa propriedade e a introdução do fator de compatibilidade e potencial termoelétrico, finalizando com as eficiências termoelétricas local de um par e a do dispositivo.

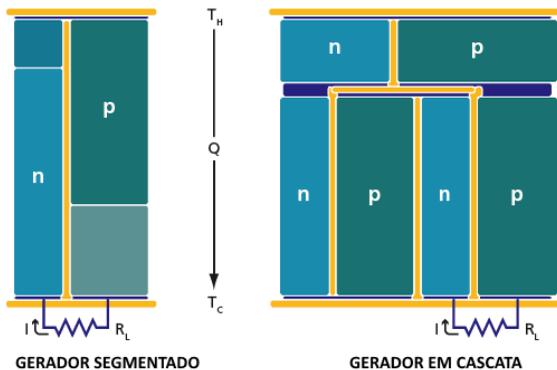
### 2.5.1 Geradores segmentados e em cascata

As configurações dos dispositivos termoelétricos se dividem em segmentado e em cascata, Figura 13. Em um tipo segmentado todos os segmentos estão termicamente e eletricamente em série. O TEG 241-1.0-1.2 do fabricante EVERREDtronics Ltd. é um modelo segmentado.

Por outro lado, um dispositivo contendo elementos em cascata funciona como um circuito elétrico independente para cada estágio como mostra a Figura 14. Embora a configuração em cascata apresente maior

eficiência é muito mais difícil a sua execução em relação aos segmentados.

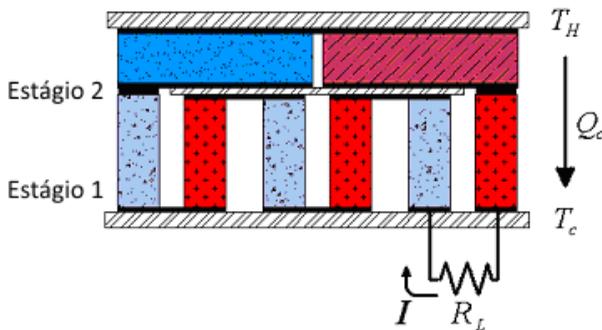
Figura 13 - Comparação de Geradores Segmentados e em Cascata.



Fonte: Adaptado de Snyder e Caillat (2003).

Ursell e Snyder (2002) afirmam que a eficiência de geração melhora quando materiais termoelétricos, submetidos a um gradiente de temperatura, são combinados com propriedades adequadas, seja em **cascata** ou **segmentados**. Avaliaram o número de mérito de diversos materiais como  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , SiGe e outros elementos com estruturas de escuteruditas (Skutterudite) e constataram que mesmo os materiais com número de mérito elevado para uma faixa de temperatura, apresentavam um declínio na eficiência, ou seja, possuíam alguma incompatibilidade.

Figura 14 - Gerador em cascata com 2 estágios.



Fonte: Ursell e Snyder (2002).

Concluíram que isso decorreria da definição geral de compatibilidade e eficiência intrínseca. A partir disso, utilizando o conceito de eficiência

intensiva reduzida,  $\eta_r$ , descobriram novas variáveis fundamentais, entre elas a densidade de corrente reduzida,  $u$ , e o fator de compatibilidade,  $s$ . A seguir serão demonstrados esses fundamentos com maiores detalhes e considerações.

### 2.5.2 Eficiência intensiva reduzida

O valor da eficiência intensiva reduzida, segundo Ursell e Snyder (2002), é definida como a razão entre a eficiência (real) e a eficiência de Carnot conforme a equação (69).

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_c} \quad (69)$$

Onde  $\eta$  é a eficiência ideal,  $\eta_r$  a eficiência intensiva reduzida e  $\eta_c$  a eficiência de Carnot.

A eficiência de Carnot é definida conforme a equação (70).

$$\eta_c = \frac{\Delta T}{T_h} \quad (70)$$

Algumas hipóteses iniciais foram adotadas:

1. A relação entre comprimento/área,  $(L/A)$ , é considerada como otimizada nas “pernas” (blocos termoelétricos)  $n$  e  $p$
2. Os blocos  $n$  e  $p$  do dispositivo possuem resistividade e condutividade térmicas idênticas, com o coeficiente de Seebeck igual em módulo, porém com sinais opostos.
3. São desprezadas as perdas térmicas convectivas e por radiação.

A eficiência de um gerador termoelétrico, equação (71), é descrita como a razão entre potência elétrica que ele produz e a potência térmica de condução fornecida ou quantidade de calor por unidade de tempo que entra em uma das faces do gerador. A face que absorve calor é denominada de face quente.

$$\eta = \frac{P}{\dot{Q}_h} \quad (71)$$

Substituindo na equação (69) as equações (71), (41) e a equação (39) que define a taxa de transferência de calor tem-se em (72):

$$\eta_r = \frac{1}{\eta_c} \cdot \frac{I(\alpha\Delta T - IR)}{k\Delta T \frac{A}{L} - \frac{I^2 R}{2} + T_h \alpha I} \quad (72)$$

Desenvolvendo a equação (72) e eliminando os termos de comprimento e área chega-se a (73):

$$\eta_r = \frac{\frac{I}{\dot{Q}_{cond}} \frac{\rho k}{\alpha} \left( 1 - \frac{I}{\dot{Q}_{cond}} \frac{\rho k}{\alpha} \right)}{\frac{I}{\dot{Q}_{cond}} \frac{\rho k}{\alpha} \left( 1 - \frac{I}{\dot{Q}_{cond}} \frac{\rho k}{\alpha} \frac{\Delta T}{2T_h} \right) + \frac{I}{zT_h}} \quad (73)$$

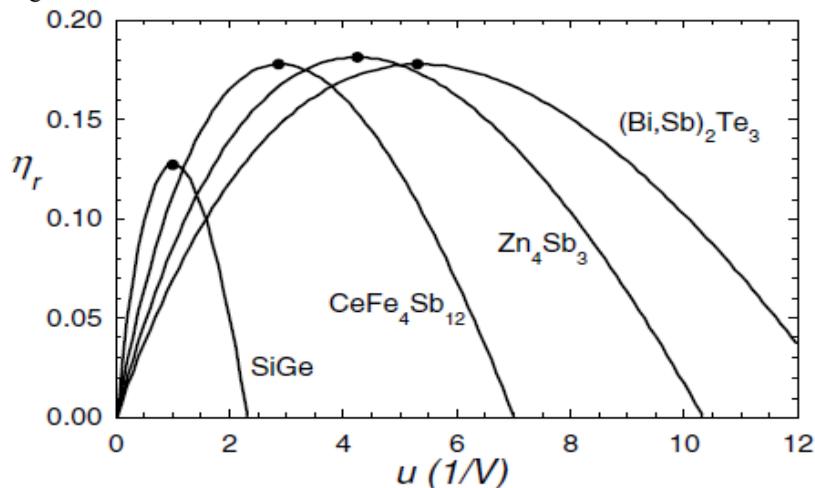
O termo  $I/\dot{Q}_{cond}$  é denominado de densidade de corrente elétrica reduzida,  $u$ , e representa a razão entre corrente elétrica e taxa de transferência de calor por condução. É uma propriedade termoelétrica intensiva com unidade de [1/V]. Para o limite em que  $\Delta T$  torna-se muito pequeno comparado em relação a  $T_h$ , a eficiência intensiva reduzida deixa de ser uma propriedade extensiva relacionada a  $\Delta T$  e conseqüentemente ao comprimento resultando assim em uma propriedade intensiva do material conforme mostra a equação (74).

$$\eta_r = \frac{\frac{u\rho k}{\alpha} \left( 1 - \frac{u\rho k}{\alpha} \right)}{\frac{u\rho k}{\alpha} + \frac{1}{zT}} \quad (74)$$

A partir desta equação é possível descrever o comportamento da eficiência intensiva reduzida como função da densidade de corrente reduzida, Figura 15, ou a própria eficiência normalizada pela eficiência de Carnot versus  $u$ , Figura 16, conforme Ursell e Snyder (2002), Snyder e Ursell (2003). Avaliando as Figura 15 e Figura 16 é possível perceber os pontos de máximos destacados nas curvas para os diferentes tipos de materiais. Eles representam o valor de densidade de corrente reduzida para

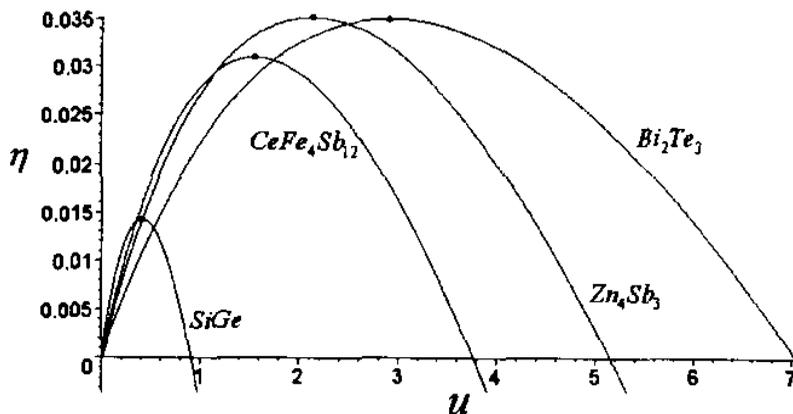
a maior eficiência intensiva reduzida. Esses pontos máximos são definidos como **fator de compatibilidade**,  $s$ , Ursell e Snyder (2002).

Figura 15 - Eficiência intensiva reduzida x densidade de corrente reduzida.



Fonte: Snyder e Ursell (2003).

Figura 16 - Eficiência x densidade de corrente reduzida.



Fonte: Ursell e Snyder (2002).

O fator de compatibilidade origina-se a partir da densidade de corrente reduzida, portanto também é uma propriedade intensiva do material. É possível determinar o ponto de eficiência máxima reduzida

derivando a equação (74) e igualando a zero o que permite concluir em (75):

$$s = \pm \frac{\sqrt{1 + zT} - 1}{\alpha T} \quad (75)$$

Através da equação (75) comprova-se que o fator de compatibilidade é uma propriedade intensiva. O fator de compatibilidade depende apenas das propriedades dos materiais e da temperatura. O sinal de “mais” na equação está relacionado a aplicações de elementos do tipo *p* enquanto o sinal de “menos” para elementos do tipo *n*. Essa nova propriedade confirma que mesmo para figuras de mérito elevadas não é possível atingir um valor de eficiência elevada, se o fator de compatibilidade for baixo. Logo, o número de mérito (*z*) já não é mais a única preocupação, pois conforme pode ser observado nas Figura 19 e Figura 20 existe apenas um único valor fator de compatibilidade (*s*) em que a eficiência é máxima. Ainda na equação (75) nota-se a presença da temperatura e do coeficiente de Seebeck.

Em suma, o fator de compatibilidade pode ser derivado através de propriedades elétricas, o que permite encontrar o valor otimizado da resistência elétrica de carga externa,  $R_L$ , a partir da resistência total interna  $R_{in}$  do dispositivo. Goupil *et al.* (2011) determinaram essa relação entre as resistências conforme segue em (76).

$$\alpha \Delta T = I(R_{in} + R_L) \quad \therefore R_L = R_{in} \sqrt{1 + ZT} \quad (76)$$

Seja a razão entre resistências elétricas definida por  $M = R_L/R_{in}$  e a partir da relação de eficiência máxima demonstrada por Goupil *et al.* (2011) chega-se a uma expressão conforme (77):

$$\eta_r = \eta_c \frac{M - 1}{M + \frac{T_h}{T_c}} \quad (77)$$

Derivando (77) e igualando a zero,  $\frac{\partial \eta_r}{\partial M} = 0$ , chega-se em (78):

$$M = \frac{R_L}{R_m} = \sqrt{1 + ZT} \quad (78)$$

### 2.5.3 Equação de calor em termos de u

Para uma análise de condução unidimensional em regime permanente é possível demonstrar uma nova abordagem da eficiência intensiva reduzida, considerando as seguintes hipóteses:

1. Um **único elemento termoelétrico** de comprimento L, com área de seção transversal do elemento igual A;
2. Elemento submetido a temperaturas,  $T_h$ , na face quente e,  $T_c$ , na face fria, sendo  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre as faces.

Através da definição de densidade de corrente elétrica, J, e avaliando o dispositivo a partir do lado quente através da definição de eficiência termoelétrica real,  $\eta$ , tem-se em (79):

$$\eta = \frac{P}{\dot{Q}_h} = \frac{J \int_{T_c}^{T_h} \alpha dT - J^2 \int_0^l \rho dx}{JT_h \alpha_h + k_h \nabla T_h} \quad (79)$$

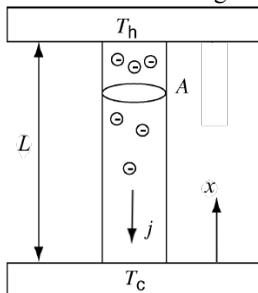
Observando a potência elétrica no numerador da equação, conforme anteriormente citado, são identificadas as contribuições do Efeito Seebeck no primeiro termo e a diferença de potencial pela lei de Ohm no segundo termo. Em geral, o segundo termo representa as perdas pelo efeito Joule. As contribuições geradas pela transferência de energia térmica no lado quente do dispositivo são constituídas de pelos efeitos, Peltier e Fourier. O efeito Peltier aparece de forma explícita no primeiro termo do denominador, e já o segundo termo do denominador é devido a condução térmica expressa pela lei de Fourier. Goldsmid (1995) relata que o efeito Peltier é caracterizado como um efeito de superfície entre dois materiais, entretanto a transferência de calor é propriedade de um único material logo torna-se necessária essa contribuição de transferência térmica na equação (79). As contribuições dos efeitos Joule e Thomson nas transferências de calor foram omitidas por Ursell e Snyder (2003) apud Sherman, Heikes e Ure (1960). Alegaram não haver necessidade de inclusão no caso de condução sólida no lado quente.

O modelo é descrito na Figura 17, onde a partir da transferência de calor que ocorre na face quente do elemento resulta em uma densidade de corrente que flui positiva a partir do lado quente com temperatura  $T(x = L) = T_h$ , e vai em direção ao lado frio,  $T_c$ . As propriedades como resistividade elétrica, condutividade térmica e o efeito Seebeck variam com a temperatura.

Realizando as devidas operações algébricas e a partir das considerações realizadas obtêm-se novamente uma expressão para eficiência reduzida, equação (79), porém dessa vez em função da intensidade de corrente reduzida, coeficiente de Seebeck e número de mérito (80).

$$\eta_r = \frac{\frac{u\alpha}{z} \left( 1 - \frac{u\alpha}{z} \right)}{\frac{u\alpha}{z} + \frac{1}{zT}} \quad (80)$$

Figura 17 - Diagrama de um único elemento de um gerador termoelétrico.



Fonte: Adaptado de Lee (2016).

Rearranjando a equação (80) é possível também obter uma expressão independente do número de mérito do material que é mostrada em (81).

$$\eta_r = \frac{u(\alpha - u\rho k)}{u\alpha + \frac{1}{T}} \quad (81)$$

Posteriormente, a densidade de corrente reduzida após sua primeira definição na literatura, recebeu uma nova nomenclatura por Ursell e Snyder (2003) que é utilizada como segue em (82).

$$u = \frac{J}{k\nabla T} \quad (82)$$

Usando a equação (25) e inserindo (82) tem-se a equação (83).

$$\frac{d\left(\frac{1}{u}\right)}{dT} = T \frac{d\alpha}{dT} - \rho k u \quad (83)$$

Assim, a conservação de energia segundo Lee (2016) fica expressa como (84):

$$\frac{du}{dT} = -u^2 T \frac{d\alpha}{dT} + \rho k u^3 \quad (84)$$

#### 2.5.4 Solução numérica da densidade de corrente reduzida

A equação de transferência de calor em termos de densidade de corrente reduzida (84) engloba o efeito Thomson. No caso do efeito Thomson ser igual a zero,  $da/dT = 0$  obtém-se a equação (85).

$$\frac{du}{dT} = \rho k u^3 \quad (85)$$

Rearranjando a equação (85), integrando em ambos os lados conforme (86), tem-se o seguinte resultado em (87):

$$\int_{u_c}^u \frac{du}{u^3} = \int_{T_c}^T \rho k dT \quad (86)$$

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{u_c} \sqrt{1 - 2u_c^2 \overline{\rho k} (T - T_c)} \quad (87)$$

Onde  $\overline{\rho k}$  significa o valor médio dessas propriedades avaliados entre  $T$  e  $T_c$ . Assumindo um valor de resistência igual a zero, ou seja  $pk = 0$ , a equação (84) fica expressa como em (88):

$$\frac{du}{dT} = -u^2 T \frac{d\alpha}{dT} \quad (88)$$

De modo análogo, integrando a equação (88) tem-se (89).

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{u_c} + \bar{T}(\alpha - \alpha_c) \quad (89)$$

Segundo Lee (2016), combinando as equações (87) e (89) obtém-se a forma geral como segue em (90):

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{u_c} \sqrt{1 - 2u_c^2 \overline{\rho k}(T - T_c)} + \bar{T}(\alpha - \alpha_c) \quad (90)$$

Uma solução numérica discreta (finita) é sugerida de  $n$  para  $n - 1$ . A primeira direcionada para elementos do tipo  $\mathbf{n}$  (91) e a segunda para elementos do tipo  $\mathbf{p}$  em (92).

$$\frac{1}{u_n} = \frac{1}{u_{n-1}} \sqrt{1 - 2u_{n-1}^2 \overline{\rho k}(T_n - T_{n-1})} + \bar{T}(\alpha_n - \alpha_{n-1}) \quad (91)$$

$$\frac{1}{u_n} = \frac{1}{u_{n-1}} \sqrt{1 - 2u_{n-1}^2 \overline{\rho k}(T_n - T_{n-1})} - \bar{T}(\alpha_n - \alpha_{n-1}) \quad (92)$$

## 2.5.5 Potencial termoelétrico

Goupil (2015) afirma que o potencial termoelétrico é uma função de estado que conecta o fluxo de calor e o fluxo de cargas elétricas. Foi definido por Snyder (2003) um novo entendimento conforme (93):

$$\Phi = \frac{\dot{q}}{J} = \alpha T + \frac{1}{u} \quad (93)$$

O sinal positivo no lado extremo direito da equação (93) depende da convenção a ser adotada. Neste texto será atribuído o valor positivo em virtude da convenção de sinal negativa para a corrente elétrica. Snyder (2003) adota essa convenção segundo afirma Goupil (2015). A eficiência

real se relaciona com o potencial termoelétrico através da relação (94). Desenvolvendo a expressão anterior tem-se em (95):

$$\eta = \frac{\Delta\Phi}{\Phi} = 1 - \frac{\Phi_c}{\Phi_h} \quad (94)$$

$$\eta = 1 - \frac{\alpha_c T + \frac{1}{u_c}}{\alpha_h T + \frac{1}{u_h}} \quad (95)$$

### 2.5.6 Eficiência reduzida local máxima

Segundo Baranowski, Snyder e Toberer (2013) a expressão para eficiência reduzida local máxima, ou melhor, para um único elemento termoelétrico é expressa em (96):

$$\eta_{r_{\max}} = \frac{\sqrt{1+zT} - 1}{\sqrt{1+zT} + 1} \quad (96)$$

### 2.5.731 Eficiência de conversão ou térmica

A eficiência conforme definida em (71) é também denominada de térmica ou de conversão e a partir de (39) e (47) determina-se uma nova expressão para a eficiência térmica ou de conversão em (97).

$$\eta_{th} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \frac{R_L}{R_{in}}}{\left(1 + \frac{R_L}{R_{in}}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{1}{2ZT} \left(1 + \frac{R_L}{R_{in}}\right)^2 \left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (97)$$

### 2.5.8 Eficiência máxima de um gerador termoelétrico

A expressão para eficiência máxima real ou máxima de conversão de todo o dispositivo segundo Lee (2016) segue em (98).

$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (98)$$

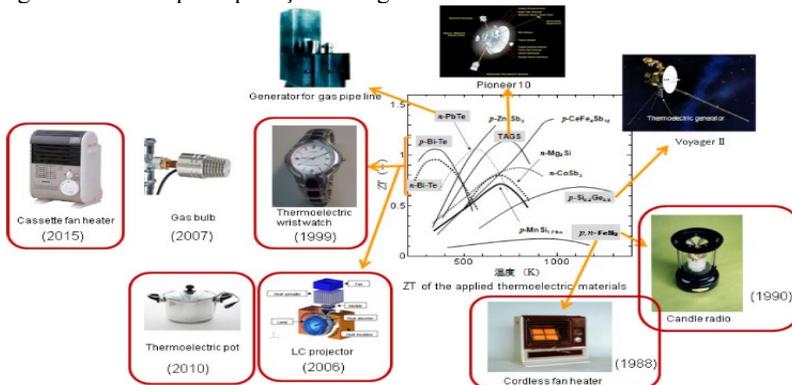
A equação (98) é obtida através da inserção de (78) em (97), (LEE, 2016). Um caso particular ocorre quando a razão entre as resistências elétricas,  $M$ , é igual a 1. Nesse caso específico atinge-se a máxima eficiência que é definida por (99):

$$\eta_{mp} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)}{2 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{2}{ZT}\left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (99)$$

## 2.6 APLICAÇÕES DE GERADORES TERMOELÉTRICOS

As principais aplicações dos geradores termoelétricos estão relacionadas a geração de eletricidade em ambientes extremos, recuperação de calor residual, potência doméstica descentralizada, combinação de calor e energia elétrica em sistemas de geração, microgeração para sensores, microeletrônica, em dispositivos que utilizam a energia solar para gerar eletricidade e são denominados de STEG's, (CHAMPIER, 2017).

Figura 18 - Principais aplicações dos geradores termoelétricos.



Fonte: Shinohara (2017)

Os TEG's também funcionam utilizando fontes de energias renováveis além do Sol como por exemplo as geotérmicas e oceânicas. São ideais para aplicações espaciais fornecendo energia para sondas e satélites. Algumas aplicações deste dispositivo são apresentadas na Figura 18.

Uma proposta recente é o tubo termoelétrico de Telureto de Bismuto conforme Figura 19. A geração de energia ocorre a partir das diferenças de temperatura entre as superfícies internas e externas, água quente flui dentro do tubo enquanto que água fria flui fora do tubo gerando uma diferença de temperatura na direção radial. A potência em um tubo desse tipo pode chegar a 8,2 W com (369 K - 298 K), (SHINOHARA, 2017).

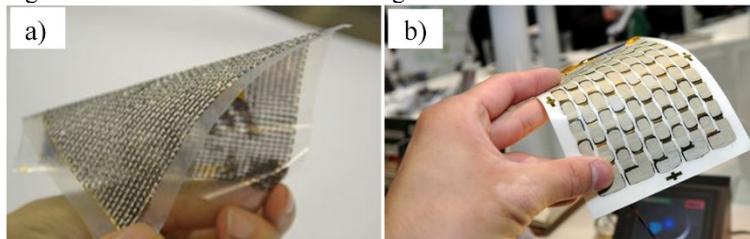
Figura 19 - Tubo termoelétrico.



Fonte: Shinohara (2017)

Módulos termoelétricos orgânicos e flexíveis são mostrados na Figura 20 a) e b). Eles são fabricados pela impressão de tinta em conjunto com misturas orgânicas em filmes finos de plástico, podem ser dobrados até uma curvatura de 5 mm.

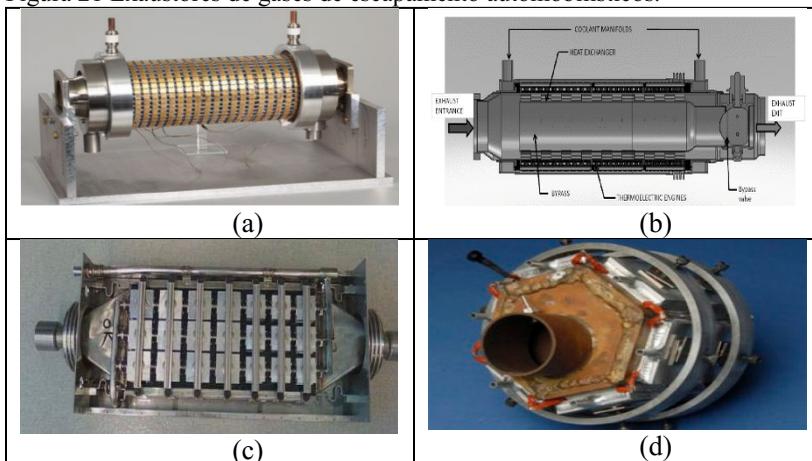
Figura 20 - Módulos termoelétricos orgânicos flexíveis.



FONTE: Shinohara (2017).

No ramo automobilístico, diversas empresas aderiram a utilização dos módulos termoeletricos na exaustão de gases de escapamento conforme mostrado na Figura 21 (a) e (b). Um modelo de TEG cilíndrico foi instalado nos carros da BMW e Ford, e testes realizados confirmaram 450 W de potência de saída utilizando o calor residual no escapamento, (THERMOELECTRIC APPLICATIONS WORKSHOP, 2012). Na Figura 21 (c) um gerador termoeletrico da GM que garante economia de combustível em cerca de 3%, modelos computacionais avaliaram uma geração entre 350 a 600 W ao trafegar pela cidade e rodovias, (THERMOELECTRICS APPLICATIONS WORKSHOP, 2011). Por último na Figura 21 (d) mais um modelo utilizado pela GM, (LEE, 2016).

Figura 21 Exaustores de gases de escapamento automobilísticos.



Fonte: (a) e (b) Thermoelectric Applications Workshop (2012); (c) Thermoelectric Applications Workshop (2011); (d) Lee (2016).

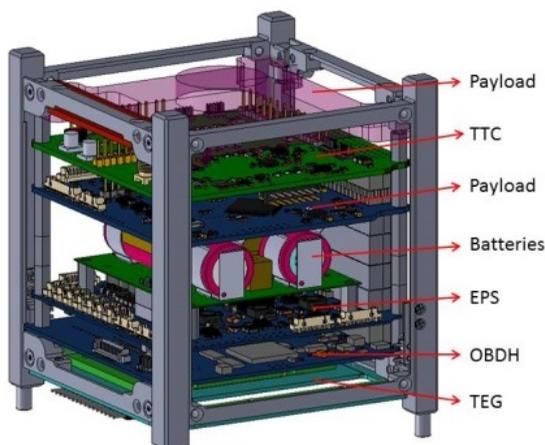
## 2.7 CUBESAT

Idealizado em 1999 pelos professores Jorgi Puiguari e Bob Triggs, o padrão CubeSat de nanossatélites consiste em um satélite miniaturizado voltado para pesquisas espaciais específicas, (GONZALES, 2014). Possui um formato cúbico com dimensões de 10 cm e sua massa máxima chega a 1,33 Kg. Se dividem em classes em que a unidade básica é a classe 1U, utilizada neste trabalho.

### 2.7.1 FloripaSat

O FloripaSat é um CubeSat 1 U desenvolvido por estudantes e docentes da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A Figura 22 ilustra o modelo do FloripaSat. Para o FloripaSat, Morsch Filho *et al.* (2017) desenvolveram um modelo de mapa térmico. Através de modelagens numéricas tridimensionais e métodos de volumes finitos os autores descobriram os campos de temperaturas cujo nanossatélite estaria sujeito no espaço. Este modelo descreve os perfis de temperatura ao longo de uma órbita de 400 km, com uma face do CubeSat sempre mantida na direção da terra, sem efetuar giro em torno do próprio eixo.

Figura 22 - Modelo do FloripaSat.



Fonte: Morsch Filho *et al.* (2017).

A equipe do FloripaSat incluirá um TEG a bordo do nanossatélite e os valores obtidos em órbita contribuirão para validar os modelos térmicos propostos. Pretende-se avaliar a capacidade de geração de energia elétrica de um TEG acoplado a um dos painéis solares do nanossatélite e para isso, testes experimentais e modelos para predizerem a capacidade de geração elétrica serão necessários.

Os CubeSats conseguem atingir uma órbita de até 2000 km afirma Woellert *et al.* (2010). O nanossatélite FloripaSat percorrerá trajetórias circulares em um raio de 400 km com inclinação 51,5°. O período de uma volta completa ao redor da Terra é de aproximadamente 5125s sendo 3053s desse tempo com o satélite voltado para o sol e por 2072s sob a sombra da Terra. A Figura 23 ilustra os movimentos do CubeSat através do software Systems Tool Kit (STK).

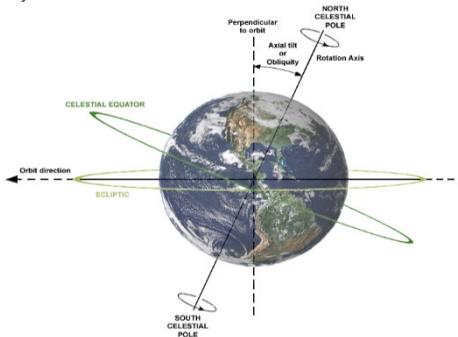
Figura 23 - Órbita do CubeSat obtida pelo STK.



Fonte: Morsch Filho *et al.* (2017).

O ângulo do satélite é a inclinação entre o plano da órbita no centro do satélite e a linha do equador, conforme Figura 24.

Figura 24 - Inclinação orbital em satélites.

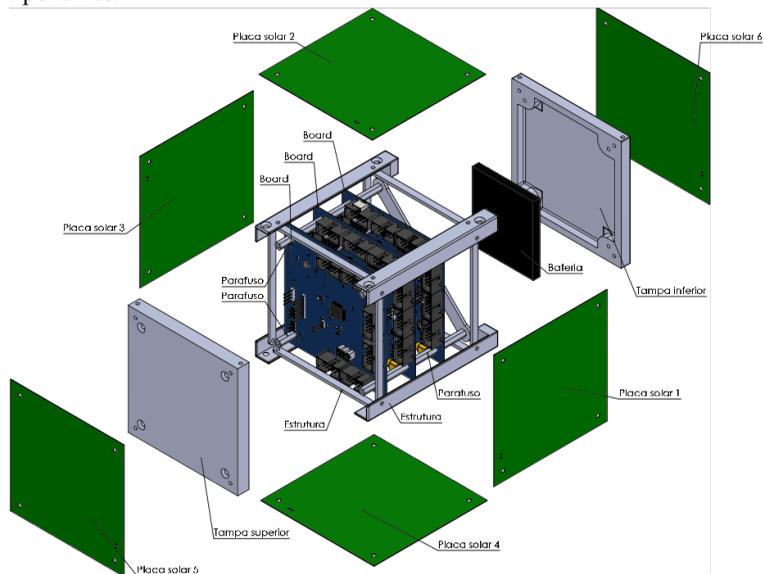


Fonte: Williams (2015).

A Figura 25 mostra em detalhes o FloripaSat com cada face contendo uma placa solar, ou seja, uma célula solar. A face 6 permanece apontada para a superfície terrestre sem efetuar giro em torno do seu próprio eixo. No espaço o satélite não realiza trabalho (e as transferências de calor por convecção são nulas). Assim, o transporte de calor se dá preferencialmente por condução e radiação (Gadalla 2005). A radiação interage na superfície do satélite a partir de emissões do Sol, Terra e espaço conforme Figura 26. As reflexões que ocorrem na superfície terrestre resultam em emissões de radiação infravermelha e o Albedo que por sua vez é a fração de

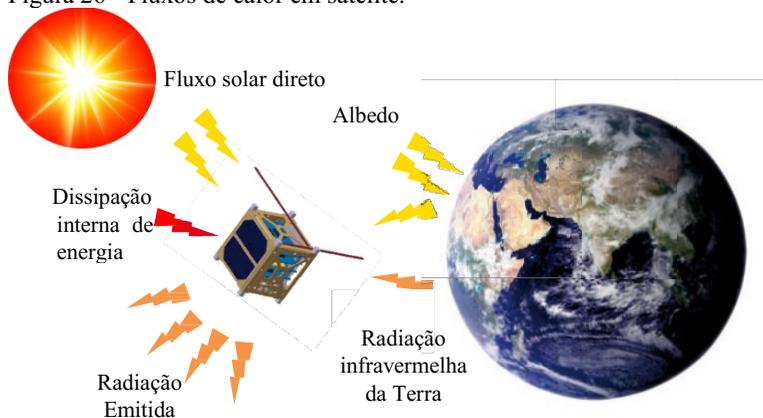
energia refletida em relação ao total de energia incidente. O fluxo de calor por condução flui através das estruturas de satélite e seus acessórios.

Figura 25 - Modelo do nanossatélite FloripaSat com vista explodida dos componentes.



Fonte: Adaptado de Morsch Filho et al. (2017)

Figura 26 - Fluxos de calor em satélite.



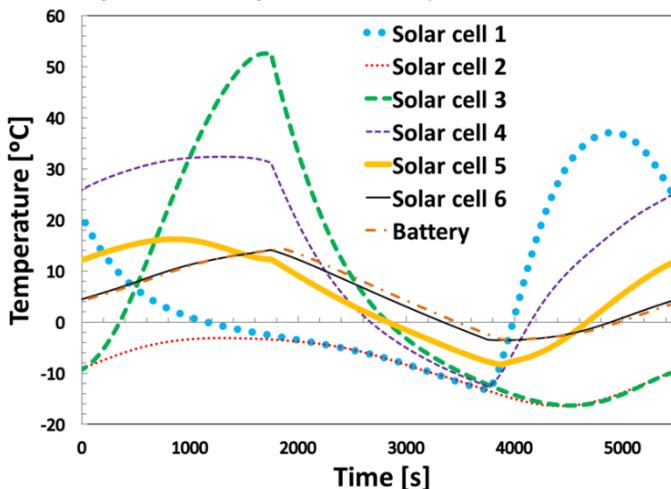
Fonte: Adaptado de Jacques (2009).

## 2.7.2 Avaliação dos gradientes de temperatura do CubeSat

Para medir o desempenho do TEG, um perfil de temperatura realista do nanossatélite deve ser adotado. Como uma carga útil do TEG estará a bordo do nanossatélite FloripaSat, seus perfis de temperatura foram empregados neste estudo. Morsch Filho *et al.* (2017) realizaram uma análise térmica para prever o perfil de temperatura do FloripaSat em órbita, empregando um método numérico térmico em 3D.

A Figura 27 apresenta a variação de temperatura obtida pelo método numérico para cada célula solar do nanossatélite durante uma órbita (5500 segundos). Estes resultados foram utilizados como parâmetro de entrada nos experimentos para simular a temperatura real entre as superfícies do TEG aplicadas na bancada de testes.

Figura 27 - Perfil de temperatura temporal para o ponto central das superfícies externas dos painéis solares para uma inclinação de 51.5°.



Fonte: Morsch Filho et al. (2017).

### 3 METODOLOGIA

Para cumprir com o objetivo estabelecido nesta proposta, o estudo é dividido em duas frentes, uma analítica, Capítulo 4, e outra experimental, capítulo 5. Uma bancada de testes experimentais já construída teve sua seção de testes adaptada para o presente estudo. Concomitante a isso, modelos matemáticos foram desenvolvidos para prever o comportamento térmico de um TEG, visando aplicações em nanossatélites. Para atender essa tarefa, foram testados três geradores termoeletricos. Primeiramente dois do fabricante TEGpro™ que foram submetidos a temperaturas abaixo de 300 K e um do fabricante Everredtronics Ltd., para avaliação da energia produzida durante o percurso do satélite em órbita. O satélite durante sua jornada esteve sujeito a gradientes de temperaturas abaixo de 300 K o que justifica uma primeira análise de um TEG nessas condições e na sequência ele inserido em uma viagem no espaço.

Todos os dispositivos são compostos do material Telureto de Bismuto. As principais propriedades do Telureto de Bismuto, características e especificações técnicas desses aparelhos encontram-se no Anexo B. O Fluxograma da Figura 28 destaca metodologia empregada neste trabalho.

Figura 28 - Fluxograma ilustrando a metodologia definida neste trabalho



Autor (2019).

Os Modelos analíticos foram desenvolvidos no EES® e Maple® a partir das principais referências: Lee 2016, Snyder e Caillat (2003), Kaushik e Manikandan (2015), Snyder e Snyder (2017). Os dados das principais propriedades do Telureto de Bismuto foram coletados de Poudel *et al.* (2008) e Yan *et al.* (2010). Em todos os cálculos será adotado que  $\Delta T \approx \Delta T_{\text{TEG}}$ . Os resultados experimentais foram obtidos na bancada experimental e confrontados com os modelos teóricos sugeridos.

## 4 ANÁLISE TEÓRICA

Os modelos analíticos concebidos neste estudo são baseados nas equações apresentadas no capítulo de revisão, para um sistema unidimensional e em regime permanente. Esses modelos são baseados nos trabalhos desenvolvidos por Lee (2016), Baranowski; Snyder; Toberer, (2013); Kaushik e Manikandan (2015). Em comparação com as literaturas científicas citadas, os modelos aqui propostos, apresentam modificações com o intuito de melhorar sua precisão através do ajuste de algumas hipóteses. Buscou-se unir o que os trabalhos utilizados como referência tinham de melhor, na tentativa de se obter um modelo analítico geral para os geradores termoelétricos. Elementos abordados superficialmente naqueles trabalhos foram amplamente discutidos, como por exemplo, a influência do efeito Thomson na geração de energia, a condutividade térmica dos elementos termoelétricos, a influência da variação de temperatura nas propriedades, as resistências térmicas dos contatos elétricos e do substrato de cerâmica.

Um fluxograma que descreve os modelos desenvolvidos nesse trabalho é apresentado na

Figura 29. Como pode ser observado os modelos foram divididos em dois grupos. O primeiro grupo avalia a geração de energia em temperaturas abaixo de  $0^{\circ}$  utilizando 2 TEG's (TGPR 10 e 5W), os resultados experimentais deste grupo são comparados com o modelo 1. O segundo está relacionado a análise do CubeSat utilizando o TEG 241-1.0-1,2. Neste último grupo são avaliados os modelos 1, 2, 3, 4 e 5 sendo o modelo 4 a grande contribuição deste trabalho para o estado da arte. Por fim, é realizada uma avaliação nas 6 faces do CubeSat a partir do modelo 1 com o intuito de investigar o quanto de energia pode ser produzida no satélite em órbita.

A Tabela 1 mostra, de maneira geral, a abrangência dos modelos quando o objetivo é avaliar um bloco, um par ou um gerador como um todo. Os modelos 4 e 5 propostos pelo autor são os que possuem maior abrangência. O modelo 5 é uma decorrência do modelo 4 que por sua vez foi desenvolvido a partir da condutividade térmica efetiva (CTE).

Na Tabela 2 é realizada uma síntese com os principais objetivos de dos modelos desenvolvidos.

A Tabela 3 sintetiza as principais equações utilizadas em cada modelo. Os modelos 1 e 4 permitem avaliar as principais propriedades térmicas, elétricas e termoelétricas, enquanto que os modelos 2 e 3 se destinam a avaliação da transferência de calor no gerador termoelétrico. Nos modelos 2 e 3 a taxa de transferência de calor através da equação de

Fourier utilizando conceitos de resistência térmica ou condutância térmica de cada modelo segue conforme em (100).

$$Q = \frac{\Delta T}{\theta} = K \Delta T \quad (100)$$

Tabela 1 - Abrangência do modelo teórico.

<b>Parâmetros</b>	<b>Um bloco (<i>p</i> ou <i>n</i>)</b>	<b>Um par (<i>p</i> e <i>n</i>)</b>	<b>Módulo inteiro com <i>n</i> pares</b>
Modelo 1		x	x
Modelo 2		x	x
Modelo 3		x	x
Modelo 4	x	x	x
Modelo 5	x	x	x

Fonte: Autor (2019).

O modelo 1 se divide em teórico ideal que não inclui os efeitos Thomson e um teórico com “perdas” que inclui esses efeitos. O modelo 4, condutividade térmica efetiva, avaliou as principais propriedades termoelétricas que foram validadas através da comparação com dados experimentais no capítulo 6. Além da condutividade térmica efetiva proposta neste trabalho serão também incluídos os modelos de condutividade térmica efetiva com efeitos Thomson e o modelo de Baranowski, Snyder e Toberer (2013) com a inserção de uma constante de modificação. Em resumo, a avaliação é feita da seguinte forma:

Grupo Gradiente de temperatura abaixo de 0 °C:

- Modelo 1, Ideal (sem efeito Thomson) e Perdas (com efeito Thomson).

Grupo CubeSat:

a) Avaliação/Validação:

Os modelos abaixo avaliam as propriedades conforme constam na Tabela 3.

- Modelo 1, Ideal (sem efeito Thomson) e Perdas (com efeito Thomson);
- Modelo 4, Condutividade Térmica Efetiva;

- Modelo 5, metodologia para obtenção de  $n$ .

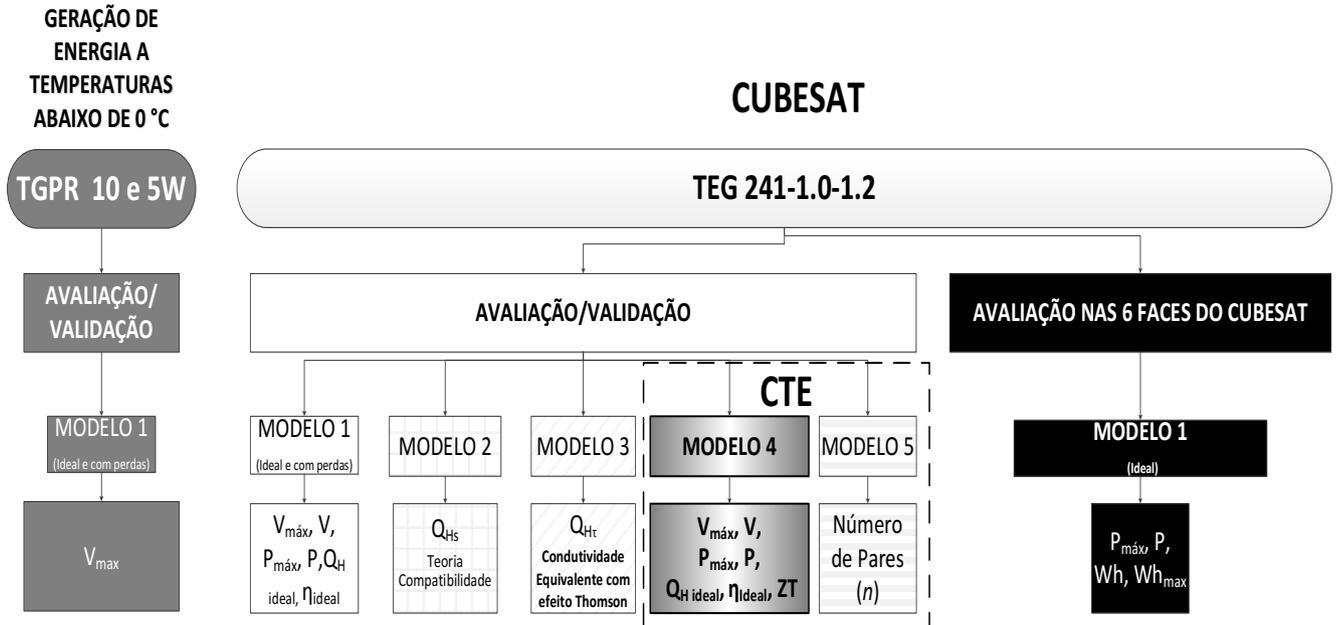
Os modelos abaixo conforme Tabela 3 estão voltados para avaliação das condutividades térmicas e transferências de calor.

- Condutividade térmica ideal (Modelo 1);
- Condutividade térmica de Baranowski, Snyder e Toberer (2013) com inserção de constante de modificação (Modelo 2);
- Condutividade térmica equivalente (Modelo 3);
- Condutividade térmica efetiva proposta neste trabalho, CTE, (Modelo 4).

b) Avaliação de energia nas 6 faces:

- Modelo 1, Ideal (sem efeito Thomson)

Figura 29 - Fluxograma descrevendo as principais propostas deste trabalho.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 2 - Detalhes dos modelos teóricos em relação ao grupo e os objetivos.

<b>Modelo</b>	<b>Gerador Termoelétrico</b>	<b>Grupo</b>	<b>Objetivo(s)</b>
1	TEG 241-1.0-1.2	CubeSat	Determinar a quantidade de energia gerada nas 6 faces.
1	TGPR 10 E 5 W	Gradiente abaixo de 0 °C	Avaliar os TEG's de 5W e 10 W submetidos a gradientes de temperatura abaixo de 0 °C.
2	TEG 241-1.0-1.2	CubeSat	Proposta do autor para um modelo de condutividade térmica efetiva com inclusão dos efeitos Thomson. Avaliar transferência de calor em todo o dispositivo.
3	TEG 241-1.0-1.2	CubeSat	Condutividade térmica efetiva modelada a partir das teorias de compatibilidade de Baranowski, Snyder e Toberer (2013). Inclusão de uma constante de modificação "c" proposta pelo autor. Avaliar transferências de calor em todo o dispositivo.
4	TEG 241-1.0-1.2	CubeSat	Modelo CTE proposto pelo autor. Simplifica as principais equações constituindo-se em um método prático para se estimar as principais propriedades termoelétricas. Validação do modelo e das relações entre $zT$ e $ZT$ .
5	TEG 241-1.0-1.2	CubeSat	Metodologia para estimar o número de pares de um dispositivo termoelétrico a partir da CTE proposta pelo autor. Validação da metodologia.

Fonte: Autor (2019)

Tabela 3 - Modelos teóricos e suas respectivas equações.

<b>Modelo</b>	<b>Resultado</b>	<b>Nº Equações</b>
1	$V_{\max}, V, P, P_{\max}, \dot{Q}_h, \eta, Wh$	Sem efeito Thomson: (49),(46),(47),(51),(39), (71),(204)
		Com efeito Thomson: (67), (60), (61), (68), (52), (62),(204)
2	$k_{ef}, \theta_T, \dot{Q}_h$	Baranowski; Snyder; Toberer, (2013):(107), (112), (100)
		Modificado: (110),(113), (100)
3	$k_{ef}, \theta_T, \dot{Q}_h$	(124),(127),(100)
4	$V, V_{\max}, P, P_{\max}, \dot{Q}_h, \theta_T, k_{ef}, \eta,$ $ZT$	<b>Erro! Fonte de referência não encontrada.</b> , (170), (160), (162), (100) (141),(143),(174),(178)
5	$n$	(183)

Fonte: Autor (2019).

#### 4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TEG'S

Os módulos termoeétricos utilizados neste trabalho possuem parâmetros geométricos que estão dispostos na Tabela 4 e Tabela 5. Maiores informações sobre os TEG's podem ser obtidas no Anexo A. O modelo da empresa Everredtronics possui 241 pares termoeétricos *p-n* e os da empresa TEGpro possuem 126 pares. Algumas medidas geométricas dos TEG's da empresa TEGpro não estão disponíveis, sendo assim, alguns TEG's desse modelo foram abertos para a verificação de medidas.

Tabela 4 - Parâmetros geométricos do TEG, semicondutores p-n, Alumina, contatos elétricos de cobre.

$n$	Número de pares	241
$A$	Área total do TEG	0,0016 m <sup>2</sup>
$A_{leg}$	Área da seção transversal da barra (haste) dos semicondutores	0,000001 m <sup>2</sup>
$L_{leg}$	Comprimento da barra (haste) dos semicondutores	0,0012 m
$w_{leg}$	Largura da (haste) dos semicondutores	0,001 m
$A_{alum}$	Área do Substrato de Alumina	0,0016 m <sup>2</sup>
$L_{alum}$	Comprimento do Substrato de Alumina	0,0012 m
$\kappa_{alum}$	Condutividade térmica da Alumina	30 W/mK

Fonte: Everredtronics Ltd (2018).

Tabela 5 - Características dos Geradores Termoeétricos TEGpro™. Medidas aproximadas.

<b>TEGMART Telureto de Bismuto</b>		
<b>Módulo Termoeétrico</b>	<b>TEG 5W-5V-40S</b>	<b>TEG 10W-4V-40S</b>
$n$	126	126
$L_{leg}$	2	1,16
$h_{leg}$	1,4	1,54
$w_{leg}$	1,4	1,4
$A_{leg}$	1,96	2,156
$L_{alum}$	1,5	1,92
$A_{alum}$	1600	1600

Fonte: TEGMART™ (2018).

Será utilizado neste trabalho o índice “leg” para definir as propriedades dos blocos, ou hastes, dos materiais semicondutores **p-n**. Logo, a geometria desses elementos **p-n** localizadas no interior do TEG possuem comprimento e a área da seção transversal conforme mostram as Tabela 4 e Tabela 5. O índice “alum” se refere a alumina e será adotado nos cálculos. O dispositivo termoelétrico possui as áreas das faces (substratos de alumina) iguais e, além disso, com o mesmo comprimento.

## 4.2 CONSIDERAÇÕES TÉRMICAS

Serão apresentados nessa Seção os fenômenos térmicos nos substratos cerâmicos compostos pela alumina e contatos elétricos, desprezando-se os efeitos convectivos do ar nas cavidades.

### 4.2.1 Temperatura média

Os modelos termoelétricos iniciam com os dados de entrada das temperaturas da face quente e da face fria. A partir delas uma temperatura média é obtida através da expressão a seguir:

$$\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2} \quad (101)$$

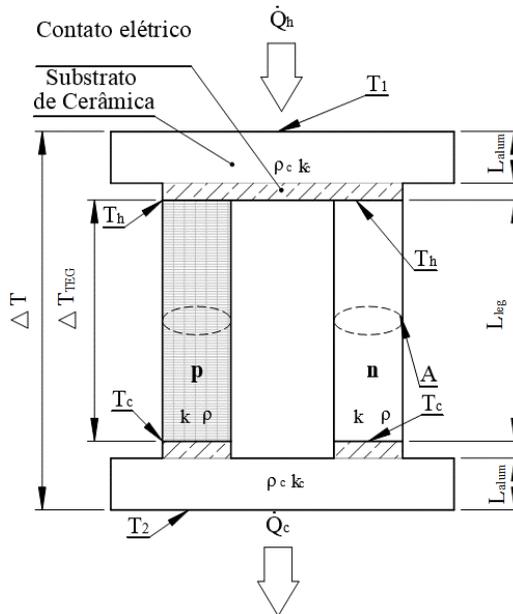
A temperatura média é o valor estimado no interior do módulo termoelétrico e através dela é possível avaliar as propriedades físicas para os elementos **p** e **n** a partir de dados disponíveis na literatura científica. Essas informações são constituídas de curvas experimentais envolvendo materiais termoelétricos contendo as suas principais propriedades como  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $k$  em função da temperatura. Conforme consta na Subseção 2.3.1 Poudel *et al.* (2008) publicou dados para os elementos **p** e Yan *et al.* (2010), Subseção 2.3.2, para o elemento **n**. Sendo assim, o coeficiente de Seebeck, resistividade elétrica e condutividade térmica para uma faixa de 300 K < T < 550 K. Mas para atender ao intervalo de operação da bancada experimental, 260 K < T < 550 K, recorreu-se a uma extrapolação destes dados a partir de 260 K permitindo assim avaliar o TEG em relação a temperaturas médias mais baixas. Os elementos semicondutores **p** e **n** utilizam as equações (216) e (217) para a resistividade elétrica, (218) e (219) para o coeficiente de Seebeck, (220) e (221) para a condutividade térmica, todas fornecem os resultados dessas grandezas por intermédio

dos valores da temperatura média que, por sua vez, dependem das temperaturas das faces quente e fria.

#### 4.2.2 Variação de temperatura em geradores termoeétricos

A Figura 30 (a) ilustra um par termoeétrico  $p$  e  $n$  e suas nomenclaturas e a Figura 30 (b) um modelo de resistência térmica equivalente apenas na face quente.

Figura 30 - (a) Par Termoeétrico sem a presença de ar nas cavidades. (b) Modelo de resistência térmica equivalente.



Fonte: Autor (2019)

Uma observação quanto a variação de temperaturas na face quente é proposta por Dalola *et al.* (2009). Desprezando-se a presença dos contatos elétricos observa-se que as temperaturas nos substratos de cerâmicas não correspondem as temperaturas entre as faces dos TEG. Seja  $\Delta T$  a variação entre os substratos de cerâmicas que são as temperaturas mais externas e  $\Delta T_{TEG}$  as temperaturas entre as faces internas do TEG descritas respectivamente tem-se em (102) e (103).

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (102)$$

$$\Delta T_{TEG} = T_h - T_c \quad (103)$$

Dalola *et al.* (2009) estimou a temperatura efetiva do TEG através da equação abaixo em (104):

$$\Delta T_{TEG} \approx \frac{K_{alum}}{K_{alum} + 2K_{TEG}} \Delta T \quad (104)$$

Essa equação pode ser rearranjada em função da resistência térmica representada em (105):

$$\Delta T_{TEG} \approx \frac{\theta_{TEG}}{\theta_{TEG} + 2\theta_{alum}} \Delta T \quad (105)$$

#### 4.3 MODELO 1 - MODELO SIMPLIFICADO PARA UM TEG

O modelo 1 foi desenvolvido pelo autor para ser aplicado tanto a um par termoelétrico (células **n** e **p**) quanto para um gerador termoelétrico completo. Esse modelo é destinado a avaliações do TEG com gradientes abaixo de 0 °C e ao CubeSat conforme pode ser visto na Tabela 2 e Figura 29.

A

Figura 31 (a) representa o modelo unidimensional para um par termoelétrico denominado “ideal”, sem perdas por efeito Thomson. A

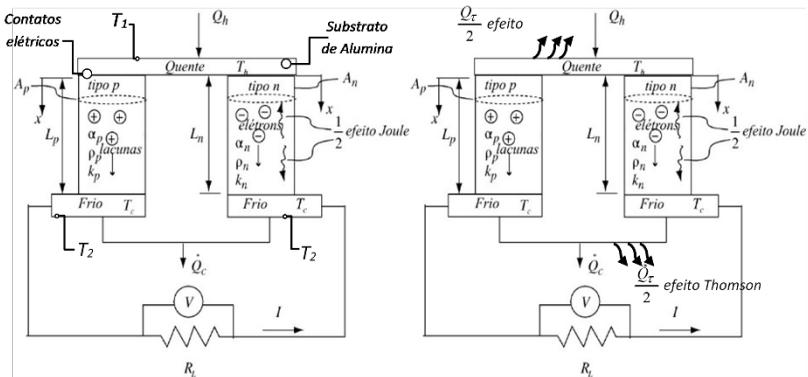
Figura 31 (b) detalha o modelo não ideal, unidimensional para um par termoelétrico, isto é, o modelo adota perdas por efeitos Thomson. No modelo ideal calor é inserido pela face quente e removido pela face fria, havendo perdas por efeito Joule apenas. Na segunda abordagem, dita não ideal, há perdas por efeito Joule e efeito Thomson. A partir da avaliação de um par termoelétrico é possível a expansão para um gerador com *n* pares.

- **Parâmetros Geométricos**

- a) Comprimento e área dos elementos termoelétricos (célula **p** e **n**) são idênticos;
- b) Comprimento e área dos substratos são idênticos;

- c) Área efetiva é igual a área dos blocos termoeletricos,  
 $A_e = A_{leg.}$

Figura 31 - Modelo simplificado unidimensional para par termoeletrico (a) Ideal (b) Perdas por efeito Thomson Fonte: (a) e (b) Adaptado de Lee (2016).



Fonte: (a) e (b) Adaptado de Lee (2016)

### • Hipóteses Simplificadoras

Para a solução do modelo unidimensional foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Regime unidimensional;
- Regime permanente;
- Despreza-se perdas de calor por radiação e convecção;
- Temperatura na face quente do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face quente do TEG  $T_1 \approx T_h$ ;
- Temperatura na face fria do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face fria do TEG  $T_2 \approx T_c$ ;
- Na opção (b) do modelo o efeito Thomson é assumido como simetricamente distribuído entre o lado quente e frio.

### • Equacionamento

O modelo ideal utiliza as equações da Subseção 2.4.1 e o modelo não ideal as equações da Subseção 2.4.2.

A resistência elétrica do TEG é representada pela expressão (206). A resistência térmica total é variável em relação a temperatura devido a condutividade térmica que depende da temperatura resultando na equação (106).

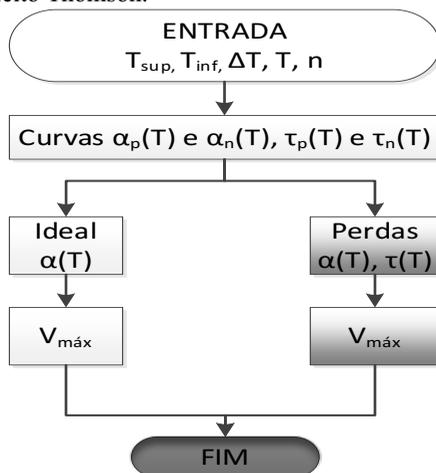
$$\theta(T)_{TEG} = \frac{L_{leg}}{nA_{leg}k(T)} \therefore K(T)_{TEG} = \frac{nA_{leg}k(T)}{L_{leg}} \quad (106)$$

- **Fluxograma para Gradientes abaixo de 0 °C**

Para avaliações do TEG a temperaturas abaixo de 0 °C foi utilizado o modelo 1 e as variáveis descritas na Figura 32 os parâmetros de entrada são:

- Temperaturas na face quente e fria;
- Propriedades como o coeficiente de Seebeck e Thomson.

Figura 32 - Fluxograma do modelo 1 simplificado para um gerador termoeletrico submetido a temperaturas abaixo de 0 °C. Existem duas divisões uma ideal e outra com perdas por efeito Thomson.



Fonte: Autor (2019).

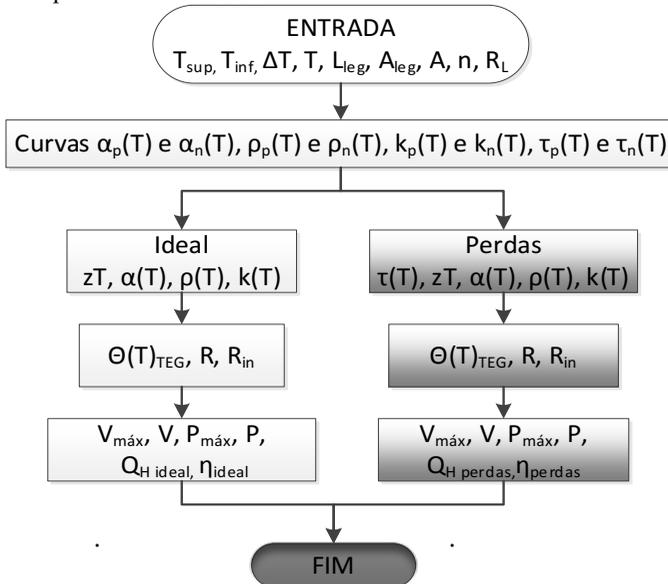
Na avaliação de gradientes de temperatura abaixo de 0° o modelo usa dados ( $\alpha$  e  $\tau$ ) de Poudel *et al.* (2008) Yan *et al.* (2010).

• **Fluxograma para o CubeSat**

A Figura 33 ilustra o fluxograma proposto para a determinação de parâmetros como potência máxima gerada e rendimento do gerador termoelétrico, para condições idealizadas e com perdas. Essa configuração mais ampla é destinada a avaliações no CubeSat. As variáveis de entrada do modelo 1 são as seguintes:

- a) Dados geométricos do gerador termoelétrico;
- b) Temperaturas na face quente e fria;
- c) Propriedades  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $k$  e  $\tau$  são coletadas a partir de curvas relacionadas a temperatura média dos elementos termoelétricos.

Figura 33 - Fluxograma do modelo simplificado para um gerador termoelétrico destinado a avaliações no CubeSat. Existem duas divisões uma ideal e outra com perdas por efeito Thomson.



Fonte: Autor (2019).

O modelo teórico 1 aplicado ao CubeSat utiliza dados ( $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $k$  e  $\tau$ ) do fabricante do TEG 241-1.0-1.2 descritas em equações contidas no

Apêndice C, Seção C.4 geradas através da Figura 95 para os elementos do tipo **p** e **n**. O modelo 1 proposto foi elaborado no software EES<sup>®</sup>.

#### 4.4 MODELO 2 – MODELO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA PROPOSTA POR BARANOWSKI; SNYDER; TOBERER PARA UM TEG

Nesse modelo, emprega-se a condutividade térmica efetiva definida a partir da teoria de compatibilidade proposta por Baranowski; Snyder; Toberer (2013). Esse parâmetro efetivo na sua origem foi investigado para um único par termoelétrico. O autor sugere o uso dessa variável em um modelo voltado para um dispositivo real com  $n$  pares e a inclusão de um fator de ajuste “c” com o intuito de examinar a transferência de calor na face quente.

- **Parâmetros Geométricos**

- a) Comprimento e área dos elementos termoeletricos são idênticos;
- b) Comprimento e área dos substratos são idênticos;
- c) Área efetiva igual a área dos blocos termoeletricos,  $A_e = A_{leg}$ ;
- d) Densidade de corrente reduzida igual ao fator de compatibilidade,  $u = s$ , em todo o bloco termoeletrico;
- e) Condutividade térmica idêntica de **p** e **n**,  $k_p = k_n = k$ ;
- f) Condutividade térmica média de um par constante sendo  $\bar{k} = 2k = 2,3\text{W/mK}$ ;
- g) Número de mérito constante com  $zT = 1,1$ .

- **Hipóteses Simplificadoras**

Para a solução do modelo unidimensional foram adotadas as hipóteses simplificativas listadas a seguir:

- a) Regime unidimensional;
- b) Regime permanente;
- c) Despreza-se perdas de calor por radiação e convecção;
- d) Temperatura na face quente do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face quente do TEG  $T_1 \approx T_h$ ;

- e) Temperatura na face fria do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face fria do TEG  $T_2 \approx T_c$ .

- **Equacionamento**

Baranowski; Snyder; Toberer (2013) propuseram uma condutividade térmica efetiva, equação (107), a partir da teoria da compatibilidade conforme vista no Seção 2.5, especificamente nas subseções 2.5.3 e 2.5.5. Ela inclui no modelo a transferência de calor por condução térmica de Fourier, os efeitos Peltier e Thomson em uma análise unidimensional em regime permanente.

$$k_s = \frac{\bar{k}T_h \left(1 + z\bar{T} + \sqrt{1 + z\bar{T}}\right)}{2(T_h - T_c)} \left(1 - \left(\frac{T_h}{T_c}\right)^{k_g}\right) \quad (107)$$

$$k_g = \frac{2 - 2\sqrt{1 + z\bar{T}}}{z\bar{T}} \quad (108)$$

Onde  $k_g$  em (108) é uma constante. Para o número de mérito do par atribui-se um valor médio a partir da equação (109).

$$\bar{zT} = \frac{1}{T_f - T_i} \int_{T_i}^{T_f} zT(T) dT = \frac{1}{T_f - T_i} \int_{T_i}^{T_f} \frac{\alpha^2(T)}{\rho(T)k(T)} dT \quad (109)$$

Todas as propriedades na equação (109) são avaliadas em função da temperatura média entre a face quente e fria do gerador termoelétrico. Então, todas as temperaturas na expressão citada são valores médios tomados em referência a um valor inicial “ $i$ ” até o final em “ $f$ ” indicando o número de mérito médio em uma determinada operação. Os autores deduziram a equação (107) a partir de considerações de um gerador termoelétrico otimizado, contendo um par  $\mathbf{p-n}$ , utilizando as teorias da compatibilidade termoelétrica. Neste modelo, são avaliadas duas formas de transferência de calor: uma a partir do modelo de condutividade térmica (107) para um dispositivo contendo  $n$  pares e a outra inserindo uma constante de modificação “ $c$ ” em (107) conforme a equação (110) para um dispositivo com  $n$  pares.

$$k_{sm} = c \cdot \frac{\bar{k}T_h \left(1 + z\bar{T} + \sqrt{1 + z\bar{T}}\right)}{2(T_h - T_c)} \left(1 - \left(\frac{T_h}{T_c}\right)^{k_z}\right) \quad (110)$$

$$c \approx \frac{\dot{Q}_{exp}}{\dot{Q}_s} \quad (111)$$

Onde  $\dot{Q}_s$  é a taxa de transferência de calor utilizando  $k_s$ , e  $\dot{Q}_{exp}$  a taxa de transferência de calor experimental.

Essa constante “c” é um fator de ajuste, obtida a partir da razão entre a transferência de calor experimental e a transferência de calor do modelo de condutividade térmica proveniente das teorias de compatibilidade. Ela é demonstrada na equação (111), percebe-se que é uma aproximação entre as taxas de transferência de calor, no caso do valor experimental ser igual ao teórico  $c = 1$ . Na equação (110)  $k_{sm} = c \cdot k_s$ .

Para a transferência de calor com a condutividade térmica efetiva (107) e a efetiva modificada (110), as resistências térmicas utilizadas neste modelo seguem, respectivamente, na expressão (112) e (113). A transferência de calor para todo o dispositivo é determinada por condução de Fourier.

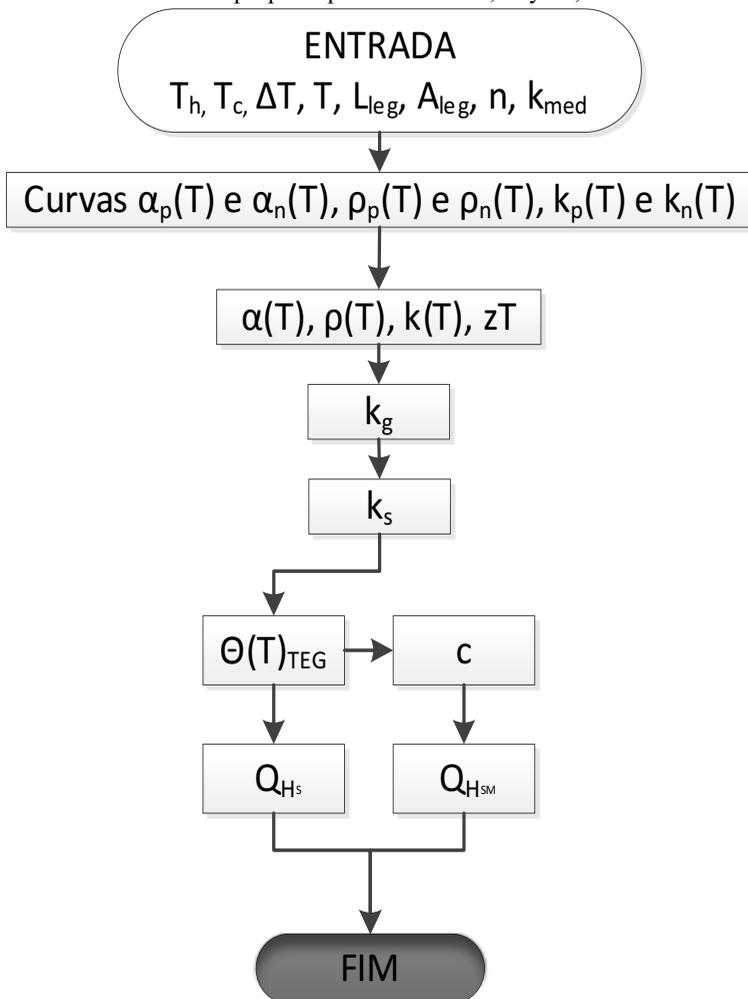
$$\theta(T)_{TEG} = \frac{L_{leg}}{nA_{leg}k_s(T)} \therefore K(T)_{TEG} = \frac{nA_{leg}k_s(T)}{L_{leg}} \quad (112)$$

$$\theta(T)_{TEG} = \frac{L_{leg}}{nA_{leg}k_{sm}(T)} \therefore K(T)_{TEG} = \frac{nA_{leg}k_{sm}(T)}{L_{leg}} \quad (113)$$

Baranowski; Snyder; Toberer (2013) avaliaram a equação (107) apenas para uma par termoelétrico, o autor sugere neste modelo a avaliação para um dispositivo real com  $n$  pares e também inclui um fator de ajuste “c”. O modelo 2 proposto foi elaborado no software EES®.

- **Fluxograma**

Figura 34 - Modelo de global de um gerador termoelétrico a partir da condutividade térmica efetiva proposta por Baranowski; Snyder; Toberer.



Fonte: Autor (2019).

#### 4.5 MODELO 3 - MODELO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE COM EFEITOS THOMSON

Este modelo avalia uma condutividade térmica equivalente incluindo as influências dos efeitos Thomson, proposta pelo autor, a fim

de avaliar a transferência de calor na face quente. A avaliação segue a mesma temática da

Figura 31(b).

- **Parâmetros Geométricos**

- Comprimento e área dos elementos termoelétricos (célula **p** e **n**) são idênticos;
- Comprimento e área dos substratos são idênticos;
- Área efetiva é igual a área dos blocos termoelétricos,  
 $A_c = A_{leg}$ .

- **Hipóteses Simplificadoras**

Para a solução do modelo unidimensional foram adotadas as hipóteses simplificativas listadas a seguir:

- Regime unidimensional;
- Regime permanente;
- Despreza-se perdas de calor por radiação e convecção;
- Temperatura na face quente do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face quente do TEG  $T_1 \approx T_h$ ;
- Temperatura na face fria do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face fria do TEG  $T_2 \approx T_c$ .
- O efeito Thomson é assumido como simetricamente distribuído entre o lado quente e frio

- **Equacionamento**

Kaushik e Manikandan (2015) propuseram um número de mérito para todo o dispositivo com considerações do efeito Thomson a partir da equação (114).

$$ZT = \frac{\alpha}{KR}(\alpha - \tau) \cdot \bar{T} \quad (114)$$

Quando o valor de  $\tau = 0$ , as propriedades são constantes e o coeficiente de Seebeck não varia com a temperatura assim, o número de mérito

retorna a sua forma consagrada conforme equação (13) sabendo que  $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$ .

Propõe-se nesse trabalho, avaliando a proposta de Kaushik Manikandan (2015), equação (114), que assim como ZT o número de mérito do material zT deve estar associado aos efeitos Thomson. O número de mérito sofre alterações enquanto o par termoelétrico está em operação, sendo assim, o parâmetro z é substituído por  $z_\tau$  proposto nesse trabalho através das equações (115), (116) e (117). Nessas equações todas as propriedades são avaliadas em referência a um elemento termoelétrico.

$$z_\tau T = \frac{\alpha}{K_{leg} R_{leg}} (\alpha - \tau) \cdot \bar{T} \quad (115)$$

$$z_\tau T = \frac{\alpha}{\rho k} (\alpha - \tau) \cdot \bar{T} \quad (116)$$

$$z_\tau T = \left(1 - \frac{\tau}{\alpha}\right) \cdot z \bar{T} \quad (117)$$

Assim, a condutividade térmica equivalente de um material termoelétrico submetida aos efeitos Thomson pode ser determinada pela equação (118):

$$z_\tau T = \frac{\alpha_{ef}^2}{\rho_{ef} k_{ef}} \bar{T} \quad (118)$$

Para a maioria dos materiais termoelétricos, a condutividade térmica varia com a temperatura. O mesmo efeito é percebido para o coeficiente de Seebeck e a resistividade elétrica (BARANOWSKI; SNYDER; TOBERER, 2013). Quando a condutividade térmica é comparada com aquelas propriedades, percebe-se que ela possui uma variação significativa. Em algumas situações a condutividade pode dobrar de valor. Esse fato, na maioria dos modelos, não é computado, atribuindo-se um valor constante. Desse modo, propõe-se um modelo de condutividade térmica equivalente computando essa variação, além de considerar os efeitos Thomson. Considerando que todas as propriedades envolvidas são consideradas variáveis com a temperatura, assumindo que  $\rho_{ef} \approx \rho$  e

$\alpha_{\text{ef}} \approx \alpha$ , igualando (117) com (118), determina-se a condutividade térmica equivalente com efeitos Thomson para um único bloco termoelétrico em (119):

$$k_{\tau} = \frac{k}{(1 - \tau/\alpha)} \quad (119)$$

Definindo a razão entre o coeficiente de Thomson com o coeficiente de Seebeck como **razão de mérito** representada pela letra B, isto é,  $\tau/\alpha = B$ , (120).

$$k_{\tau} = \frac{k}{(1 - B)} \quad (120)$$

Sabendo que a razão de mérito pode ser desenvolvida a partir da equação (117), temos então a equação (121):

$$B = \frac{\tau}{\alpha} = \frac{z - z_{\tau}}{z} \quad (121)$$

Com isso, a expressão (120) pode ser deixada em função dos números de mérito conforme (122):

$$k_{\tau} = \left( \frac{zT}{z_{\tau}T} \right) k \quad (122)$$

No gerador termoelétrico todos os elementos termoelétricos ficam expostos à mesma variação de temperatura entre a face quente e fria. Assim, a taxa de transferência de calor fluindo pela face quente divide-se por todos os pares termoelétricos de forma que eles se encontram termicamente em paralelo. Para a situação de um único par termoelétrico, considerando áreas e comprimentos iguais para os elementos  $p$  e  $n$ , com as propriedades variando conforme a temperatura, a condutividade térmica equivalente com efeitos Thomson pode ser determinada com a associação em paralelo das condutividades do par termoelétrico, conforme (123):

$$k_{\tau} = k_{\tau_p} + k_{\tau_n} \quad (123)$$

Desenvolvendo (123) chega-se a equação (124):

$$k_{\tau} = \frac{k_p}{\left(1 - \frac{\tau_p}{\alpha_p}\right)} + \frac{k_n}{\left(1 - \frac{\tau_n}{\alpha_n}\right)} \quad (124)$$

Introduzindo o termo  $B_p$  que é a razão de mérito para elemento  $p$  e  $B_n$  para o elemento  $n$ , tem-se (125):

$$k_{\tau} = \frac{k_p}{(1 - B_p)} + \frac{k_n}{(1 - B_n)} \quad (125)$$

Para o caso específico em que as condutividades térmicas são consideradas iguais, conclui-se  $B_p = B_n = B$  e a equação (125) torna-se a equação (126), que nada mais é que a equação sugerida anteriormente:

$$k_{\tau} = \frac{(k_p + k_n)}{(1 - B)} = \frac{k}{(1 - B)} \quad (126)$$

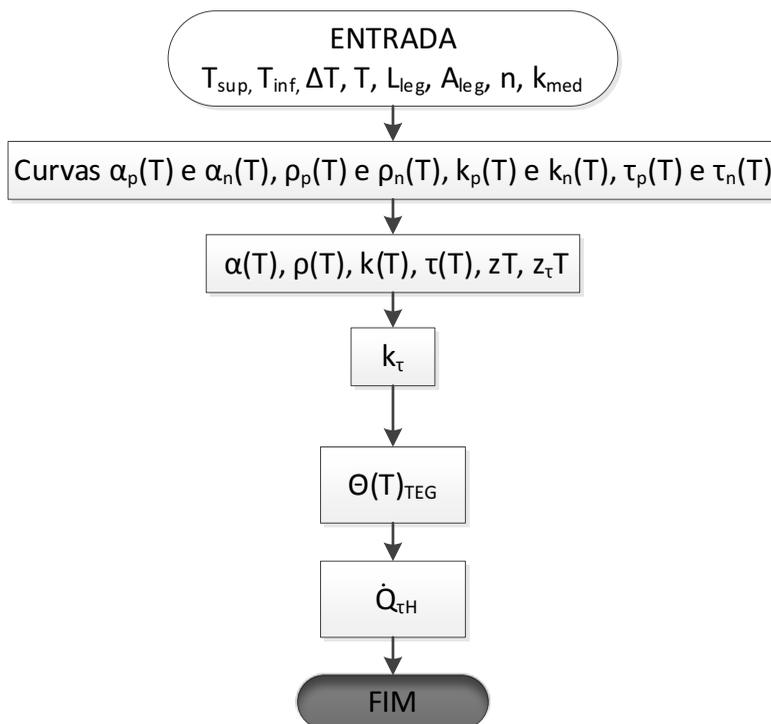
A resistência térmica para o modelo é apresentada na equação (127), e as transferências de calor para todo o dispositivo são determinadas por condução de Fourier.

$$\theta(T)_{TEG} = \frac{L_{leg}}{nA_{leg}k_{\tau}(T)} \therefore K(T)_{TEG} = \frac{nA_{leg}k_{\tau}(T)}{L_{leg}} \quad (127)$$

- **Fluxograma**

A Figura 35 mostra a sequência com os parâmetros de entrada, as principais variáveis envolvidas e os procedimentos na execução do modelo 3. Esse modelo foi desenvolvido no software EES®.

Figura 35 - Modelo de condutividade térmica efetiva com efeitos Thomson proposta pelo autor.



Fonte: Autor (2019).

#### 4.6 MODELO 4 - MODELO GLOBAL DE UM TEG A PARTIR DA CTE

A

Figura 31 (a) representa o modelo de condutividade térmica efetiva (CTE) que será demonstrado com maiores detalhes na Subseção 4.6.1. Ele foi desenvolvido pelo autor utilizando os softwares Maple<sup>®</sup> nas deduções matemáticas e EES<sup>®</sup> na obtenção dos resultados. O modelo serve tanto para um gerador termoelétrico quanto para um refrigerador termoelétrico, porém este trabalho se delimitará a dispositivos que geram potência elétrica. O modelo 3 sugere uma condutividade térmica equivalente com a inclusão dos efeitos Thomson enquanto que o modelo CTE desenvolve uma condutividade térmica efetiva a partir da equação

ideal de calor (39) e com isso engloba os efeitos de Fourier, Seebeck e Joule desconsiderando os efeitos Thomson. Em resumo a condutividade equivalente do modelo 3 incorpora os efeitos Thomson e a CTE os três efeitos do lado direito da equação ideal, (39), em uma única variável.

- **Parâmetros Geométricos**

- Comprimento e área dos elementos termoeétricos são idênticos;
- Comprimento e área dos substratos são idênticos;
- Área efetiva igual a área dos blocos termoeétricos,  
 $A_e = A_{leg}$ .

- **Hipóteses Simplificadoras**

Para a solução do modelo unidimensional foram adotadas as hipóteses simplificativas listadas a seguir:

- Regime unidimensional;
- Regime permanente;
- Despreza-se perdas de calor por radiação e convecção;
- Temperatura na face quente do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face quente do TEG  $T_1 \approx T_h$ ;
- Temperatura na face fria do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face fria do TEG  $T_2 \approx T_c$ .

- **Equacionamento**

A equação (128) representa a condutividade térmica efetiva total no lado quente e a equação (129) a do lado frio. Essas equações serão deduzidas e exploradas com maiores detalhes na Subseção 4.6.1.

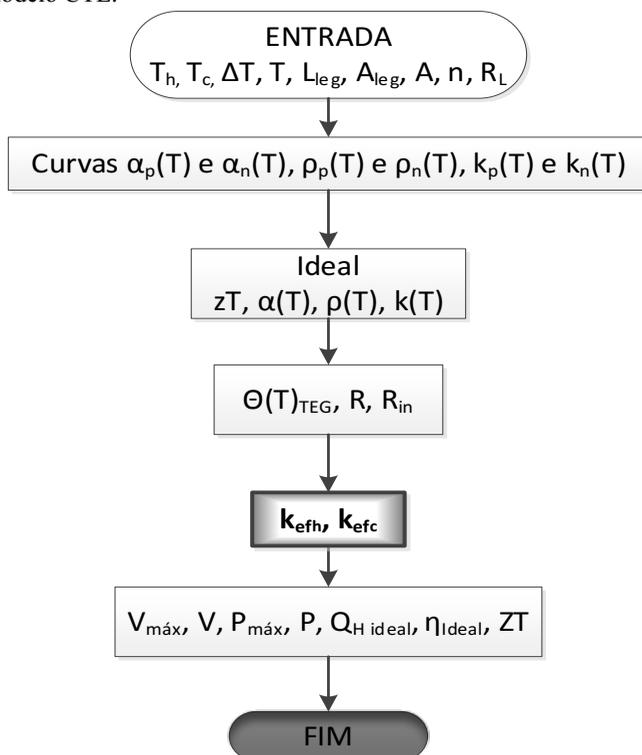
$$k_{eff_r} = nk \left\{ 1 + \frac{[2(R_m + R_L)T_h - R_m \Delta T] R_m \overline{zT}}{2\overline{T} (R_m + R_L)^2} \right\} \quad (128)$$

$$k_{efc} = nk \left\{ 1 + \frac{[2(R_{in} + R_L)T_c + R_{in}\Delta T]R_{in}z\bar{T}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \right\} \quad (129)$$

### • Fluxograma

No fluxograma, Figura 36, as variáveis de entrada podem ser classificadas em térmicas, dimensões e características do dispositivo, e resistência externa.

Figura 36 - Modelo CTE.



Fonte: Autor (2019).

A primeira relacionada as temperaturas das faces do gerador termoelétrico, a segunda fornecida pelo fabricante e a última a resistência de carga externa escolhida, definida no projeto ou equipamento. Na

sequência com os valores do coeficiente de Seebeck, resistividade  $\rho$  e condutividade térmica dos elementos  $p-n$  encontram-se seus respectivos valores totais e mais o número de mérito médio do par termoeletrico. Encontrando a resistência interna de um elemento e a total, chega-se a CTE do lado quente e frio a partir das equações (128) e (129) respectivamente. Obtendo as duas condutividades térmicas efetivas é possível calcular as principais grandezas termoeletricas conforme constam no final do fluxograma.

#### 4.6.1 Modelo de condutividade térmica efetiva – CTE

Nessa Subseção será apresentado um novo procedimento para avaliação dos geradores termoeletricos a partir da condutividade térmica efetiva. O foco deste trabalho está voltado para um gerador termoeletrico, mas essa avaliação também pode ser realizada para um refrigerador termoeletrico. A nova abordagem permite prever os principais parâmetros de avaliação de desempenho como: transferência de calor na face quente e fria, potência elétrica, tensão elétrica, corrente elétrica e eficiência termoeletrica em função da condutividade térmica efetiva. Introduce também uma nova forma de avaliação do número de mérito ( $ZT$ ,  $zT$ ), estabelecendo uma relação entre eles e finaliza com um método prático para determinação dos pares termoeletricos de um dispositivo termoeletrico que será melhor detalhado na Seção 4.7. O modelo permite avaliações com propriedades constantes ou variáveis como, por exemplo, as que dependem da temperatura. Com essa nova metodologia sugerida obtêm-se os mesmos resultados da abordagem clássica, porém permite obter parâmetros de dimensionamento a partir de medidas do gerador termoeletrico como: comprimento, área, resistências internas, resistências externas e temperaturas nas faces, frequentemente disponibilizadas pelo fabricante ou que podem ser aferidas.

A Figura 10 ilustra um módulo termoeletrico com todos os seus pares termoeletricos enquanto que na Figura 11 destaca-se apenas um par termoeletrico em operação. No circuito termoeletrico da Figura 10 existe uma carga  $R_L$  conectada, por onde passa uma corrente elétrica. A equação (39) define a transferência de calor na face quente e a equação (40) na face fria para um gerador termoeletrico com  $n$  pares. A partir da análise dessas equações introduce-se as condutividades térmicas efetiva total no lado quente,  $k_{hef_r}$ , e no lado frio,  $k_{cef_r}$ , de um gerador termoeletrico. Sabendo que  $K=1/\theta$  e que  $\Delta T=T_h-T_c$  a equação (39) resulta em (130):

$$\dot{Q}_h = n \left[ \frac{\Delta T}{\theta} + \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R \right] \quad (130)$$

Nota-se que no lado direito da equação (39), o último termo relacionado a condução térmica foi rearranjado passando a ser o primeiro termo da equação (130). Multiplicando por  $n$  todos os termos do lado direito e inserindo a equação (45) na equação (39) e lembrando que  $R_{in} = nR$  obtém-se a equação (131).

$$\dot{Q}_h = n \frac{\Delta T}{\theta} + n\alpha \left( \frac{n\alpha\Delta T}{R_{in} + R_L} \right) T_h + \left( \frac{n\alpha\Delta T}{R_{in} + R_L} \right)^2 \frac{R_m}{2} \quad (131)$$

Dividindo por  $\Delta T$  ambos os lados da equação (131) tem-se:

$$\frac{\dot{Q}_h}{\Delta T} = \frac{1}{\theta_{efh_r}} = \frac{n}{\theta} + n\alpha \left( \frac{n\alpha}{R_{in} + R_L} \right) T_h + \frac{n^2 \alpha^2 \Delta T}{(R_{in} + R_L)^2} \frac{R_m}{2} \quad (132)$$

Reagrupando os termos temos a equação (133). No denominador do lado esquerdo da equação é apresentado o termo de resistência térmica efetiva,  $\theta_{hef_r}$ .

$$\frac{1}{\theta_{efh_r}} = \frac{n}{\theta} + \frac{n^2 \alpha^2 (2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in}\Delta T)\theta}{2(R_{in} + R_L)^2 \theta} \quad (133)$$

Sabendo que  $\theta = L/kA$  e  $R = \rho L/A$  tem-se:

$$\theta = \frac{R}{\rho k} \quad (134)$$

Substituindo a equação (134) na equação (133) obtém-se:

$$\frac{1}{\theta_{efh_r}} = \frac{n}{\theta} + \left( \frac{\alpha^2}{\rho k} \right) \frac{n^2 R (2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in}\Delta T)}{2(R_{in} + R_L)^2 \theta} \quad (135)$$

O termo  $\alpha^2/\rho k$  é igual ao número de mérito do material conforme equação (9). Nesse caso representado por um par **p-n** pois as grandezas envolvidas  $\alpha$ ,  $\rho$  e  $k$  são totais, conforme equação (33), (35) e (36). Seja  $\bar{z}$  e  $\bar{zT}$  respectivamente número de mérito de um par e o número de mérito adimensional de um par, sabendo que os números de méritos dos elemento **p** e **n** possuem valores muito próximos conforme (137) é possível concluir que o número de mérito de um par é aproximadamente o dobro do número de mérito de seus elementos, (138):

$$z_p T \approx z_n T \quad (136)$$

$$\frac{\alpha_p^2 \bar{T}}{\rho_p k_p} \approx \frac{\alpha_n^2 \bar{T}}{\rho_n k_n} \quad (137)$$

$$\bar{zT} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 \bar{T}}{(\rho_p + \rho_n)(k_p + k_n)} \approx 2zT \quad (138)$$

Logo o número de mérito de um elemento é aproximadamente igual a metade do número de mérito de um par. Essa consideração já foi adotada por Baranowski, Snyder e Toberer (2013).

$$zT \approx \frac{\bar{zT}}{2} \quad (139)$$

Assim a equação (135) assume a forma da equação (140).

$$\frac{1}{\theta_{efr}} = \frac{n}{\theta} + \frac{nR_{in} \bar{z} (2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in}\Delta T)}{2(R_{in} + R_L)^2 \theta} \quad (140)$$

A resistência térmica efetiva total é representada pela equação abaixo:

$$\theta_{efr} = \frac{L}{Ak_{efr}} \quad (141)$$

Os subscritos “h” e “c” serão incluídos nas avaliações para identificar respectivamente o lado quente e frio. Inserido a definição de resistência térmica efetiva total no lado esquerdo e a definição de resistência térmica no direito obtém-se a seguinte equação.

$$\frac{Ak_{effh}}{L} = \frac{Ank}{L} \left[ 1 + \frac{R_{in} \bar{z} (2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in}\Delta T)}{2(R_{in} + R_L)^2} \right] \quad (142)$$

Finalmente dividindo-se por  $T/T$  em ambos os lados da equação é encontrada a definição de condutividade térmica efetiva total no lado quente. Ela representa a condutividade térmica de todo os pares termoeletricos do dispositivo que ficam sujeitos a absorção de calor no lado quente conforme equação (143).

$$k_{effh} = nk \left[ 1 + \frac{(2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in}\Delta T)R_{in} \bar{zT}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \right] \quad (143)$$

Dividindo a equação (143) por  $n$ , encontra-se a condutividade térmica efetiva de um único par termoeletrico dentro de um dispositivo com  $n$  pares.

$$k_{effh} = k \left[ 1 + \frac{(2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in}\Delta T)R_{in} \bar{zT}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \right] \quad (144)$$

Algumas considerações quanto ao uso da equação (143) serão detalhadas a seguir devido a forma como foi modelada. Conforme demonstrado anteriormente o modelo foi desenvolvido para todo o dispositivo, ou seja, incluindo todos os pares termoeletricos dentro de um gerador termoeletrico. Dividindo-se pelo número de pares encontra-se a condutividade térmica de um único par, mas nota-se que o parâmetro  $R_{in}$  prossegue em ambas as equações. Esse fato resulta que a condutividade térmica efetiva de um único par termoeletrico está relacionada a quantidade de pares termoeletricos dentro dispositivo. A partir do exposto entende-se que todos ou quaisquer números de pares escolhidos estarão

relacionados com  $R_{in}$ . Esse efeito termoelétrico resulta do fato que a corrente elétrica no efeito Peltier e Joule estão relacionadas a todos os pares termoelétricos e mais a carga externa. Por isso os números de pares serão as referências nas duas equações citadas devido a  $R_{in}$ .

Um caso particular ocorre quando  $n = 1$ , ou seja, o dispositivo possui somente 1 par, assim  $R_{in} = R$ . Então as equações (143) e/ou (144) tornam-se a equação (145).

$$k_{efh} = k \left\{ 1 + \frac{[2(R + R_L)T_h - R\Delta T] R \overline{zT}}{2\overline{T} (R + R_L)^2} \right\} \quad (145)$$

Se valor da resistência elétrica de um único par,  $R$ , for muito pequena e apresentar pequenas variações de temperaturas podem resultar no termo  $R\Delta T \approx 0$ . A consequência disto é mostrada na equação abaixo.

$$k_{efh} = k \left[ 1 + \frac{T_h R}{\overline{T} (R + R_L)} \overline{zT} \right] \quad (146)$$

Outro caso particular acontece quando  $\Delta T = 0$  isso implica que  $T = T_c = T_h$ , logo tem-se a equação (147) e (148).

$$k_{efh_r} = nk \left[ 1 + \frac{R_{in} \overline{zT}}{(R_{in} + R_L)} \right] \quad (147)$$

$$k_{efh} = k \left[ 1 + \frac{R_{in} \overline{zT}}{(R_{in} + R_L)} \right] \quad (148)$$

As equações (147) e (148) demonstram que mesmo com um gradiente de temperatura nulo a condutividade térmica efetiva depende da carga externa quando avaliada em um circuito fechado.

Se  $R_L = R_{in}$ , o que representa mais um caso especial, útil na determinação da potência máxima, obtém-se as seguintes equações:

$$k_{efhr} = nk \left[ 1 + \frac{(T_h + T) \overline{zT}}{4\overline{T}} \right] \quad (149)$$

$$k_{efh} = k \left[ 1 + \frac{(T_h + T) \overline{zT}}{4\overline{T}} \right] \quad (150)$$

Para caso particular quando a resistência de carga externa é nula,  $R_L = 0$ , tem-se:

$$k_{efhr} = nk \left[ 1 + \frac{(2T_h - \Delta T) \overline{zT}}{2\overline{T}} \right] \quad (151)$$

$$k_{efh} = k \left[ 1 + \frac{(2T_h - \Delta T) \overline{zT}}{2\overline{T}} \right] \quad (152)$$

A partir das definições em que  $\Delta T = T_h - T_c$  e  $T = \frac{T_h + T_c}{2}$  obtém-se a equação a seguir.

$$\overline{T} = \frac{2T_h - \Delta T}{2} \quad (153)$$

Incluindo (151) em (152) e obtêm-se duas notáveis expressões demonstradas respectivamente em (154) e (155). Essas expressões indicam que a condutividade térmica efetiva para o caso de circuito aberto ou resistência de carga desprezível depende apenas da condutividade térmica e do número de mérito.

$$k_{efhr} = nk \left[ 1 + \overline{zT} \right] \quad (154)$$

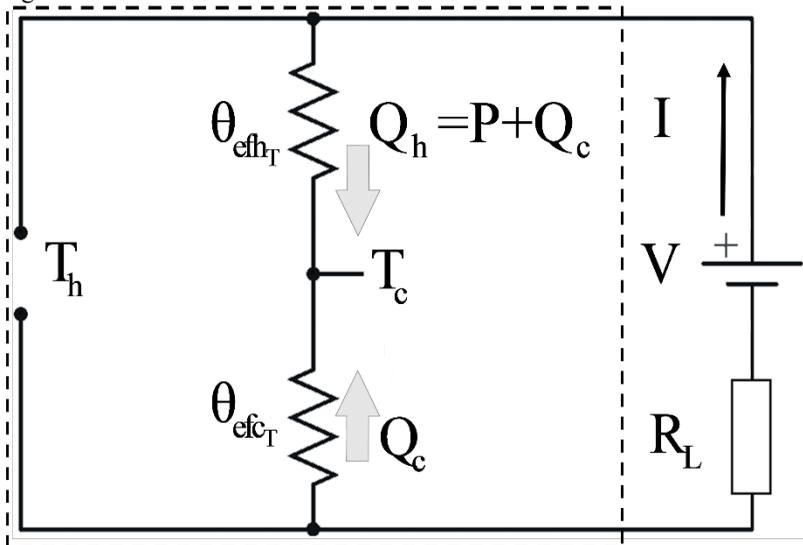
$$k_{efh} = k \left[ 1 + \overline{zT} \right] \quad (155)$$

A partir da equação (40) utilizando-se a mesma metodologia empregada anteriormente, apresenta-se a condutividade térmica efetiva total na face fria:

$$k_{efc_r} = nk \left\{ 1 + \frac{[2(R_{in} + R_L)T_c + R_{in}\Delta T]R_{in}\overline{zT}}{2\overline{T}(R_{in} + R_L)^2} \right\} \quad (156)$$

Em suma, devido ao método na qual as relações entre as parcelas térmicas e elétricas se relacionam, entende-se que a condutividade obtida nessa metodologia se trata de uma condutividade termoelétrica. O circuito termoelétrico equivalente apresentado na Figura 37 mostra que a condutividade térmica efetiva proposta neste trabalho apresenta de fato os fenômenos térmicos e elétricos simultaneamente.

Figura 37 - Modelo de condutividade térmica efetiva.



Fonte: Autor (2019).

Existem modelos como os propostos por Dalola *et al.* (2009), Lineykin e Ben-yaakov (2007) que abordam uma divisão entre os circuitos térmicos e elétricos. Esses modelos mostram os efeitos de maneiras separadas, embora estejam vinculados. Descrevem os fenômenos como transferência de calor na face quente e fria e os efeitos elétricos em locais com

propriedades puramente elétricas. No modelo proposto esta etapa já foi adicionada na própria análise inicial que engloba tanto a condutividade térmica, a resistência elétrica e o número de mérito, uma das propriedades fundamentais na termoeletricidade. Sendo assim, a condutividade térmica efetiva pode ser entendida como uma propriedade termoelétrica.

A potência total elétrica é encontrada em termos de condutividade térmica efetiva no lado quente e frio através da equação (157):

$$P = \frac{nk_{efh}A\Delta T}{L} - \frac{nk_{efc}A\Delta T}{L} = \frac{nA\Delta T}{L} (k_{efh} - k_{efc}) \quad (157)$$

Em termos da condutância térmica ou da resistência térmica tem-se.

$$P = (K_{efh} - K_{efc}) \Delta T = \frac{\Delta T}{(\theta_{efh} - \theta_{efc})} \quad (158)$$

Expandindo a expressão (157) aplicando as definições de CTE (144) e (156), chega-se a expressão (159) que permite finalmente obter novas expressões simplificadas em (160) e (161).

$$P = \frac{nkA\Delta T}{L} \left\{ \left[ 1 + \frac{(2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in}\Delta T)R_{in}\bar{zT}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \right] - \left[ 1 + \frac{(2(R_{in} + R_L)T_c + R_{in}\Delta T)R_{in}\bar{zT}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \right] \right\} \quad (159)$$

$$P = \frac{nkA}{L} \frac{(R_{in}R_L\Delta T^2)\bar{zT}}{\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \quad (160)$$

$$P = K_T \frac{(R_{in}R_L\Delta T^2)\bar{zT}}{\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} = \frac{1}{\theta_T} \frac{(R_{in}R_L\Delta T^2)\bar{zT}}{\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \quad (161)$$

Através da equação (160) e utilizando os conceitos de que  $\theta_T = nL/kA$ ,  $K_T = nkA/L$  e  $R_{in} = npL/A$  na equação (161) resultam na equação (47). Isso significa que a equação proposta é válida. Para o caso de  $R_L = 0$ , o valor da P é nulo conforme o esperado. Diferenciando qualquer uma das equações de potência, (160) ou (161) em relação a resistência de carga

externa chega-se ao mesmo resultado que o previsto em (50). Ao mesmo passo que fazendo  $R_{in} = R_L$  chega-se a uma expressão para potência máxima obtida a partir dos conceitos de condutividade térmica efetiva.

$$P_{max} = \frac{K_r \Delta T^2 \overline{zT}}{4\overline{T}} = \frac{\Delta T^2 \overline{zT}}{4\overline{T}\theta_r} \quad (162)$$

Novamente aplicando o conceito de que  $R_{in} = \rho L/A$  e a partir da definição do número de mérito a equação (162) reproduz o mesmo resultado em (51) que é o esperado.

A partir da equação (157) é possível obter mais três equações para a corrente elétrica de saída e uma para a máxima, outras três para a tensão elétrica de saída e uma para a máxima. Sabendo que a potência elétrica é descrita por (42) obtêm-se a seguinte equação:

$$I = \sqrt{\frac{nA\Delta T (k_{ef_h} - k_{ef_c})}{R_L L}} \quad (163)$$

Em termos da condutância térmica ou da resistência térmica segue em (164).

$$I = \sqrt{\frac{(K_{ef_h} - K_{ef_c}) \Delta T}{R_L}} = \sqrt{\frac{\Delta T}{(\theta_{ef_h} - \theta_{ef_c}) R_L}} \quad (164)$$

Desenvolvendo a expressão (163) e inserindo respectivamente as definições de CTE do lado quente e frio a partir de (144) e (156) tem-se:

$$I = \frac{\Delta T}{(R_{in} + R_L)} \sqrt{\frac{R_{in} \overline{zT} K_r}{\overline{T}}} = \frac{\Delta T}{(R_{in} + R_L)} \sqrt{\frac{R_{in} \overline{zT}}{\overline{T}\theta_r}} \quad (165)$$

Se  $R_L = 0$  têm-se a expressão para corrente máxima.

$$I_{max} = \sqrt{\frac{\overline{zT} K_r}{R_{in} \overline{T}}} \Delta T = \sqrt{\frac{\overline{zT}}{R_{in} \overline{T}\theta_r}} \Delta T \quad (166)$$

A partir da equação (157) e do conceito de (42) encontra-se uma expressão para a tensão de saída:

$$V = \sqrt{\frac{nA\Delta TR_L (k_{ef_h} - k_{ef_c})}{L}} \quad (167)$$

Em termos da condutância térmica ou da resistência térmica segue a equação abaixo.

$$V = \sqrt{(K_{ef_h} - K_{ef_c})\Delta TR_L} = \sqrt{\frac{\Delta TR_L}{\theta_{ef_h} - \theta_{ef_c}}} \quad (168)$$

Inserindo as definições de CTE do lado quente e frio na equação (167) é possível expandir para a expressão conforme (169).

$$V = \sqrt{\left(\frac{R_m K_T \bar{zT}}{\bar{T}}\right) \frac{R_L \Delta T}{(R_m + R_L)}} = \sqrt{\left(\frac{R_m \bar{zT}}{\theta_T \bar{T}}\right) \frac{R_L \Delta T}{(R_m + R_L)}} \quad (169)$$

A partir da equação (47) encontra-se uma expressão para a tensão máxima ou tensão em circuito aberto.

$$V_{max} = \sqrt{\frac{R_m K_T \bar{zT}}{\bar{T}} \Delta T} = \sqrt{\frac{R_m \bar{zT}}{\theta_T \bar{T}} \Delta T} \quad (170)$$

O rendimento termoelétrico é a próxima variável a ser analisada em função dos conceitos de condutividade térmica efetiva.

$$\eta = \frac{P}{\dot{Q}_h} = \frac{\dot{Q}_h - \dot{Q}_c}{\dot{Q}_h} = 1 - \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h} \quad (171)$$

Utilizando a definição de resistência térmica efetiva determina-se uma expressão indicando que a eficiência termoelétrica independe do número de pares, mas depende da razão entre as condutividades térmicas efetivas do lado frio e quente.

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h} = 1 - \left( \frac{\frac{nk_{efc} A \Delta T}{L}}{\frac{nk_{efh} A \Delta T}{L}} \right) = 1 - \frac{k_{efc}}{k_{efh}} \quad (172)$$

A partir das equações do lado quente e do lado frio em (172) obtém-se finalmente a equação de eficiência termoelétrica com todos os termos.

$$\eta = 1 - \frac{k \left[ 1 + \frac{(2(R_{in} + R_L)T_c + R_{in} \Delta T) R_{in} \bar{zT}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \right]}{k \left[ 1 + \frac{(2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in} \Delta T) R_{in} \bar{zT}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2} \right]} \quad (173)$$

$$\eta = 1 - \frac{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2 + [2(R_{in} + R_L)T_c + R_{in} \Delta T] R_{in} \bar{zT}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2 + [2(R_{in} + R_L)T_h - R_{in} \Delta T] R_{in} \bar{zT}} \quad (174)$$

A equação acima mostra que a eficiência depende das resistências externas e internas, número de mérito do MATERIAL (par  $p-n$ ) e das temperaturas da face quente e fria impostas no dispositivo. Nela se  $R_L = 0$  então  $\eta = 0$ , o que é esperado, já que a potência é nula também neste caso. A eficiência máxima é determinada a partir da derivação da equação (174) em relação a resistência externa e por fim igualando-a a zero. O resultado fornece a mesma resistência de carga externa demonstrada por Ursell e Snyder (2002), conforme informado na equação (76). A eficiência máxima é dada pela inserção dessa equação em (174) resultando em (175):

$$\eta_{\max} = \frac{\bar{zT} \left( \sqrt{\bar{zT} + 1} \right) \Delta T}{\left[ \left( 1 + \sqrt{\bar{zT} + 1} \right) \right]^2 \bar{T} + \left( \sqrt{\bar{zT} + 1} \right) T_h + \left( \bar{zT} \right) \bar{T}} \quad (175)$$

Observa-se a partir da equação acima que a eficiência máxima depende exclusivamente do número de mérito e das temperaturas na face quente e fria. Lembrando que o número de mérito foi modelado como um par  $p$  e  $n$ .

Uma última consideração será apresentada a seguir. Trata-se de uma relação entre o número de mérito do disposto,  $ZT$  e o número de mérito de um único par termoelétrico,  $zT$ . Tradicionalmente, segundo Snyder, Snyder (2017), o número de mérito do dispositivo é caracterizado pela equação (71) que define a máxima eficiência de um gerador termoeletrico. Avaliando a equação (11) e a equação (15), percebe-se que  $ZT = zT$  quando  $\alpha_p = -\alpha_n$ ,  $\rho_p = \rho_n$ ,  $k_p = k_n$  o que significa que os dois pares termoeletricos devem ser iguais na mesma temperatura média  $T$ , considerando fluxo de calor unidimensional. Snyder, Snyder (2017) afirmam que o número de mérito do dispositivo pode ser diferente do número de mérito do material por diversas razões. Uma delas seria a grande variação de temperatura sobre  $zT$  e a má compatibilidade termoeletrica. Eles esclarecem que todos os métodos de média propostos são aproximações inexatas, pois, assumem uma dependência específica entre as propriedades termoeletricas com a temperatura, mas ignoram a compatibilidade. Nesse trabalho propõe-se a definição do número de mérito através da inserção do termo de eficiência termoeletrica, resultando na articulação com os conceitos de condutividade térmica efetiva, seguindo o objetivo de obter uma relação entre o número de mérito do dispositivo e o número de mérito de um par termoeletrico.

$$ZT = \left( \frac{T_h - T_c (1 - \eta)}{T_h (1 - \eta) - T_c} \right)^2 - 1 \quad (176)$$

Analisando a equação acima fica entendido que número de mérito do dispositivo depende da eficiência termoeletrica e das temperaturas nas faces quente e fria do módulo termoeletrico. Inserindo o conceito de eficiência termoeletrica a partir da equação (172) em (176), a equação assume a forma de (177):

$$ZT = \left( \frac{T_h - T_c \left( \frac{k_{efc}}{k_{efh}} \right)}{T_h \left( \frac{k_{efc}}{k_{efh}} \right) - T_c} \right)^2 - 1 \quad (177)$$

Tudo isso demonstra que a propriedade ZT possui um comportamento termoelétrico complexo, pois depende de fatores externos e internos. Desenvolvendo a equação acima, a partir da inserção dos conceitos de condutividade térmica efetiva do lado quente e frio tem-se:

$$ZT = \left\{ \frac{T_h - T_c \left[ \frac{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2 + [2T_c(R_{in} + R_L) + (T_h - T_c)R_{in}]R_{in}z\bar{T}}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2 + [2T_h(R_{in} + R_L) - (T_h - T_c)R_{in}]R_{in}z\bar{T}} \right]}{T_h \left[ \frac{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2 + [2T_c(R_{in} + R_L) + (T_h - T_c)R_{in}]R_{in}zT}{2\bar{T}(R_{in} + R_L)^2 + [2T_h(R_{in} + R_L) - (T_h - T_c)R_{in}]R_{in}zT} \right] - T_c} \right\}^{-1} \quad (178)$$

Sabendo que a resistência equivalente é igual a soma da resistência total do TEG mais a resistência de carga externa tem-se:

$$R_{eq} = R_{in} + R_L \quad (179)$$

$$ZT = \left\{ \frac{T_h - T_c \left[ \frac{2\bar{T}(R_{eq})^2 + (2T_c(R_{eq})R_{in} + (T_h - T_c)R_{in}^2)z\bar{T}}{2\bar{T}(R_{eq})^2 + (2T_h(R_{eq})R_{in} - (T_h - T_c)R_{in}^2)z\bar{T}} \right]}{T_h \left[ \frac{2\bar{T}(R_{eq})^2 + (2T_c(R_{eq})R_{in} + (T_h - T_c)R_{in}^2)zT}{2\bar{T}(R_{eq})^2 + (2T_h(R_{eq})R_{in} - (T_h - T_c)R_{in}^2)zT} \right] - T_c} \right\}^{-1} \quad (180)$$

As equações (178) e (180) mostram o número de mérito do dispositivo como função das resistências elétricas externas e internas, as temperaturas sobre as faces quentes e fria e mais o número de mérito do par termoelétrico. Observa-se nas equações citadas uma relação entre o número de mérito do dispositivo e o número de mérito do material. Se  $R_L = 0$  a eficiência termoelétrica torna-se zero e então na equação (178) e (180) ZT também é zero. Essa afirmação é completamente coerente com os fundamentos consagrados. Manipulando a equação (178) é possível isolar zT com o intuito de avaliar melhor sua relação com ZT conforme equação (181).

$$\overline{zT} = \frac{2\overline{T}(R_m + R_L)^2 \Delta T (\sqrt{ZT+1} - 1)}{\left\{ [(R_m + R_L)T_h + R_m \Delta T] R_m [T_h + (\sqrt{ZT+1})T_c] - [(R_m + R_L)T_c + R_m \Delta T] R_m [T_c + (\sqrt{ZT+1})T_h] \right\}} \quad (181)$$

Sabendo que  $\overline{zT} \approx 2zT$  em (181) chega-se finalmente a relação entre o número de mérito de um bloco termoelétrico  $zT$  e o número de mérito do dispositivo  $ZT$  conforme (182).

$$zT = \frac{\overline{T}(R_m + R_L)^2 \Delta T (\sqrt{ZT+1} - 1)}{\left\{ [(R_m + R_L)T_h + R_m \Delta T] R_m [T_h + (\sqrt{ZT+1})T_c] - [(R_m + R_L)T_c + R_m \Delta T] R_m [T_c + (\sqrt{ZT+1})T_h] \right\}} \quad (182)$$

As equações (181) e (182) são válidas para os valores em que a eficiência termoeétrica seja diferente de zero. Essa condição é alcançada quando  $R_L \neq 0$  e  $\Delta T \neq 0$ . Caso contrário, com a eficiência termoeétrica sendo zero, implica em  $zT = 0$  o que não é verdade, pois o número de mérito do material depende apenas das propriedades do material e da sua temperatura média. Mas as equações (178) e (180) deixam claro que o número de mérito do dispositivo é uma parâmetro originado por um efeito termoeétrico, envolvendo o número de mérito do material, as temperaturas nas faces quente e fria e as resistências elétricas internas e externas. O número de mérito do dispositivo por se tratar de um efeito termoeétrico somente estará presente se o dispositivo estiver em pleno funcionamento, ou seja, com absorção de calor na entrada, rejeição de calor na saída e, enfim gerando potência elétrica resultando na passagem de corrente elétrica em um circuito elétrico com a presença de uma carga externa.

#### 4.7 MODELO 5 - MÉTODO DA CTE PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PARES DE UM TEG

Muitas vezes os números de pares termoeétricos **p** e **n** não são fornecidos pelo fabricante. Na impossibilidade de quebrar o dispositivo a fim de descobrir a quantidade de pares, um método para a determinação da quantidade de pares termoeétricos a partir do modelo CTE é apresentado a seguir.

- **Parâmetros Geométricos**

- a) Comprimento e área dos elementos termoeletricos são idênticos;
- b) Comprimento e área dos substratos são idênticos;
- c) Área efetiva igual a área dos blocos termoeletricos,  
 $A_e = A_{leg.}$

- **Hipóteses Simplificadoras**

Para a solução do modelo unidimensional foram adotadas as hipóteses simplificativas listadas a seguir:

- f) Regime unidimensional;
- g) Regime permanente;
- h) Despreza-se perdas de calor por radiação e convecção;
- i) Temperatura na face quente do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face quente do TEG  $T_1 \approx T_h$ ;
- j) Temperatura na face fria do substrato cerâmico é aproximadamente igual a temperatura na face fria do TEG  $T_2 \approx T_c$ .

- **Equacionamento**

Considerando a equação (170) e sabendo que a resistência térmica total é igual a  $nL/kA$  chega-se a expressão (183). Nesta expressão conclui-se que o número de pares de um gerador termoeletrico depende de 8 variáveis. As geométricas  $L$  e  $A$ , resistência elétrica do par, condutividade térmica do par, tensão máxima, temperatura média e variação da temperatura. Apesar de alguns fabricantes de geradores termoeletricos não fornecerem a quantidade de pares, eles fornecem as dimensões do dispositivo, bem com a tensão em circuito aberto e o material termoeletrico. Sabendo qual é o material termoeletrico fica fácil descobrir a condutividade térmica e o número de mérito. Por fim, a tensão em circuito aberto pode ser medida diretamente no TEG com o multímetro e a temperatura com os termômetros ou termopares. A equação (183) pode ser simplificada para resistência térmica de 1 par ou condutância térmica de 1 par, conforme pode ser visto em (184). Essas duas equações permitem que o número de pares seja encontrado a partir de informações

do fabricante e de literatura científica. As equações (183), (184) e as seguintes são válidas desde que  $\Delta T \neq 0$ .

$$n = \frac{\bar{T}}{zTR_{in}} \left( \frac{L}{kA} \right) \left( \frac{V_{\max}}{\Delta T} \right)^2 = \frac{L\bar{T}}{R_{in}kAzT} \left( \frac{V_{\max}}{\Delta T} \right)^2 \quad (183)$$

$$n = \frac{\theta T}{z\bar{T}R_{in}} \left( \frac{V_{\max}}{\Delta T} \right)^2 = \frac{\bar{T}}{zTR_{in}K} \left( \frac{V_{\max}}{\Delta T} \right)^2 \quad (184)$$

Nos casos em que o circuito está montado ou há impossibilidade de realizar uma medição direta no TEG em circuito aberto, a quantidade de pares termoelétricos pode ser determinada a partir da tensão de saída, (169) com a inserção da condutividade térmica total  $nL/kA$  resultando em (185) e (186).

$$n = \frac{\bar{T}}{zTR_{in}} \left( \frac{L}{kA} \right) \left[ \frac{V(R_{in} + R_L)}{R_L \Delta T} \right]^2 = \frac{L\bar{T}}{R_{in}kAzT} \left[ \frac{V(R_{in} + R_L)}{R_L \Delta T} \right]^2 \quad (185)$$

$$n = \frac{\theta \bar{T}}{zTR_{in}} \left[ \frac{V(R_{in} + R_L)}{R_L \Delta T} \right]^2 = \frac{\bar{T}}{zTR_{in}K} \left[ \frac{V(R_{in} + R_L)}{R_L \Delta T} \right]^2 \quad (186)$$

Finalmente para um circuito fechado é possível obter através da equação de potência de saída, (157), a expressão (187) e para a tensão de saída, sabendo que  $P=V^2/R_L$ , encontra-se a expressão (188).

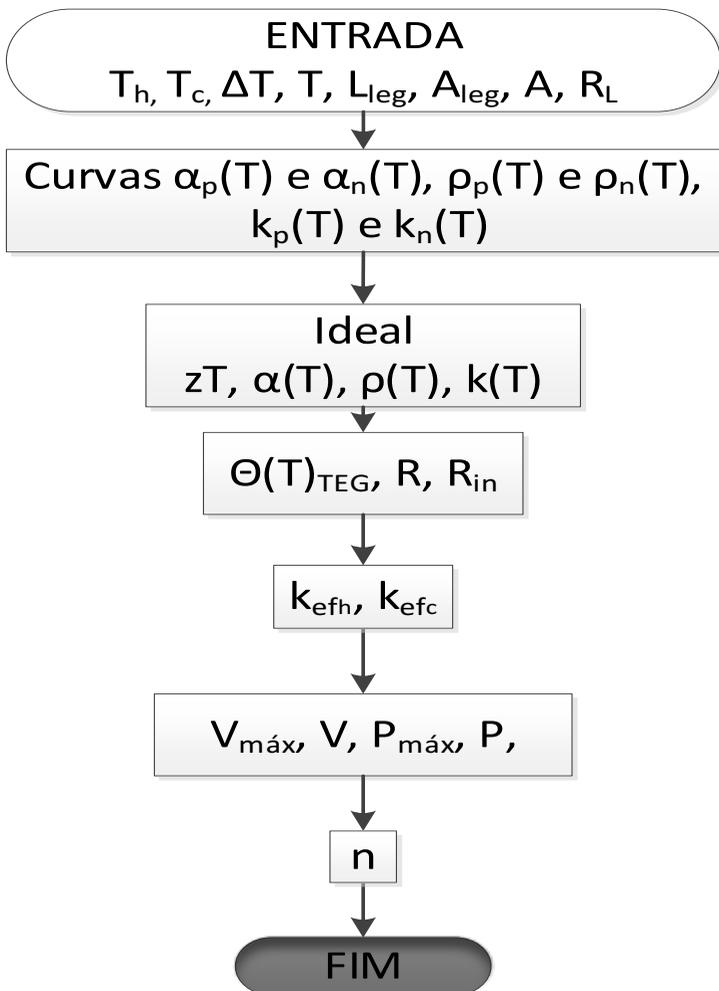
$$n = \frac{PL}{A\Delta T(k_{ef_h} - k_{ef_c})} \quad (187)$$

$$n = \frac{V^2 L}{A\Delta TR_L(k_{ef_h} - k_{ef_c})} \quad (188)$$

A equação (188), sem dúvida, é a mais prática pois é mais fácil medir tensão de saída do que potência de saída.

- **Fluxograma**

Figura 38 - Método CTE para determinação do número de pares.



Fonte: Autor (2019)

## 5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados os temas relacionados aos aparatos experimentais, a bancada de testes, os TEG's, TEC's e a coleta de dados.

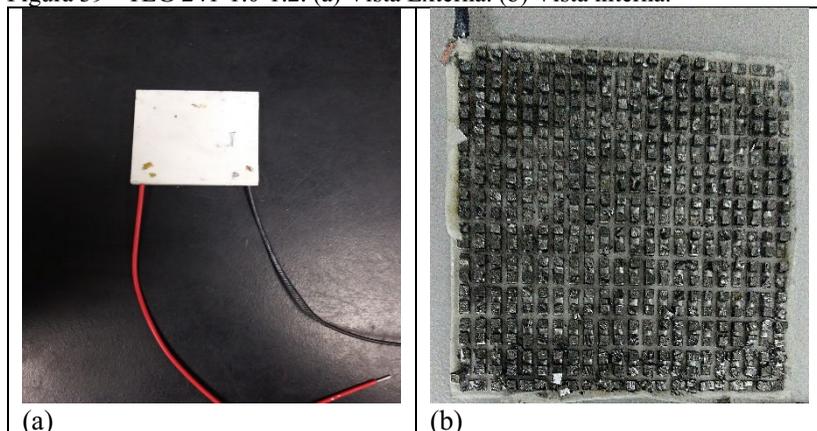
### 5.1 A BANCADA EXPERIMENTAL

As bancadas de testes experimentais foram montadas de modo a gerar diferentes gradientes de temperaturas sobre um gerador termoelétrico. Há duas versões da bancada: a primeira feita em 2017 e a segunda em 2018. As duas possuem o mesmo princípio de funcionamento, porém com desempenho distinto.

#### 5.1.1 Os modelos de TEG

Na Figura 39 (a) pode ser visto o gerador termoelétrico da empresa EVERREDtronics modelo TEG 241-1.0-1.2. A Figura 39 (b) ilustra o TEG sem a placa de alumina (item branco). Esse dispositivo possui 241 pares termoelétricos de Telureto de bismuto.

Figura 39 - TEG 241-1.0-1.2. (a) Vista Externa. (b) Vista interna.

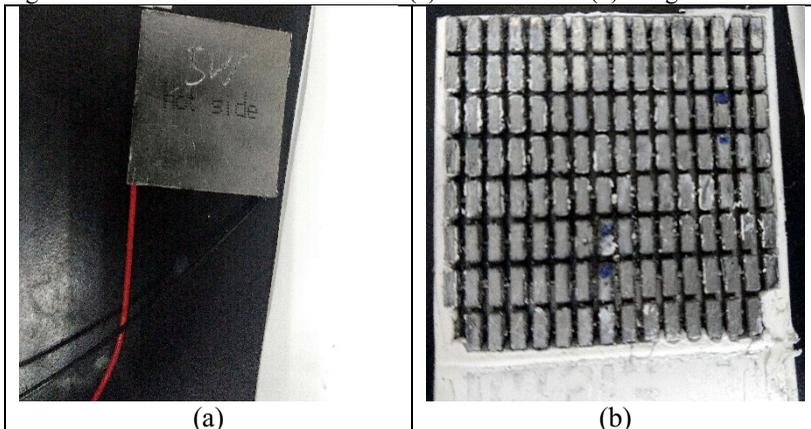


Fonte: Autor (2019).

Na Figura 40 (a) e Figura 41 (a) são apresentados os geradores termoeletricos da empresa TEGpro. As Figura 40 (b) e Figura 41 (b) mostram o TEG's abertos. Devido a suas características, esses

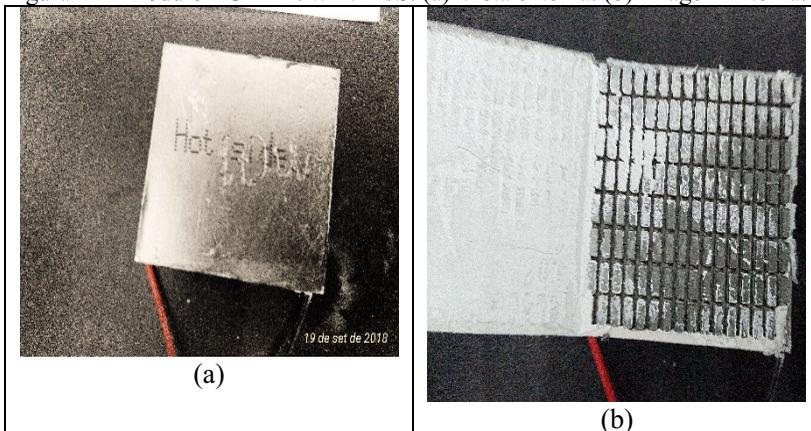
dispositivos possuem menos pares termoeétricos, 126. O material do semicondutor é o Telureto de bismuto.

Figura 40 - Modelo TGPR 5W5V-40S (a) Vista externa. (b) Imagem Interna.



Fonte: Autor (2019).

Figura 41 - Módulo TGPR 10W4V-40S. (a) Vista externa. (b) Imagem Interna.



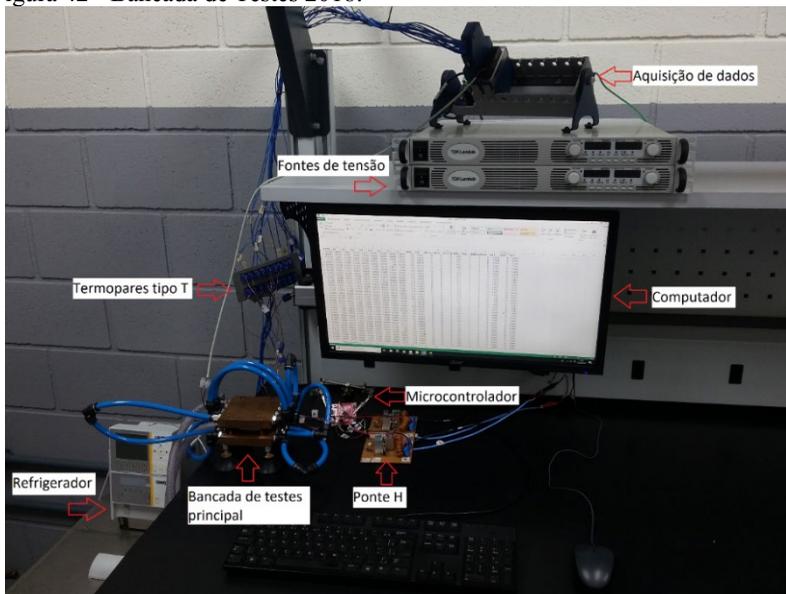
Fonte: Autor (2019).

### 5.1.2 Bancada de teste

A bancada de testes desenvolvida é uma segunda versão de uma bancada fabricada para trabalhos de conclusão de curso de alunos da engenharia aeroespacial e mecânica da UFSC Joinville. Houveram

aprimoramentos significativos na bancada, sendo que alguns equipamentos foram substituídos. Esta versão do aparato experimental consiste em uma bancada de testes principal, microcontrolador, ponte H, duas fontes de tensão, termopares do tipo T, sistema de aquisição de dados e um computador. Todos estes componentes são apresentados na Figura 42.

Figura 42 - Bancada de Testes 2018.



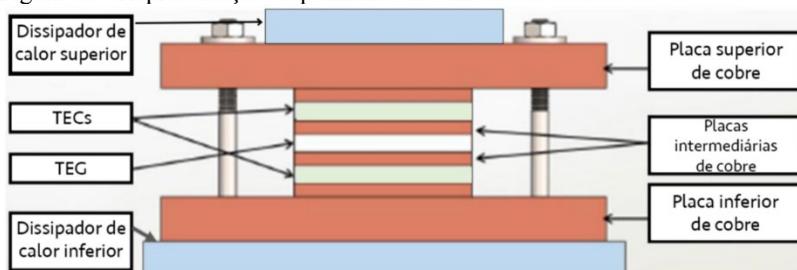
Fonte: Autor (2019).

A bancada de testes principal é responsável por submeter o TEG às diferenças de temperaturas desejadas. Isto é alcançado com a utilização de dois TEC's, um em cada lado face do TEG, fazendo contato com placas intermediárias de cobre, conforme Figura 43. A temperatura média mínima na face fria foi de 260 K, a máxima na face quente aproximadamente 323 K, o intervalo de operação foi referenciado entre esses extremos. Entre o TEG e os TEC's foi utilizado pasta térmica para diminuir a resistência de contato.

O TEC é um dispositivo capaz de aquecer um lado e esfriar o outro quando em funcionamento. Portanto, como a função dos TEC's é

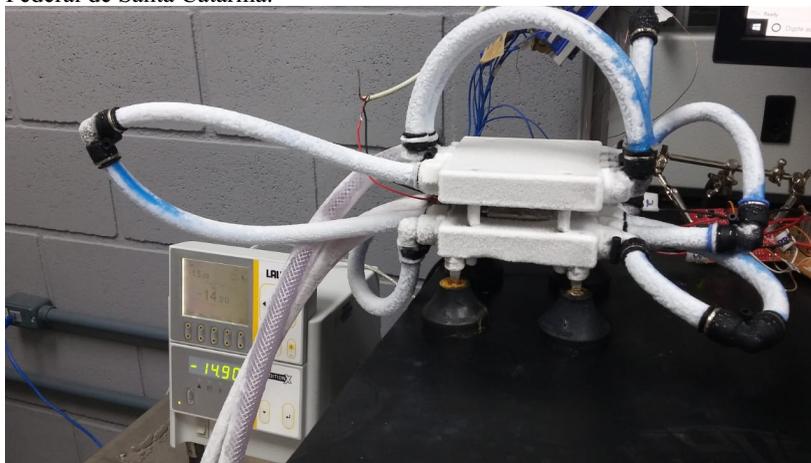
exclusivamente alcançar uma temperatura desejada no lado que está em contato com o TEG, o calor gerado no outro lado deve ser dissipado de forma a não influenciar nos resultados. Sendo assim, dissipadores de calor são empregados na parte superior e inferior da bancada de testes principal.

Figura 43 - Representação esquemática da bancada de testes.



Fonte: Ostrufka (2017).

Figura 44 - Bancada de testes em operação no laboratório T2F da Universidade Federal de Santa Catarina.



Fonte: Autor (2019).

Os dissipadores de calor consistem na conexão por mangueiras que permitem o fluxo de um líquido refrigerante, resfriado pelo equipamento *LAUDA Proline Edition X*, capaz de refrigerar fluido (álcool) a temperatura de até  $-30^{\circ}\text{C}$  (notou-se que em  $-20^{\circ}\text{C}$  já provia a dissipação

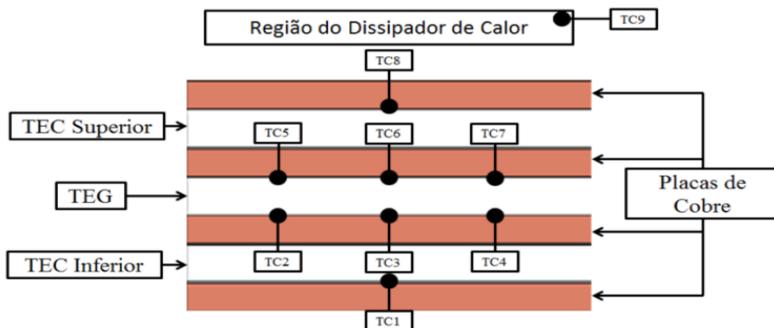
de calor necessária). Por fim, a aquisição de dados desta versão é feita com o modelo NI cDAQ-9178, da empresa National Instruments, cuja interface com o computador é feita pelo *Software LABVIEW*. Os demais componentes permaneceram inalterados. A Figura 44 ilustra a bancada em operação.

Os modelos dos demais equipamentos são como seguem abaixo:

- TEC: CP14.127.045 da Laird Technologies;
- TEG: TEG241-1.0-1.2 do fabricante EVERREDtronics Ltd.;
- Unidade de aquisição, comunicação e registro de dados: modelo NI cDAQ-9178, da empresa National Instruments;
- Microcontrolador: TIVA TM4C123G da *Texas Instruments*;
- Circuito de Ponte H: mesmo modelo utilizado por Ostrufka (2017).
- Fontes de tensão: modelo GEN 300-5, família *Genesys 1U Full-Rack*, da empresa TDK-Lambda.

As regiões principais para a realização das medições de temperatura são as duas superfícies do TEG, pois são nestes pontos que se deseja simular os gradientes de temperatura para a validação dos modelos propostos.

Figura 45 - Posição dos termopares na bancada.



Fonte: Audiffred (2015).

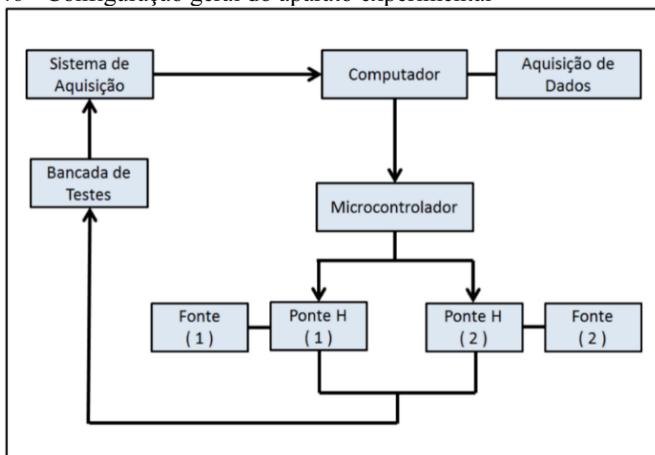
Por isso, foram colocados três termopares em cada face. Além disso, foram colocados um termopar em cada face externa dos TEC's, pois

nestas regiões o calor gerado deve ser dissipado, portanto, é importante verificar as temperaturas destes pontos para analisar se o sistema refrigerante está conseguindo dissipar o calor de forma eficiente. A Figura 45 ilustra o posicionamento dos termopares na bancada de testes.

### 5.1.3 Procedimento de teste

Conforme metodologia adotada por Audiffred (2015) e Ostrufka (2017), os termopares do tipo T com faixa de aplicabilidade entre  $-180$  a  $360$  °C leem a temperatura de cada face do TEG, cuja informação é captada pelo sistema de aquisição de dados e enviada para o computador, onde é armazenada. Esses dados são utilizados como um *feedback* para o controlador PID, responsável por ajustar a diferença de temperatura a que o TEG está sujeito. O controlador PID, através do *Software LABVIEW®*, envia comandos para um microcontrolador. Este por sua vez, converte em sinal PWM que é amplificado por um circuito de ponte H, alimentado por fontes de tensão. Assim, com os sinais de comando é possível ajustar a temperatura que as faces do TEG estão sujeitas. A configuração geral de conexão entre tais componentes segue da mesma forma que utilizada por Audiffred (2015), ilustrado na Figura 42.

Figura 46 - Configuração geral do aparato experimental



Fonte: Audiffred (2015).

Os primeiros experimentos foram realizados nos TEG's mantendo-se na face fria temperaturas abaixo de 300 K e elevando-se as temperaturas na face quente. Foram utilizados os modelos TGPR 5W-5V-40S, TGPR 10W-4V-40S. Esse estudo permitiu avaliar os geradores termoelétricos sujeitos a temperaturas que permaneçam abaixo em que uma de suas faces fique submetida a essas baixas temperaturas. Isso vale para locais remotos como na órbita da Terra, zonas polares, países com climas extremos, nas indústrias, o aproveitamento de energias geotérmicas e oceânicas. Nesses dois geradores a tensão elétrica durante a simulação sofreu pequenas varrições em intervalos de tempo muito pequenos.

O modelo TEG241-1.0-1.2 do fabricante EVERREDtronics Ltd. foi utilizado na avaliação do CubeSat inserido e operando no aparato experimental. Conforme mencionado anteriormente, submetendo o TEG às mesmas condições térmicas que estaria sujeito no espaço a partir dos dados de Morsch Filho *et al.* (2017) foram executadas as simulações, nomeadas como análise de regime transitório. Neste modelo os picos variações de tensões foram muito pequenas em intervalos de tempo extremamente curtos.

#### **5.1.4 Limites físicos da bancada de testes**

A primeira limitação da bancada experimental é sua limitação em aplicar uma diferença elevada de temperatura nas faces do TEG. Por causa da fonte de tensão possuir um limite em fornecimento de potência, há conseqüentemente um limite de energia térmica que o TEC fornece à face do TEG. Quando tenta-se ultrapassar este limite, percebe-se que a face fria do TEG começa a se desestabilizar: há um aumento de temperatura indesejado no lado frio. Uma solução para este problema seria aplicar ainda mais potência ao TEC, o que não é possível por causa das fontes já estarem trabalhando em capacidade máxima.

A segunda limitação ocorre quando a taxa de variação de temperatura acontece de forma rápida, o que ocorre apenas nos experimentos em regime transitório.

A terceira limitação acontece nas análises em regime permanente. O controlador PID atua no fornecimento de potência elétrica ao TEC de

forma que permaneça na temperatura adequada. Porém, não há como manter a temperatura perfeitamente constante, há sempre um pequeno erro envolvido. Este ruído de informação ocasiona oscilações na temperatura das faces do TEG.

## 5.2 ANÁLISE DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

As incertezas experimentais estão associadas às incertezas das fontes de tensão DC que fornecem energia ao aparato experimental, ao sistema de aquisição de dados, aos sensores de temperatura e do banho térmico. A incerteza de medição da fonte de tensão é 0,01 V; 0,001 A. A incerteza dos sistemas de aquisição de sinais NI (aquisição de dados e leitura da tensão do TEG) é 1% do fundo de escala, isto é 0,1 V. A incerteza do termopar é de  $\pm 1$  °C e a do banho térmico  $\pm 0,01$  °C. Para a determinação da incerteza da medição da potência elétrica obtida a partir das temperaturas experimentais superiores e inferiores, tensão experimental máxima ou de circuito aberto, resistência elétrica conforme Audiffred (2015) e a resistência de carga externa, foi utilizado o método de propagação de erros conforme consta no Apêndice D.

## 6 RESULTADOS

Neste Capítulo serão apresentados os resultados teóricos e experimentais, a comparação entre eles e consequentemente a validação dos modelos teóricos sugeridos na dissertação. São utilizados 3 geradores termoelétricos, os TEG's 5W-5V-40S e 10W-4V-40S que avaliam o comportamento das tensões máximas a temperaturas abaixo de 0° C na face fria e o TEG 241-1.0-1 dedicado ao CubeSat. Foi estabelecida uma disposição para os resultados, dividindo-os sem a presença do efeito Thomson e com a inclusão desse efeito. Para esses dois primeiros geradores termoelétricos investiga-se qualitativamente os resultados obtidos em relação aos modelos sugeridos.

Na Seção 6.4, usando o TEG 241-1.0-1.2, são demonstrados os resultados das principais propriedades termoelétricas, destacando-se o comportamento da tensão elétrica e o quanto de potência pode ser gerada na face 1 do nanossatélite durante uma viagem ao redor da Terra. Concomitantemente a isso serão realizadas as validações dos modelos, em especial o modelo de condutividade térmica efetiva, CTE (modelo 4). A validação é apresentada na exposição dos resultados, isto é, mostram-se os valores experimentais comparando-os com os resultados teóricos gerados pelos modelos relacionados. Por fim, uma exposição geral dos resultados nas seis faces do CubeSat demonstrou o quanto de potência pode ser gerada em cada face, além de informar o quanto de energia total é gerada em mWh, terminando com uma breve comparação entre a energia gerada através dos painéis solares e os TEG's.

### 6.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL $\text{Bi}_2\text{T}_3$

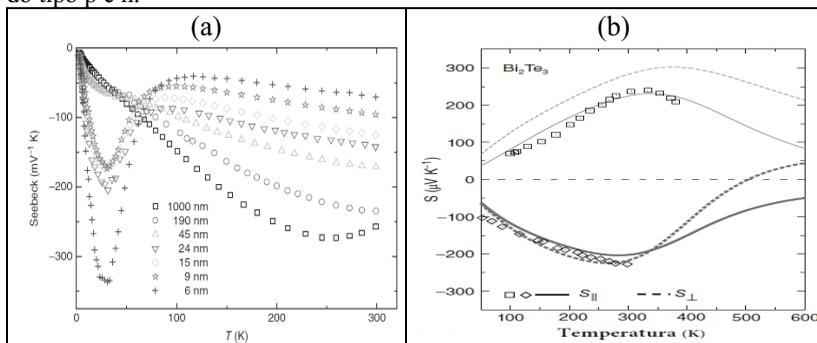
O primeiro passo na avaliação teórica consiste em validar as propriedades do  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  para elementos  $n$  e  $p$ , extrapolando os valores para a temperatura mínima de trabalho que é 260 K. As subseções a seguir demonstram a metodologia empregada para obter essas propriedades na temperatura mínima requerida. A partir de Poudel *et al.* (2008) e Yan *et al.* (2010) um número total de 21 pontos foram avaliados entre 260 a 360 K, sendo 8 pontos estimados entre 260 a 300 K e os demais pontos de acordo com os autores. Esses dados são para os TGPR 5 e 10 W avaliados a baixas temperaturas. O mesmo procedimento foi realizado para o TEG 241-1.0-1.2, grupo CubeSat, sendo 8 pontos estimados entre 260 a 300 K com 11 pontos acima de 300 K em conformidade com o fabricante.

### 6.1.1 Extrapolação e validação das propriedades dos elementos p e n

As equações (209) à (214) do Apêndice C possuem arredondamentos numéricos, entretanto sua forma geral é utilizada fielmente para obtenção dos valores requeridos. As equações fornecem o comportamento das grandezas físicas relacionadas nas faixas de temperatura entre 300 K a 550 K, portanto não se enquadram na temperatura mínima de trabalho na qual a face fria do TEG ficará exposta que é abaixo de 300 K. Para resolver essa questão, recorre-se a uma extrapolação a partir dos dados da Figura 8 e Figura 9 estendendo para a faixa de temperaturas que atendam na operação da bancada experimental. Pretende-se encontrar os valores a partir de 260 K (-13°C) até 300 K a fim de obter o comportamento de  $\alpha(T)$ ,  $\rho(T)$  e  $k(T)$  nesse acréscimo de intervalo para elementos do tipo **p** e **n**.

Os valores para o coeficiente de Seebeck como função da temperatura e espessura de filme fino em escala nanométrica são mostrados na Figura 47 (a).

Figura 47 - (a) Coeficiente de Seebeck x Temperatura para várias espessuras de Telureto de Bismuto, (b) Seebeck x Temperatura para materiais anisotrópicos do tipo p e n.



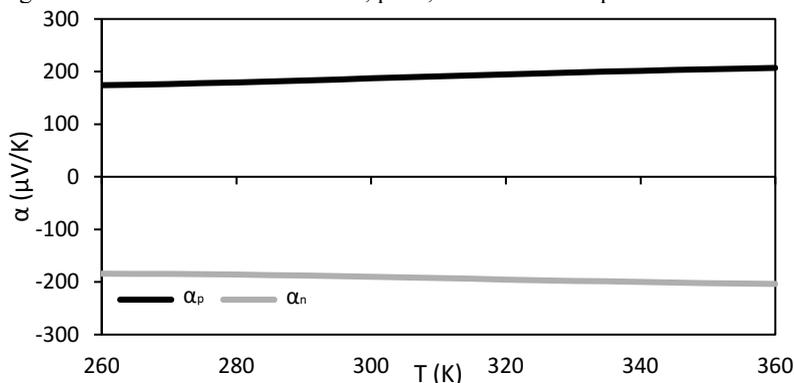
Fonte: Adaptado de Eibl *et al.* (2015).

Os valores do coeficiente de Seebeck segundo Eibl *et al.* (2015) são todos negativos demonstrando que as cargas envolvidas no experimento são elétrons, isto é, na análise foram utilizados os semicondutores do tipo **n**. As curvas para as diversas espessuras nanométricas do Telureto de Bismuto nas faixas de temperatura de 100 K a 200 K apresentam comportamentos aproximadamente lineares, isso demonstra a dependência linear do coeficiente de Seebeck em relação à temperatura,

(EIBL *et al.*, 2015). Nessa faixa, a linearidade abrange todos os filmes finos, cada um responde conforme a inclinação da curva aumentando em módulo o coeficiente de Seebeck de acordo com o aumento da temperatura. Os materiais com consistência de até 45 nm para as temperaturas de 100 K à 300 K seguem com um comportamento linearizado. Na mesma faixa de temperaturas materiais com 190 nm ficam ainda próximos da linearidade enquanto que com 1000 nm apresentam um suave distanciamento apresentando uma forma mais encurvada nas faixas de 200 K à 300 K atingindo um ápice em aproximadamente 250 K.

Outro ponto importante é visto na Figura 47 (b), em que materiais anisotrópicos  $p$  e  $n$  apresentam comportamentos aproximadamente simétricos. O Telureto de Bismuto anisotrópico para tipos  $p$  e  $n$  exibe um grau de simetria entre as partes positivas e negativas permanecendo ambas com uma tendência aproximadamente linear nas faixas de temperatura pretendidas para adição ao modelo. Voltando a atenção para o tipo  $p$ , na parte superior do gráfico observa-se uma convergência entre os valores de Poudel *et al.* (2008) e Eibl *et al.* (2015), portanto a linearidade dos dados do primeiro autor pode ser ajustada para a faixa de valores almejados. A extrapolação é então possível de ser realizada a partir das equações (209) e (212) para a temperatura requerida, 260 K. Logo, as expressões (218) e (219) geradas a partir destas considerações descrevem satisfatoriamente os coeficientes de Seebeck  $p$  e  $n$  atendendo assim toda a faixa de operação da bancada experimental. A Figura 48 mostra os valores de Seebeck nas faixas de temperaturas operacionais da bancada experimental, 260 K a 300 K.

Figura 48 - Coeficientes de Seebeck,  $p$  e  $n$ , normalizados a partir de 260 K.

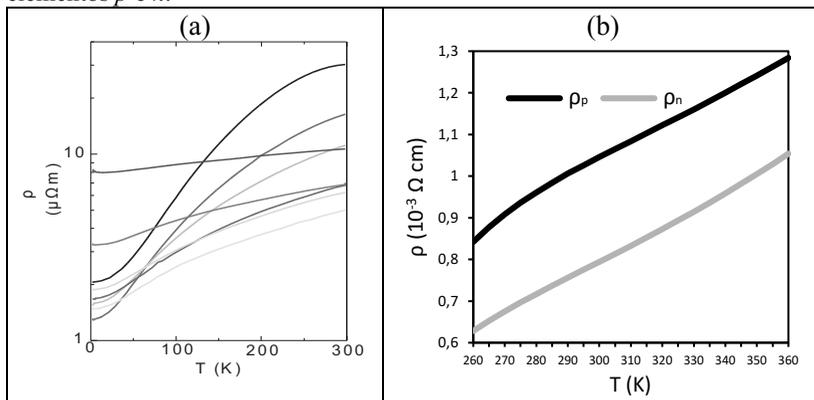


Fonte: Autor (2019).

O elemento do tipo  $p$  é descrito na curva contendo os valores positivos e a curva com valores negativos representa os elementos do tipo  $n$ . As equações ajustadas para os intervalos de temperaturas requeridos possuem validade de  $260 \text{ K} < T < 550 \text{ K}$ , e são tomados a partir da temperatura média.

Com relação a resistividade elétrica, Eibl *et al.* (2015) mostram que os valores desta propriedade em função da temperatura na faixa entre 260 K e 300 K, apresenta um aumento. Assim, conclui-se que nessa faixa de intervalo é possível extrapolar a curva com os dados de Poudel *et al.* (2008), Yan *et al.* (2010) e assim manter a coerência dos dados. A Figura 49 (a) mostra o comportamento da resistividade elétrica em relação a temperatura para diferentes espessuras do material  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Nota-se que há um padrão de aumento da resistividade elétrica com a temperatura variando de 0 a 300 K. Extrapolando os dados a partir da curva de resistividade em função da temperatura é possível validar as equações, respectivamente para elementos tipo  $p$  e  $n$ , segundo (210) e (213) para o intervalo pretendido (vide Apêndice C). A Figura 49 (b) mostra as curvas dos elementos tipo  $p$ , linha em negrito, e  $n$ , linha cinza, detalhando os valores incluídos para o intervalo acrescentado de 260 K para 300 K.

Figura 49 - (a) Resistividade elétrica em função da Temperatura para diferentes espessuras do  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , as diferentes cores representam as espessuras. (b) Curvas Extrapolação dos dados da resistividade elétrica a partir de 260 K para elementos  $p$  e  $n$ .

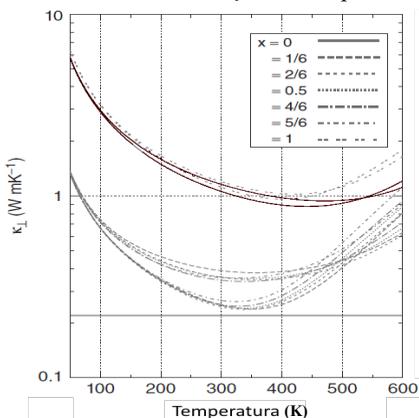


Fonte: (a) Adaptado de Eibl *et al.* (2015) (b) Autor (2019).

A condutividade térmica também foi avaliada por Eibl *et al.* (2015) nas faixas de temperaturas de 50 K a 600 K em curvas experimentais,

Figura 50. O termo,  $k_{\perp}$  ordenada do gráfico, refere-se à condutividade térmica total do material e o subscrito significa que foi avaliado na face transversal do material. A condutividade térmica total é expressa como a soma das condutividades térmicas eletrônicas  $k_{el}$  e fonônicas  $k_f$ . A coleta dos dados se delimitou aos valores entre as curvas destacadas em negrito. As medidas fornecidas pelas curvas são suficientes para a bancada experimental e atendem na elaboração do modelo térmico, mas serão utilizadas apenas para fins comparativos. A equação (213) do Apêndice C, mostra a dependência da condutividade térmica com a temperatura. Assim, a partir dessa equação a condutividade térmica fica abaixo de 1,5 W/mK.

Figura 50 - Condutividade térmica em função da temperatura.

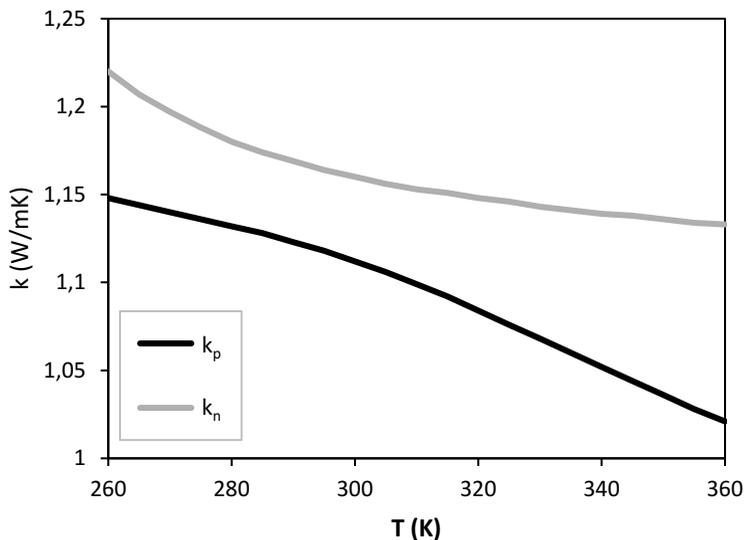


Fonte: Eibl *et al.* (2015).

A condutividade térmica descrita anteriormente para fins comparativos já é concebida para valores que atendem a faixa de operação da bancada experimental. Ela traz uma orientação do quanto que a condutividade térmica pode atingir no intervalo de temperatura descrito. Entendendo o comportamento dessa propriedade em uma faixa extensa de temperaturas recorre-se novamente a uma extrapolação dos dados a partir de (211) para os elementos tipo  $p$  e (214) para o  $n$  obtendo respectivamente (220) e (221) que constam no Apêndice C. Essas duas novas equações permitem analisar a atuação dos elementos  $p$  e  $n$  individualmente. A Figura 51 mostra o comportamento da condutividade térmica dos elementos  $p$  e  $n$  para o material Telureto de Bismuto. Na faixa de temperatura de 260 K a 300 K observa-se um decréscimo tanto nos

valores de  $k_p$ , bem como em  $k_n$ , o que é coerente com os valores de condutividade fornecidos por Eibl *et al.* (2015). Para os elementos de tipo  $n$ , esse decréscimo é mais acentuado que para os elementos de tipo  $p$ .

Figura 51 - Condutividade Térmica,  $p$  e  $n$ , para os valores a partir de 260 K.



Fonte: Autor (2019).

Os dados avaliados para o TEG 241-1.0-1.2 seguiram a mesma metodologia de extrapolação efetuada nesta Seção e os resultados das curvas descritas em equações constam no APÊNDICE C – Fenômenos Termoelétricos Seção C.4.

### 6.1.2 Avaliação das propriedades do Telureto de bismuto partir de temperaturas de 260 K

Nesta Seção apresenta-se uma metodologia que permite caracterizar as propriedades termoelétricas para um elemento do tipo  $p$  e  $n$  do Telureto de Bismuto. Essas propriedades serão avaliadas a partir da temperatura da face fria mantida em 260 K, temperatura mínima no aparato experimental, enquanto a temperatura da face quente prossegue aumentando o seu valor até atingir 360 K. O ponto de partida é a densidade de corrente reduzida acoplada com as propriedades  $\alpha$ ,  $\rho$  e  $k$

que variam em função da temperatura média. Essas últimas três propriedades foram discutidas na Subseção 6.1.1 onde demonstram-se as normalizações nos dados retirados de Poudel *et al.* (2008) e Yan *et al.* (2010) para a temperatura mínima de trabalho. Utilizando os dados de Snyder e Caillat (2003) para o Telureto de Bismuto os valores da densidade de corrente reduzida, avaliada na face fria em 25 °C, são 2,94 1/V para elementos do tipo **p** e -2,01 1/V em elementos do tipo **n**. Esse é o valor de referência para avaliação das propriedades envolvidas, destaca-se que os valores obtidos acima de 300 K já constam na literatura científica enquanto que os valores tomados a uma temperatura abaixo de 0 °C ainda não foram explorados e aqui neste trabalho expõem-se essa estimativa teórica para temperaturas a partir de 260 K. Levando em conta que Snyder e Snyder (2017) obtiveram resultados a partir das equações provenientes das teorias da compatibilidade, Seção 2.5, e uma vez normalizadas as curvas das principais propriedades termoelétricas é possível prever teoricamente o comportamento das variáveis envolvidas a partir da temperatura mínima conforme será visto a seguir.

A máxima eficiência de um gerador termoelétrico é limitada pelo rendimento de Carnot e a eficiência reduzida depende do número de mérito do dispositivo  $ZT$ ,  $T_h$  e  $T_c$  (SNYDER, SNYDER 2017) conforme equação (98). O número de mérito adimensional  $ZT$  é definido como uma única propriedade, assim não há dissociação entre  $Z$  ou  $T$ , isto é, não existe um produto escalar entre  $Z$  e  $T$ , a mesma regra vale para  $zT$  do material.

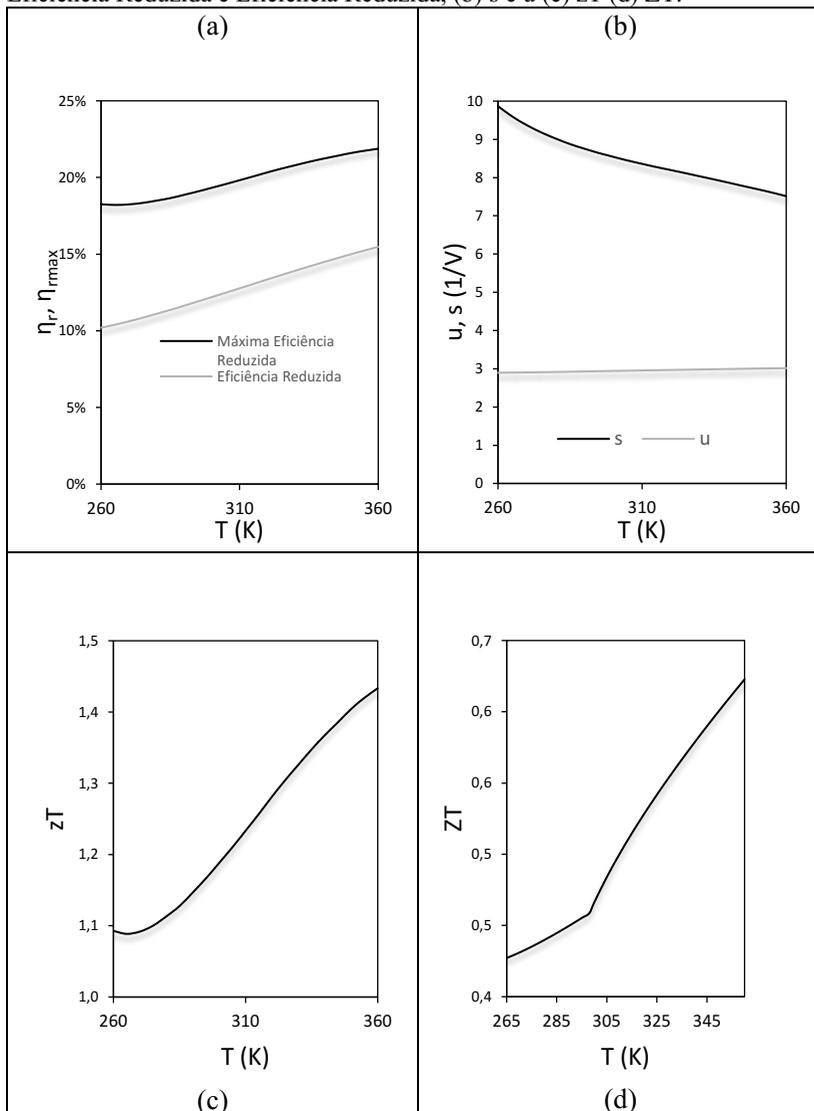
O objetivo é avaliar uma perna (bloco) do Telureto de Bismuto desprezando-se as perdas de calor e elétricas não ideais, e considerando transferência de calor unidimensional. Assim  $\eta_{\max}$  definido pela equação (98) permite chegar a  $ZT$  do dispositivo através de (176).

A partir dos valores de  $\alpha$ ,  $\rho$  e  $k$  da equação (9) é encontrado o valor de  $zT$  do material conforme consta em Figura 52 (c) para elementos do tipo **p** e Figura 53 (c) para elementos do tipo **n**. Assim a máxima eficiência reduzida definida pela equação (96) é então determinada.

Na seqüência, a partir da equação (81) e utilizando um valor de referência a densidade de corrente reduzida,  $u$ , determina-se a eficiência reduzida. Lembrando que para o elemento **p**, o valor de referência é de 2,94 1/V e para elementos do tipo **n** -2,01 1/V. o seu valor máximo (SNYDER, SNYDER 2017), ou seja, a equação (81) torna-se a equação (68). Empregando os valores de  $T$ ,  $\alpha$ ,  $\rho$  e  $k$ , e tendo  $u$  de referência na equação (91) para elementos do tipo **n** e para elementos do tipo **p** em (92)

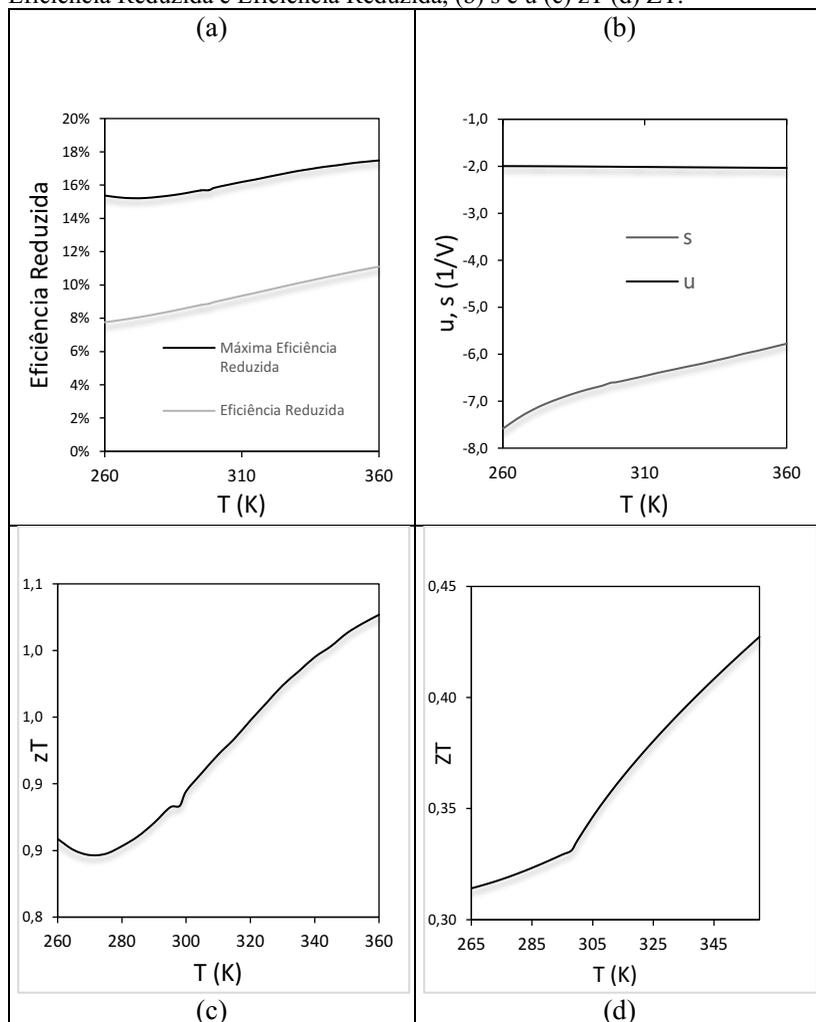
determinam-se os valores de  $u$  nas temperaturas de 298 K até 260 K numericamente.

Figura 52 - Resultados para os elementos do tipo  $p$  do  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , (a) Máxima Eficiência Reduzida e Eficiência Reduzida, (b)  $s$  e  $u$  (c)  $zT$  (d)  $ZT$ .



Fonte: Autor (2019).

Figura 53 - Resultados para os elementos do tipo  $n$  do  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , a) Máxima Eficiência Reduzida e Eficiência Reduzida, (b)  $s$  e  $u$  (c)  $zT$  (d)  $ZT$ .



Fonte: Autor (2019).

Para determinar o fator de compatibilidade,  $s$ , utiliza-se a equação (75) também é válido recordar que quando  $u = s$  a eficiência reduzida atinge o valor de máximo. Esse seria o método numérico de regressão de valores que permite estimar o valor de (91) e (92) a partir de 260 K. Para determinar os valores acima de 298 K a referência passa a ser o valor

central, e a partir de rearranjos nas mesmas equações citadas anteriormente, conforme aumenta-se a temperatura encontra-se o valor até 360 K. Isso tudo pode ser melhor entendido a partir das PROPRIEDADES DO Bi2Te3 A PARTIR DE 260 K

Tabela 9 e Tabela 10 que constam no Apêndice C. O incremento de temperatura possui um intervalo de 5 K.

As Figura 52 (a), (b), (c), (d) e Figura 53 (a), (b), (c) e (d) fornecem os valores centrais de referência que permitem iniciar a análise numérica. A partir dos valores de referência em 298 K obtêm-se os valores na temperatura de 300 K.

O próximo passo, uma vez determinado o comportamento da densidade de corrente reduzida, é determinar o potencial termoelétrico através do lado direito da equação (93). Assim o potencial termoelétrico é encontrado a partir da temperatura mínima de trabalho até a máxima de operação. Com isso, pode-se determinar através da equação (94) a eficiência real do dispositivo. Finalmente a partir da equação (176) é encontrado o número de mérito do dispositivo e assim completa-se a análise numérica.

## 6.2 GRADIENTES DE TEMPERATURA EM GERADORES TERMOELÉTRICOS

Primeiramente, será apresentada uma breve consideração sobre o gradiente de temperatura externo de um gerador termoelétrico, representado aqui por  $\Delta T$  em relação a variação de temperatura interna do TEG,  $\Delta T_{\text{TEG}}$ . Segundo Dalola *et al.* (2009) o erro entre  $\Delta T_{\text{TEG}}$  e  $\Delta T$  não deve ultrapassar 1 %. A fim de verificar a ocorrência desse erro de 1% entre as variações de temperaturas externas e internas do TEG, foi realizada uma avaliação teórica mantendo-se fixa a temperatura da face fria e elevando-se a temperatura na face quente. A classificação ocorreu em função da temperatura da face fria em quatro grupos com as respectivas temperaturas de 260, 273, 283 e 293 K. Atribuindo-se valores crescentes na temperatura da face quente encontraram-se os valores de  $\Delta T$  e a partir de (104) os de  $\Delta T_{\text{TEG}}$ . Os resultados dessa avaliação constam na Tabela 6. Constata-se que de fato os valores de  $\Delta T_{\text{TEG}}$  e  $\Delta T$ , são praticamente coincidentes durante o todo o processo de aquecimento na face quente, gerando um erro máximo de 1%. Isso demonstra que assumindo os valores das temperaturas externas, incidentes nas superfícies das aluminas, não ocorrem alterações significativas nos

cálculos de outras variáveis. Portanto fica assegurada a admissão de que  $\Delta T \approx \Delta T_{\text{TEG}}$  conforme foi comentado na Seção 3.

Tabela 6 - Demonstração das variações de temperatura externa e interna do TEG para TGPR 5W-5V-40S mantidas as respectivas temperaturas na face fria e elevando-se a temperatura em outra face

$\Delta T$ e $\Delta T_{\text{TEG}}$							
T <sub>c</sub> = 260 K		T <sub>c</sub> = 273 K		T <sub>c</sub> = 283 K		T <sub>c</sub> = 293 K	
$\Delta T$	$\Delta T_{\text{TEG}}$	$\Delta T$	$\Delta T_{\text{TEG}}$	$\Delta T$	$\Delta T_{\text{TEG}}$	$\Delta T$	$\Delta T_{\text{TEG}}$
13,00	12,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23,00	22,79	10,00	9,91	10,00	9,91	10,00	9,91
33,00	32,69	20,00	19,81	20,00	19,81	20,00	19,81
43,00	42,59	30,00	29,71	30,00	29,71	30,00	29,70
		40,00	39,61	40,00	39,60	40,00	39,59

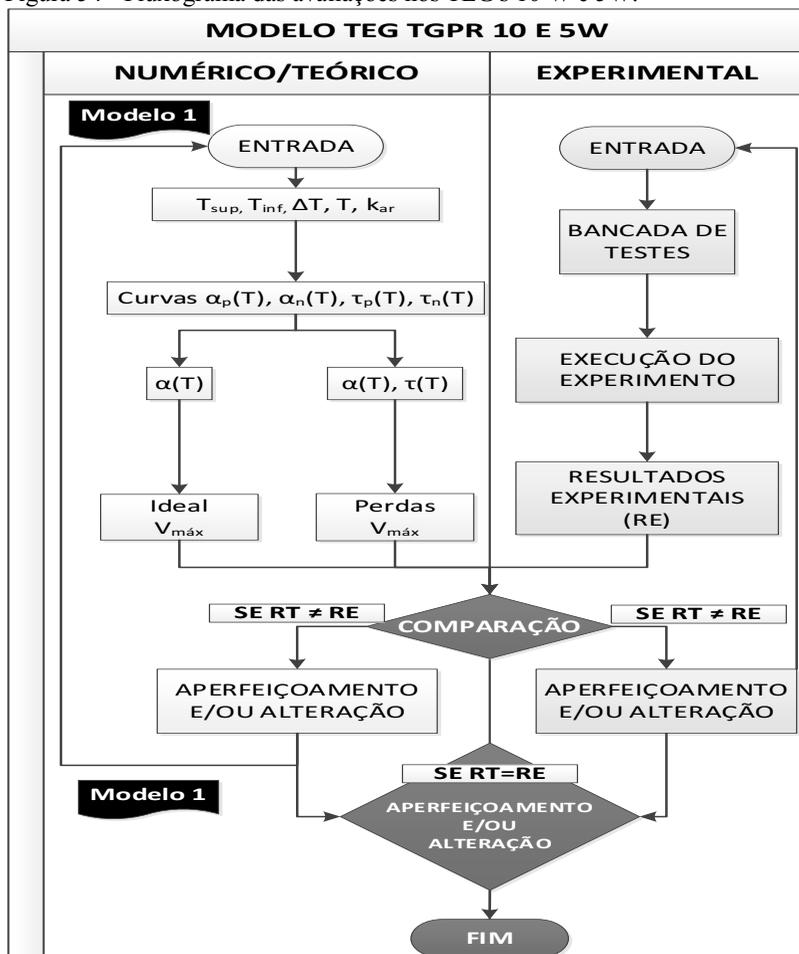
Fonte: Autor (2019).

### 6.3 DESEMPENHO DOS TEGs DE 5 E 10 W – MODELO 1

Em ambos os geradores termoelétricos, TGPR 5W-5V-40S e TGPR 10W-4V-40S, a propriedade diretamente avaliada experimentalmente foi a tensão elétrica produzida. A avaliação de desempenho desses TEG's utiliza o Modelo 1 apresentado no Capítulo 4. Para essa etapa foi realizada a seguinte análise de parâmetros:

- Teórico - Desempenho avaliado em circuito aberto ( $V_{ca}$ ) sem os efeitos Thomson;
- Teórico - Desempenho avaliado com carga designada pela tensão de saída ( $V_s$ ) sem os efeitos Thomson;
- Teórico - Desempenho avaliado em circuito aberto ( $V_{ap}$ ) incluem os efeitos Thomson;
- Teórico - Desempenho avaliado em tensão de saída com carga ( $V_{sp}$ ) incluem os efeitos Thomson.
- Experimental - tensão experimental proveniente da bancada experimental, denominada como  $V_{exp}$  para a tensão em circuito aberto;
- Experimental – a tensão de saída experimental  $V_{s_{exp}}$  considerando uma carga externa de  $5,4 \Omega$  que é aproximadamente igual a  $R_{in}$ , situação que gera  $P_{max}$ , conforme (50).

Figura 54 - Fluxograma das avaliações nos TEG's 10 W e 5W.



Fonte: Autor (2019).

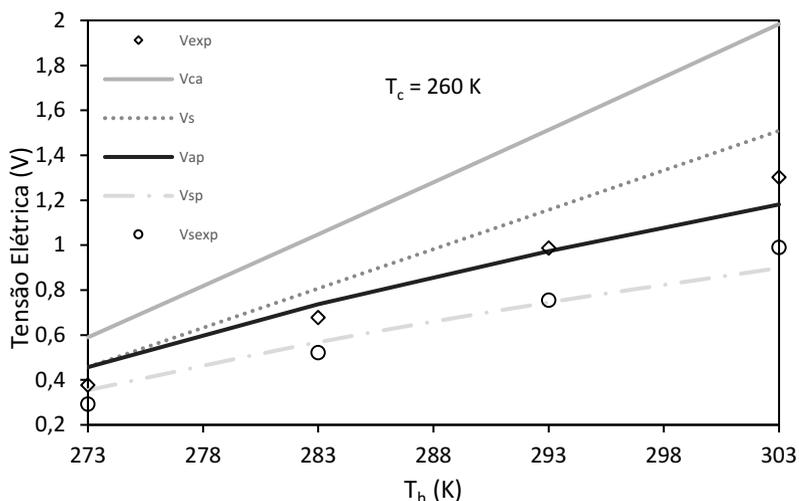
Entende-se como circuito aberto a avaliação que ocorre sem a presença de uma resistência elétrica (carga externa). Neste caso a medição é feita diretamente no gerador termoeletrico. No circuito fechado existe a presença de pelo menos uma resistência elétrica externa. As tensões,  $V_{ca}$  e  $V_s$ , sem efeito Thomson serão denominadas neste trabalho como tensões idealizadas teóricas, ou seja, sem perdas e são determinadas respectivamente a partir de (49) e (46). As que possuem perdas  $V_{ap}$  e  $V_{sp}$

recebem o nome de tensões teóricas com perdas e são determinadas respectivamente a partir de (67) e (60). Todos os resultados das tensões e potência elétrica máxima e de saída nos dois geradores utilizados constam no APÊNDICE C, totalizando 4 avaliações para cada gerador. Para a organização dessa avaliação de desempenho dos TEG's de 5 e 10 W foi desenvolvido um fluxograma contendo as principais ações teóricas e experimentais (vide Figura 54). No final dessa Seção será realizado um comparativo entre a análise teórica e experimental.

### 6.3.1 Avaliação TEG 5W

O TEG de 5W (TGPR 5W-5V-40S) possui 126 pares termoeletrônicos. Para sua avaliação e validação foi fixada a temperatura de 260 K na face fria e variou-se a temperatura na face quente nos seguintes valores: 273, 283, 293 e 303 K. É importante ressaltar que as temperaturas experimentais são uma média de três sensores de temperatura instalados em cada uma das faces do TEG. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 55.

Figura 55 - Avaliação da tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo-se a temperatura da face fria em 260 K.



Fonte: Autor (2019).

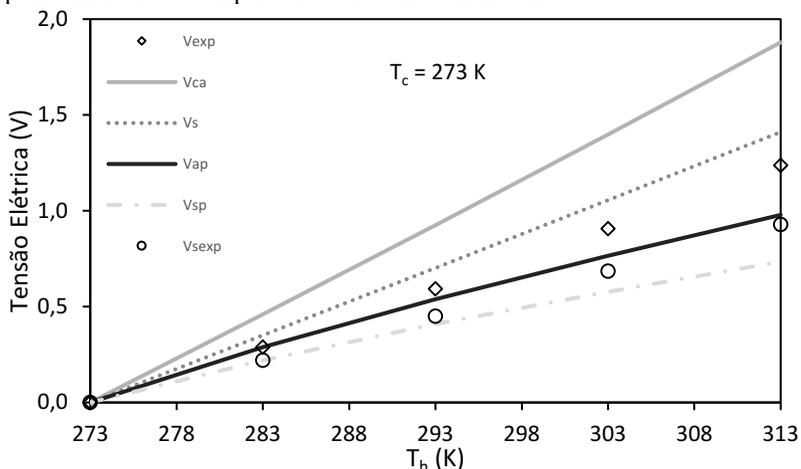
No mesmo gráfico, os valores de todas as tensões elétricas, estão apresentadas em função da temperatura da face quente. Uma carga externa de  $5,4 \Omega$  foi considerada para realizar as estimativas das tensões de saídas experimentais, com perdas e sem perdas. Os termos  $V_{\text{exp}}$ ,  $V_{\text{ca}}$  e  $V_{\text{ap}}$  representam os valores das tensões em circuito aberto que são as tensões máximas. As tensões elétricas  $V_{\text{Sexp}}$ ,  $V_{\text{s}}$ ,  $V_{\text{sp}}$  representam as tensões em circuito fechado com a presença da carga externa.

A tensão máxima ocorre quando a face quente é submetida ao maior valor de temperatura causando a maior variação de temperatura no dispositivo. A tensão experimental em circuito aberto foi de  $0,38 \text{ V}$  em  $T_{\text{h}} = 273 \text{ K}$  e  $1,3 \text{ V}$  para  $T_{\text{h}} = 303 \text{ K}$ . A tensão experimental de saída com carga foi de  $0,29 \text{ V}$  e  $0,99 \text{ V}$  para as mesmas temperaturas. Isso representa uma variação entre os valores em circuito aberto e fechado de  $0,08 \text{ V}$  a  $0,32 \text{ V}$  respectivamente para  $273$  e  $300 \text{ K}$ . A diferença entre as tensões  $V_{\text{ca}}$  e  $V_{\text{s}}$  fica em torno de  $0,13 \text{ V}$ , logo no início quando  $T_{\text{h}} = 273 \text{ K}$ . As curvas prosseguem afastadas até atingir um distanciamento máximo de aproximadamente  $0,48 \text{ V}$  para  $T_{\text{h}} = 303 \text{ K}$ . Isso significa que sem a presença da carga externa obtém-se  $1,98 \text{ V}$  e com a carga de  $5,4 \Omega$  a tensão cai para  $1,51 \text{ V}$ . Considerando as perdas por efeito Thomson, as tensões  $V_{\text{ap}}$  e  $V_{\text{sp}}$  tendem a ser afastar consideravelmente das tensões ideais, conforme mostra a Figura 55. O efeito Thomson provoca redução no valor das tensões e assim ocorre um afastamento entre as tensões ideais, tornando-se cada vez maior conforme a temperatura se eleva. Os efeitos de perdas causam decréscimo na corrente elétrica acarretando uma diminuição da potência elétrica. A relação entre as tensões  $V_{\text{ap}}$  e  $V_{\text{sp}}$  com relação a presença ou ausência de carga externa são similares a avaliação anterior, isto é, a tensão de circuito aberto é maior em relação a de circuito fechado. Ainda na Figura 55, os valores considerando as perdas por efeito Thomson ficam mais próximos dos experimentais. Tanto a tensão em circuito aberto experimental como a tensão de saída experimental situam-se nas regiões próximas das respectivas curvas  $V_{\text{ap}}$  e  $V_{\text{sp}}$ .

Na Figura 56, para o mesmo modelo de gerador termoelétrico, são detalhados os resultados de mais uma avaliação. A temperatura da face fria foi mantida em  $273 \text{ K}$  e a temperatura da face quente foi aumentada de  $273$  a  $313 \text{ K}$ . Pode-se observar comportamentos similares ao exposto anteriormente. O resultado da análise teórica do modelo sem perdas e em circuito aberto são responsáveis pelos maiores valores de tensão, enquanto que os valores com perdas por efeito Thomson e experimentais ficam localizados mais abaixo. No intervalo de temperaturas de  $273$  a  $313 \text{ K}$  as tensões experimentais em circuito aberto variam de  $0$  a  $1,23 \text{ V}$ , em circuito fechado de  $0$  a  $0,93 \text{ V}$ , tensões ideais em circuito aberto de  $0$

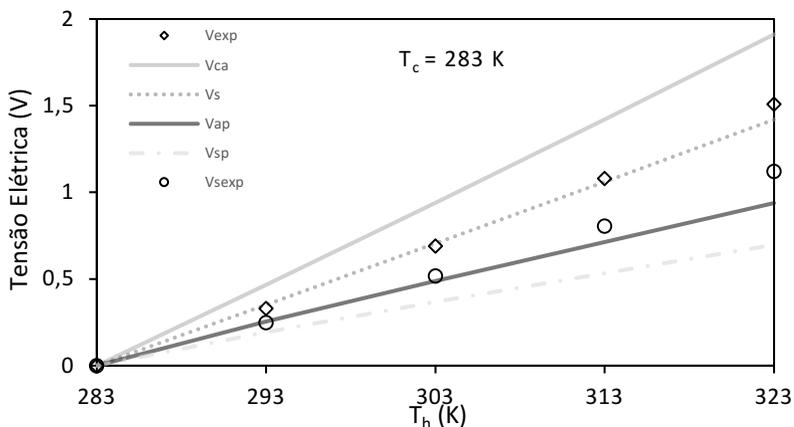
a 1,88 V, em circuito fechado a tensão de saída estimada fica entre 0 a 1,41 V. E por fim, ainda em relação ao mesmo intervalo de temperaturas as tensões avaliadas com perdas em circuito aberto variam de 0 a 0,98 V enquanto que em circuito fechado partem de 0 a 0,73 V.

Figura 56 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 273 K.



Fonte: Autor (2019).

Figura 57 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 283 K.

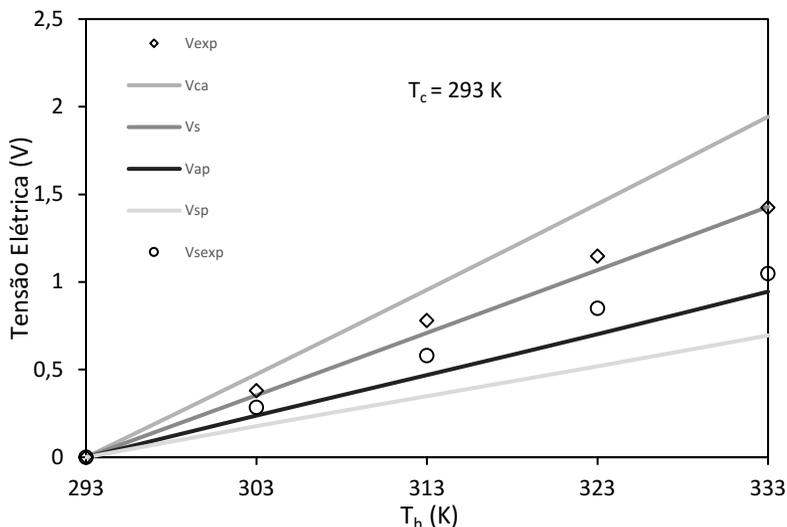


Fonte: Autor (2019).

Para temperaturas da face fria de 283 K e 293 K, observa-se o mesmo comportamento das curvas tanto para dados experimentais quanto para os teóricos. As

Figura 57 e Figura 58 ilustram esse comportamento.

Figura 58 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 293 K.



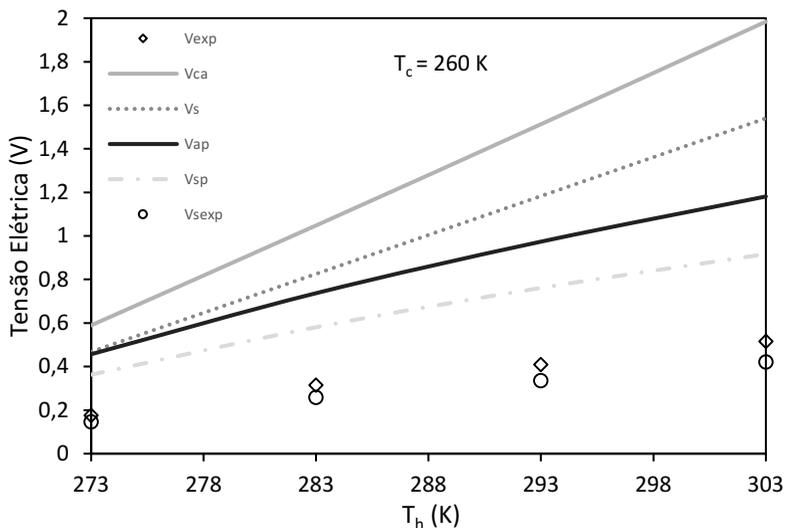
Fonte: Autor (2019)

### 6.3.2 Avaliação TEG 10 W

Para O TEG TGPR 10W-4V-40S o mesmo procedimento de teste foi realizado, manteve-se as temperaturas na face fria em 260, 273, 283 e 293 K e elevou-se continuamente a temperatura na face quente. Os dados teóricos foram obtidos do modelo 1. Para a temperatura da face fria constante a 260 K, os resultados são apresentados na Figura 59. Nela vemos os valores das tensões experimentais, bem abaixo dos resultados do modelo teórico. Todas as tensões elétricas atingem o seu valor máximo com  $T_h = 303$  K. Observa-se que o valor experimental apresentou um valor máximo de 0,52 V em circuito aberto, enquanto para circuito fechado esse valor foi de 0,42 V, ambas para temperatura máxima de 303 K. Nessa mesma temperatura, as tensões ideais obtidas pelo modelo atingem o seu máximo computando 1,98 V em circuito aberto e 1,54 V em circuito fechado. Já os modelos que consideram as perdas por efeito

Thomson apresentaram tensões de 1,18 V em circuito aberto e 0,92 V considerando resistência externa. Fica claro neste caso que o gerador termoeletrico produz tensões elétricas menores em relação ao primeiro TEG, comparado as mesmas faixas de temperaturas. Isso se deve as características diferentes nos materiais termoeletricos que compõem os dois dispositivos.

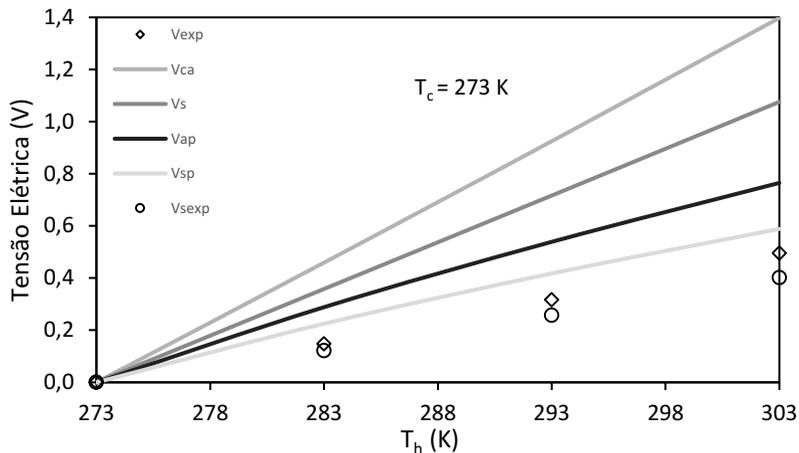
Figura 59 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 260 K.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O coeficiente de Seebeck do gerador do TGPR 10W-10V-40S é menor e por isso uma menor tensão elétrica é criada em relação ao TGPR 5W-5V-40S quando submetidos a mesma temperatura. A resistividade elétrica do TGPR 10W-10V-40S é menor que a do TGPR 5W5V40S portanto, a resistência elétrica também é menor. Devido a uma resistência elétrica em cerca de 3,3 vezes menor do segundo em relação ao primeiro, quando submetidos ao mesmo gradiente de temperatura a geração de potência elétrica é maior no TGPR 10W-10V-40S. O distanciamento nos resultados teóricos em relação aos resultados experimentais é resultado do coeficiente do Seebeck teórico ser maior que o dos dois dispositivos avaliados.

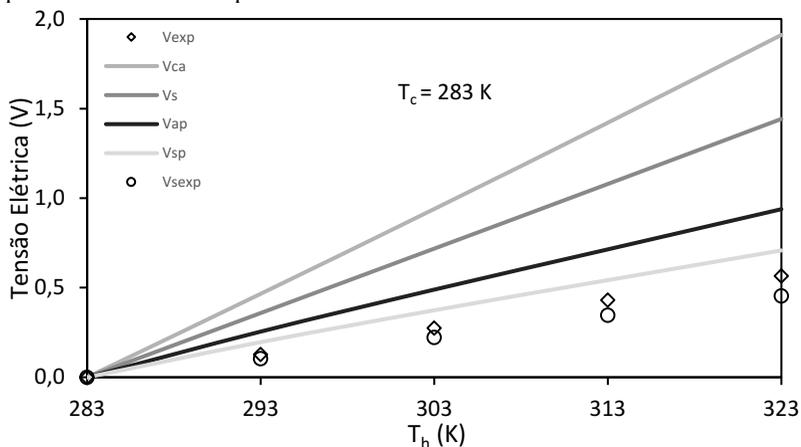
Figura 60 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 273 K.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Os dados retirados de Yan *et al.* (2010) e Poudel *et al.* (2008) são de materiais termoelétricos de alta performance e por isso as características termoelétricas são melhores que a dos dispositivos produzidos comercialmente.

Figura 61 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 283 K.

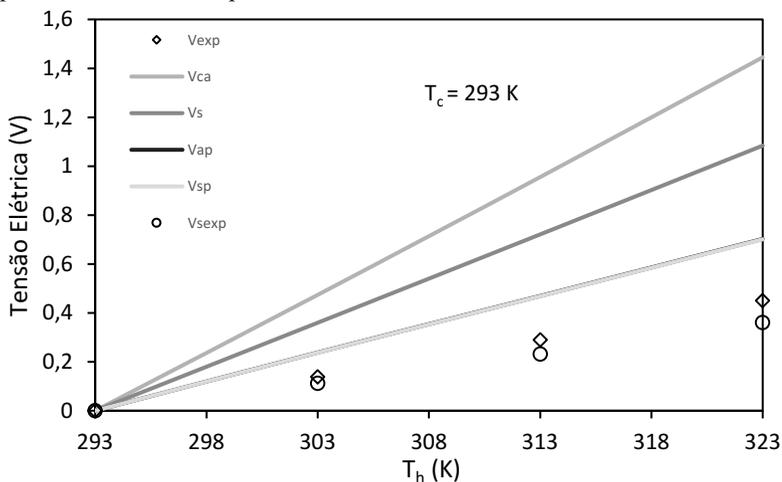


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O mesmo comportamento é verificado para as demais faixas de temperaturas avaliadas. Os resultados podem ser verificados nas

Figura 60, Figura 61 e Figura 62.

Figura 62 - Avaliação da Tensão elétrica em função da temperatura da face quente mantendo a temperatura da face fria em 293 K.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

## 6.4 RESULTADOS CUBESAT

Os resultados dos testes experimentais com um gerador termoeletrico no interior de um CubeSat simulando condição de voo orbital, bem como os resultados da análise teórica, **modelos 1, 2, 3, 4 e 5** são apresentados a seguir.

Diversos testes foram realizados em bancadas experimentais no laboratório com o TEG da empresa EVERREDtronics modelo TEG 241-1.0-1.2, contudo somente aqueles que apresentaram resultados importantes estarão expostos neste capítulo.

Primeiramente, foram gerados numericamente os gradientes de temperatura para a caracterização em um voo orbital de um CubeSat de acordo com Morsch Filho *et al.* (2017) e Ostrufka (2017). Em seguida, através da bancada experimental, esses gradientes foram replicados em laboratório e a geração de energia através de um gerador termoeletrico foi avaliada.

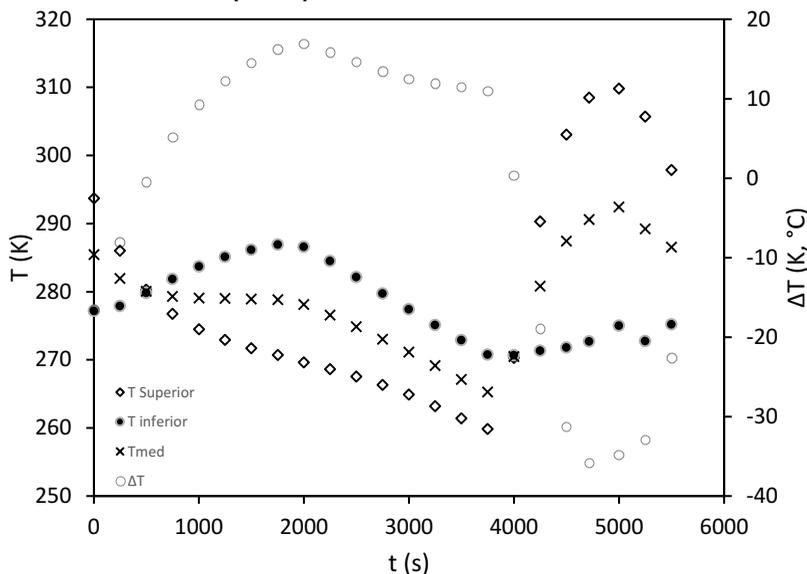
Os dados teóricos são comparados com resultados experimentais para a validação dos modelos teóricos. Isso descrito nas Subseções 6.4.4 até 6.4.10 e essa avaliação é feita em referência a **face 1** (painel solar 1) do nanossatélite.

Por fim, são apresentados os resultados de potência elétrica e geração de energia pelas 6 faces de um CubeSat através de geradores termoelétricos conforme consta nas Subseções 6.5 a 6.5.2.

### 6.4.1 Avaliação dos gradientes de temperatura sobre o TEG no interior de um CubeSat

A Figura 63 ilustra o perfil de temperatura obtido pela análise numérica entre a face interna do painel solar 1 e o interior do CubeSat.

Figura 63 - Avaliação das temperaturas superior, inferior e média durante a órbita do nanossatélite para o painel solar 1.

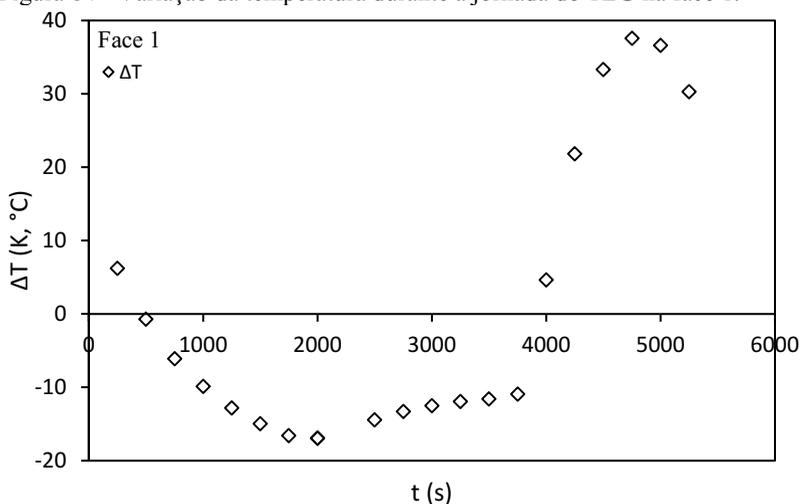


Fonte: Autor (2019).

No gráfico, a temperatura superior ( $T_{\text{sup}}$ ) é a temperatura média de três termopares da face superior do TEG imposta como temperatura de referência para o controle eletrônico da bancada. A temperatura inferior ( $T_{\text{inf}}$ ) está relacionada com a face inferior do TEG na bancada. A variação

de temperatura também é referenciada no eixo a direita com o intuito de demonstrar claramente o quanto essa propriedade varia conforme o tempo destacando os seus pontos de máximo e mínimo. Destaca-se que essas configurações de temperaturas e gradientes de temperaturas são diferentes em cada face do CubeSat. A Figura 64 mostra em detalhes os valores experimentais de  $\Delta T$  na face 1, (painel solar 1), durante a órbita do satélite.

Figura 64 - Variação da temperatura durante a jornada do TEG na face 1.



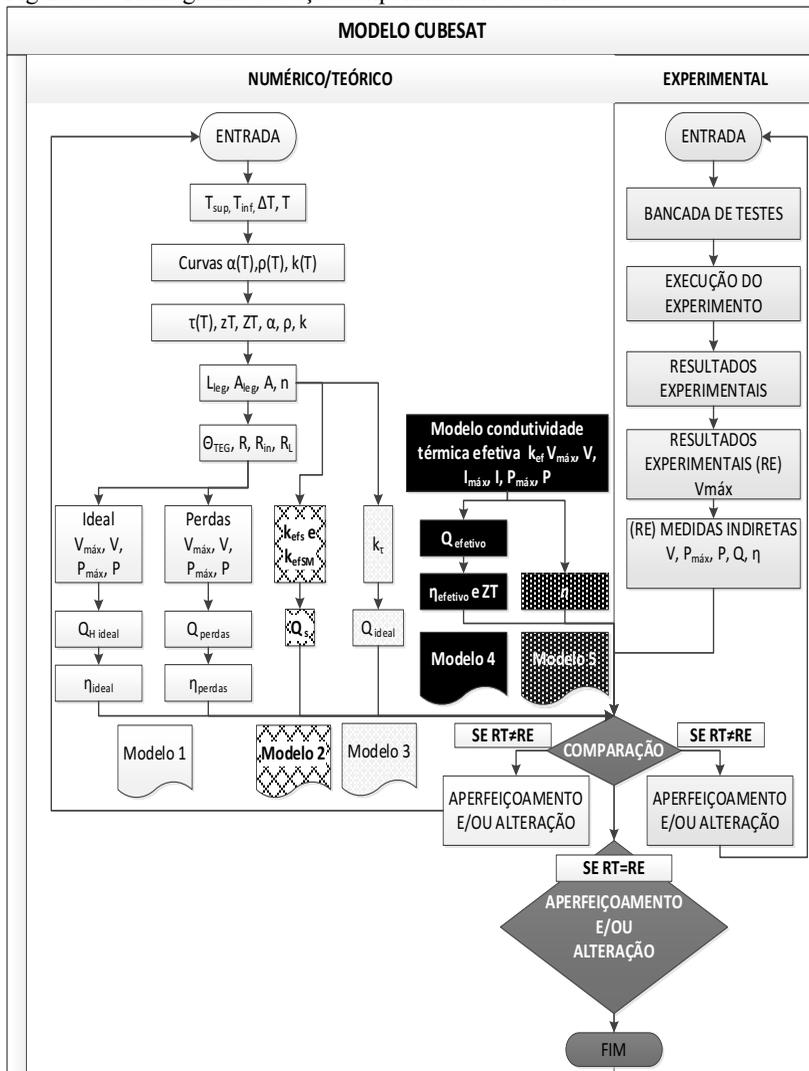
Fonte: Autor (2019).

## 6.4.2 Fluxograma

Um fluxograma contendo os detalhes dos procedimentos adotados para a avaliação dos modelos 1, 2, 3, 4 e 5 usando o TEG 241-1.0-1.2 na análise do CubeSat pode ser visto na Figura 65. O fluxograma se divide em teóricos contendo os modelos no lado esquerdo e experimental, lado direito, relacionando a bancada de testes. Na avaliação teórica os modelos 1 e 4 avaliam a maior quantidade de propriedades com tensão elétrica máxima e de saída, potência elétrica máxima e de saída, taxa de transferência de calor e rendimento. No modelo 4 permite ainda determinar a figura de mérito do dispositivo. Os modelos 2 e 3 são voltados respectivamente para investigação da condutividade térmica efetiva e equivalente com a finalidade de comparar com a taxa de transferência de calor no lado quente do dispositivo. O modelo 5

finalmente sugere um método de determinação de número de pares de um dispositivo termoeétrico utilizando os conceitos de condutividade térmica efetiva, CTE do modelo 4, os resultados desta análise foram comparados com os valores experimentais do TEG.

Figura 65 - Fluxograma das ações experimentais e teóricas.



Fonte: Autor (2019).

### 6.4.3 Avaliação das resistências elétricas do TEG

O valor da resistência total do gerador termoeletrico foi estimada por Audiffred (2015) utilizando medições através de diferentes gradientes de temperatura. Detectou-se que à medida que a temperatura média aplicada ao TEG aumenta, a resistência interna torna-se maior de forma aproximadamente linear e pode ser descrito pela equação abaixo (escala em graus Celsius):

$$R = 0,039\bar{T} + 5,67 \quad (189)$$

Convertendo a equação citada anteriormente para Kelvin podemos comparar com os valores da resistência elétrica do modelo. A equação da resistência elétrica proposta por Audiffred em Kelvin segue a seguir:

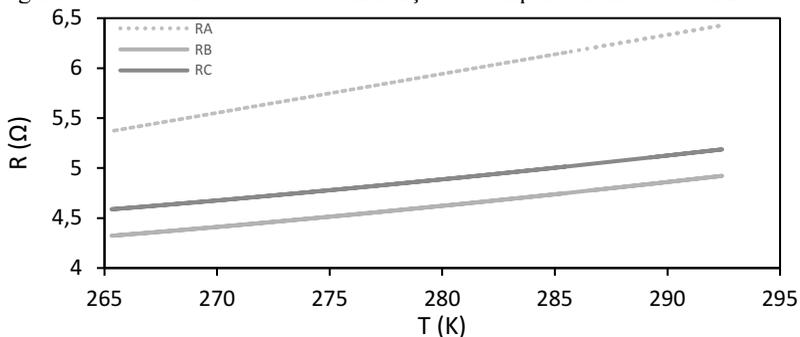
$$R_A = 0,039\bar{T} - 4,977 \quad (190)$$

Outras duas equações são sugeridas neste trabalho, a primeira, equação (191), define a resistência total do TEG sem a presença dos contatos elétricos e a segunda, equação (192), com a presença dos contatos elétricos.

$$R_B = 0,022\bar{T} - 1,58 \quad (191)$$

$$R_C = 0,022\bar{T} - 1,31 \quad (192)$$

Figura 66 - Resistências elétricas em função da temperatura média do TEG.



Fonte: Autor (2019).

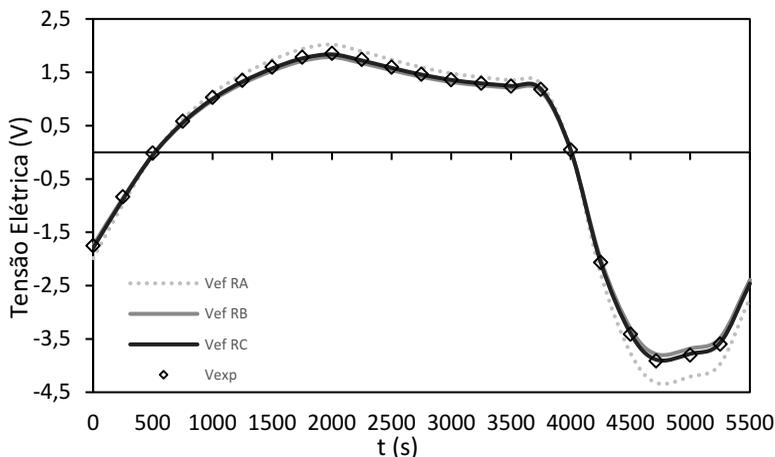
A partir dos dados do fabricante do TEG 241-1.0-1.2 é possível comparar essas resistências, conforme Figura 66. A resistência da equação (191) será a escolhida como variável de entrada dos modelos 3 e 4 para avaliar a propriedades ideais e não ideais do TEG. A escolha se justifica por apresentar os valores intermediários entre as duas outras resistências possibilitando avaliar os efeitos que ocorrem durante o funcionamento do TEG. Permite comparar o quanto que os efeitos dos contatos elétricos e das resistências internas influenciam na operação do dispositivo quando confrontados com os valores experimentais. Os resultados serão comparados com os valores experimentais.

#### 6.4.4 Tensão máxima - circuito aberto

A avaliação da tensão máxima em circuito aberto utilizando o modelo 4, (CTE), utiliza a resistência total interna do gerador termoelétrico. As resistências elétricas escolhidas  $R_A$ ,  $R_B$  e  $R_C$  variam conforme a temperatura média que depende do posicionamento do satélite em um determinado instante.

Avaliando a tensão em circuito aberto em termos da condutividade térmica efetiva percebe-se uma maior aproximação da curva experimental ocorrendo com a resistência elétrica  $R_B$  que não leva em conta os contatos elétricos, isso pode ser visto na Figura 67.

Figura 67 - Validação da tensão máxima teórica sugerida pelo modelo 4 na célula 1.

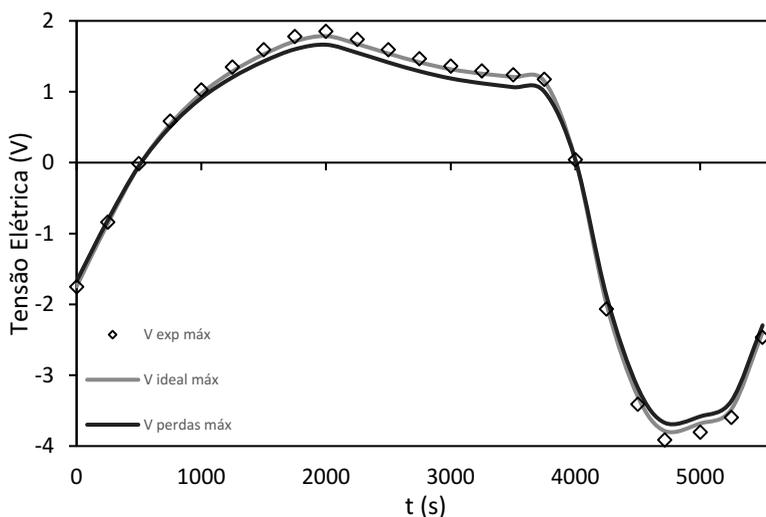


Fonte: Autor (2019).

Para a tensão máxima experimental de  $-1,75$  V, a tensão em circuito aberto apresenta um valor de  $-1,98$  V,  $-1,75$  V e  $-1,79$  V. Pode ser visto pelo gráfico que a tensão gerada pode assumir valores positivos e negativos, dependendo da posição do nanossatélite em órbita. Isso ocorre porque durante a órbita o gradiente de temperatura é invertido quando o satélite passa de uma posição solar para uma posição de eclipse. Em outras palavras, há momentos em que o satélite está recebendo raios solares diretamente, o que torna as superfícies externas mais quentes que as internas, e outros momentos em que a Terra está entre o satélite e o sol, impossibilitando que os raios solares cheguem ao satélite, tornando a região interna mais quente que as superfícies externas.

A Figura 68 mostra a distribuição das tensões elétricas máximas ou em circuito aberto utilizando o modelo 1.

Figura 68 - Comportamento da tensão elétrica máxima em função do tempo para um satélite em órbita utilizando um gerador termoeletrico. Avaliação com o modelo 1 na célula 1.



Fonte: Autor (2019).

São apresentadas as tensões máximas experimentais assim como os valores máximos teóricos das tensões elétricas. As tensões máximas ideais não possuem perdas por efeito Thomson, e as máximas não ideais (com perdas) incluem os efeitos Thomson, elas são detalhadas ao longo da órbita do nanossatélite. Na Figura 68 verifica-se uma grande

proximidade entre os dados experimentais e os resultados do modelo 1. A variação de temperatura entre a face superior e inferior do gerador termoelétrico influencia no valor de tensão. A tensão experimental em circuito aberto produzida pelo TEG no início, quando  $t = 0$  s, é negativa com  $V_{\text{exp}} = -1,75$  V aproximadamente. Os pontos em que os valores de tensão em circuito aberto chegam aos extremos ocorrem em  $t = 4716$  s atingindo experimentalmente o valor de  $-3,91$  V, teórico ideal  $-3,79$  V com 3% de erro e teórico não ideal  $3,67$  V com erro de 6%. A máxima variação entre a tensão elétrica experimental e a tensão ideal teórica, ambas em circuito aberto, ocorre entre  $4693,7$  e  $4873,9$  s com um valor em módulo de  $0,13$  V, enquanto que a variação entre a tensão experimental e a tensão elétrica com perdas chega a um máximo de  $0,24$  V em módulo, com maior frequência entre o intervalo  $4530$  e  $5292$  s. Na tensão máxima, o modelo ideal é o que mais se aproxima do experimental. A diferença entre o modelo 1 e 4 consiste nas equações utilizadas. No primeiro modelo não é levado em conta  $R_{\text{in}}$  na equação, conforme Tabela 3 e sim propriedades como coeficiente de Seebeck, variação da temperatura e número de pares. O modelo 4 utiliza  $R_{\text{in}}$  na equação e isso pode ser visto com melhores detalhes na Tabela 3. O modelo 4 utilizando resistência elétrica  $R_B$  apresenta resultados coincidentes com o modelo 1 durante todo o tempo. O quarto modelo é o mais prático porque utiliza apenas dados do fabricante não necessitando das propriedades termoelétricas como o modelo 1.

#### 6.4.5 Tensão de saída – circuito fechado

Uma vez validadas as tensões elétricas em circuito aberto e com os valores das resistências elétricas internas é possível avaliar as tensões elétricas de saída com a presença de uma carga externa no modelo. Adotando uma resistência de  $10 \Omega$  e utilizando a equação (46), onde tensão de circuito aberto é a tensão máxima, é possível estimar a tensão de saída experimental de forma indireta a partir de (193) em que tensão máxima é igual a tensão experimental em circuito aberto,  $V_{\text{max}} = V_{\text{exp}}$  :

$$V_{s_{\text{exp}}} = \frac{V_{\text{máx}} R_L}{nR + R_L} \quad (193)$$

A equação acima também pode ser reescrita em termos da resistência interna,  $R_{\text{in}} = nR$  :

$$V_{s_{exp}} = \frac{V_{max} R_L}{R_{in} + R_L} \quad (194)$$

Em função da razão das resistências elétricas,  $M$ , a equação (193) pode ser escrita como:

$$V_{s_{exp}} = \frac{MV_{max}}{M + 1} \quad (195)$$

Os principais parâmetros de avaliação de um TEG são a tensão e potência elétrica, entretanto caso seja necessário a corrente elétrica de saída experimental pode ser deduzida a partir de (193) através de considerações na equação (35) resultando em (196):

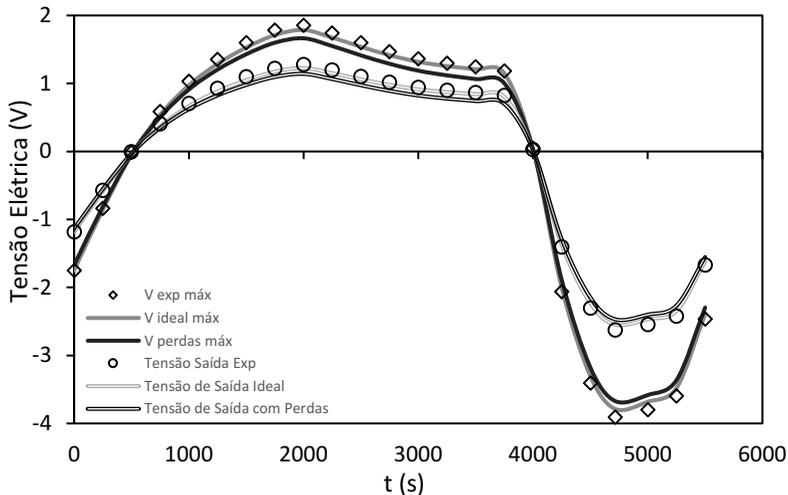
$$I = \frac{V_{max}}{nR + R_L} \quad (196)$$

A tensão de saída ideal teórica foi calculada a partir de (46) e a tensão de saída teórica com perdas é determinada a partir de (60). A tensão de saída estimada para a célula 1, com carga externa de  $10 \Omega$ , varia significativamente quando comparado com a tensão máxima que é a de circuito aberto. A resistência de carga externa afeta diretamente o comportamento da tensão elétrica experimental de saída, assim como a razão de resistências elétricas. Outro fato que influencia na avaliação da tensão de saída durante o período de órbita do CubeSat é a variação de temperatura, que conjuntamente com o coeficiente de Seebeck determinam a tensão em circuito aberto.

A máxima variação de temperatura na célula 1 fica em torno de 35,84 K para o instante de 4716 s. Na Figura 69 nesse mesmo instante referenciado, a variação máxima entre a tensão de saída experimental e a tensão de saída ideal teórica é de 0,13 V em módulo. A variação de tensão experimental em relação a tensão de saída com perdas atinge um máximo de 0,24 V em módulo. Os valores máximos das tensões de saída em módulo são 2,39; 2,32 e 2,25 V respectivamente para estimativa experimental, ideal e não ideal. Esses valores ocorrem no tempo de 4716 s e constam na Figura 69.

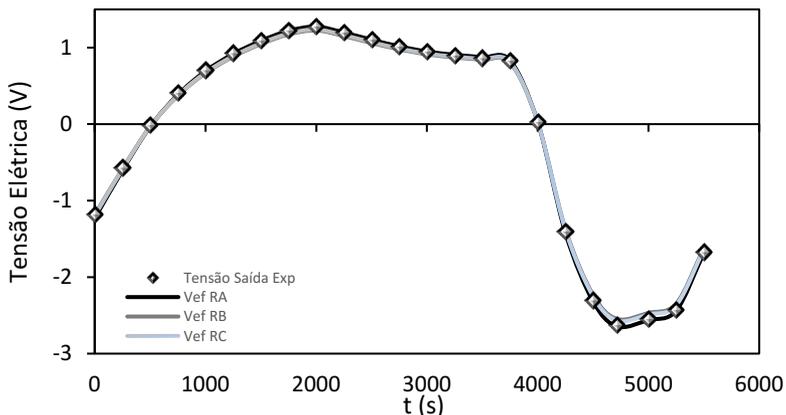
Na Figura 70 está ilustrado a influência da variação das resistências internas no TEG em relação a tensão gerada sobre a presença de carga externa,  $R_L = 10 \Omega$ .

Figura 69 - Tensões máximas e tensões de saída em função do tempo, modelo 1, célula 1, durante a órbita do satélite.



Fonte: Autor (2019).

Figura 70 - Comparação entre as tensões de saída experimental e as tensões de saídas, utilizando os conceitos de condutividade térmica efetiva, modelo 4, a partir de três tipos de resistências elétricas selecionadas e distintas na célula 1.



Fonte: Autor (2019).

As tensões provenientes de modelo de condutividade térmica efetiva considerando as resistências elétrica A, B e C apontam para -1,23 V, -1,18 V e -1,19 V. O valor máximo experimental gerado foi de -2,63 V.

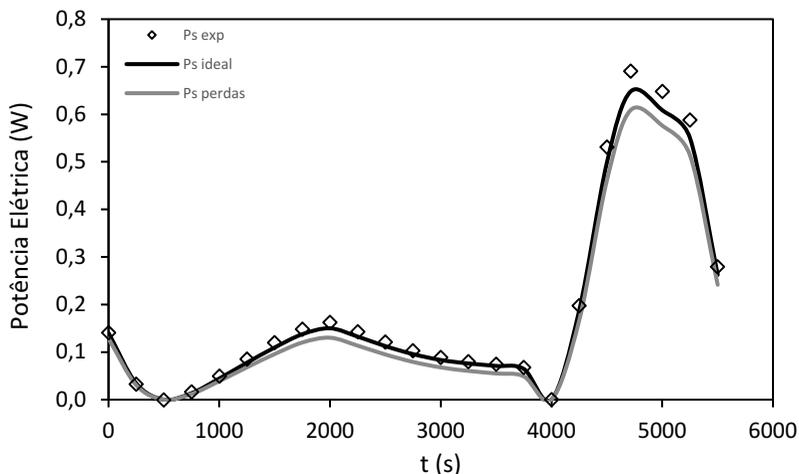
Para as resistências de A a C a tensão foi de -2,64; -2,55 e -2,57 V, respectivamente. No ponto de valor máximo que se situa em 4716 s onde  $\Delta T = -35,84$  K os erros atingem respectivamente 1%, 3% e 2%, respectivamente. A curva com resistência elétrica  $R_B$  se comporta conforme o modelo ideal.

- **Potência de Saída**

O valor da potência elétrica de saída de um dispositivo eletrônico é obtido geralmente partir da relação  $P = V \cdot I$  e desta forma os resultados experimentais, ideais e com perdas são estimados. Quando o valor experimental coletado é a tensão de circuito aberto e os valores de resistência interna total do TEG e da carga externa são conhecidos, é possível utilizar a equação abaixo. Basicamente emprega-se a equação (47) rearranjando-a matematicamente e aplicando devidas considerações resultando na equação (197). Os valores experimentais e teóricos de potência elétricas são apresentados na Figura 71.

$$P = \frac{V_{\max}^2 R_L}{(nR + R_L)^2} \quad (197)$$

Figura 71 - Potência elétrica em função do tempo experimental e teórica do modelo 1 na célula 1.

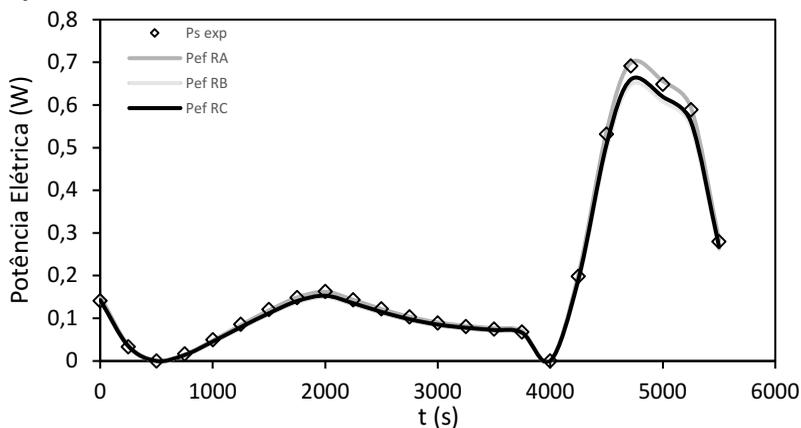


Fonte: Autor (2019).

Os valores iniciais experimentais, ideais e não ideais são respectivamente 0,14; 0,14 e 0,13 W. Na mesma sequência os pontos de máximo chegam a 0,69; 0,65 e 0,61 W. Percebe-se uma grande proximidade no comportamento das curvas teóricas e experimentais, os erros na análise ideal se mantiveram em média abaixo de 5% e na avaliação não ideal um pouco acima de 5%. No modelo 1 a avaliação ideal foi a que mais se aproximou dos valores experimentais. Os locais de maiores distanciamentos em relação a curva experimental ocorrem nos pontos de potência máxima nas proximidades de 4716s.

Novamente com o intuito de legitimar as equações utilizando os princípios da condutividade térmica efetiva proposta, recorre-se novamente a análise da variação da resistência interna do gerador, conforme ilustra a Figura 72. Os valores iniciais de potência de saída experimental, e os valores considerando as resistências de A até C são respectivamente 0,15; 0,14 e 0,14 W. A curva teórica que mais se aproxima dos dados experimentais é a da resistência interna  $R_A$ , com um erro de 1 % nas localizações de potência máxima, região de maior distanciamento em relação ao modelo 1. O modelo 4 utilizando a resistência  $R_B$  gera resultados praticamente idênticos ao modelo 1 na avaliação ideal.

Figura 72 - Comparativo da potência de saída utilizando conceitos de condutividade térmica efetiva, modelo 4 na célula 1, com relação aos dados experimentais.



Fonte: Autor (2019).

- **Potência Máxima**

O valor máximo da potência pode ser obtido derivando a equação (197) em relação a resistência de carga externa:

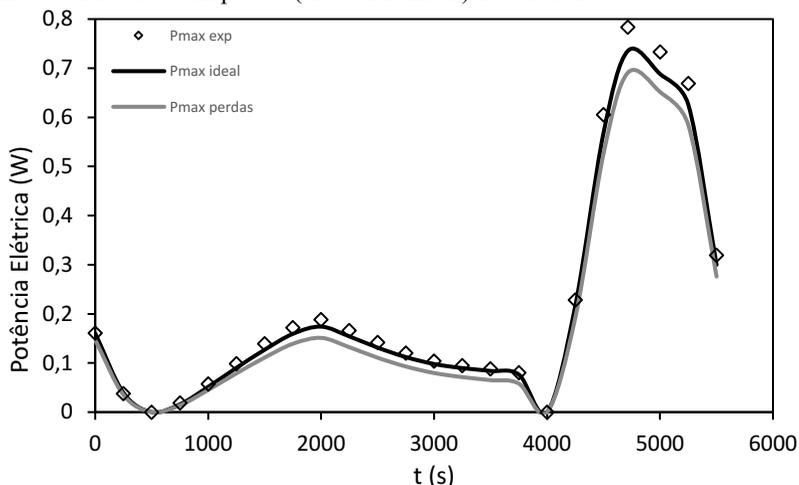
$$\frac{\partial P}{\partial R_L} = 0 \quad (198)$$

Assim o valor da resistência elétrica externa necessária para a determinação da máxima potência de saída ocorre, conforme equação (51), quando ela é igual a resistência interna total do disposto termoelétrico, ou seja, a soma de todas as resistências dos blocos  $p$  e  $n$ . Os valores das potências máximas do satélite são descritos pela equação (199).

$$P = \frac{V_{\max}^2}{4R_{in}} \quad (199)$$

Na Figura 73 é apresentado o resultado da potência elétrica máxima de acordo com os modelos ideais e não ideais.

Figura 73 - Potência elétrica máxima experimental e potência elétrica teórica do modelo 1 ideal e com perdas (efeito Thomson) na célula 1.

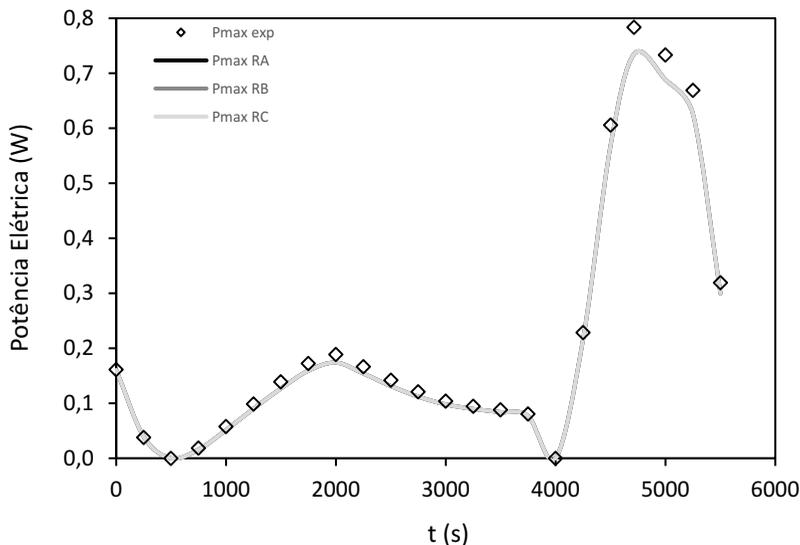


Fonte: Autor (2019).

Verifica-se que o modelo ideal fica mais próximo do modelo experimental demonstrando que os efeitos Thomson interferem muito pouco quando submetidos a gradientes de temperaturas relativamente baixos. Os maiores erros ocorrem quando a variação de temperatura tende a zero, logo os valores de potência e também tensão máxima superam 5%. No instante de máximo supracitado os valores das potências máximas experimental, ideal e não ideal respectivamente são 0,78; 0,74 e 0,69 W.

No modelo 4, CTE, a equação de potência máxima é dada por (162). Observa-se que embora a condição inicial,  $R_{in} = R_L$ , necessária para atingir a potência máxima, a equação resultante demonstra, neste caso, uma independência da potência máxima com a resistência interna. A potência máxima depende da condutância ou resistência térmica, temperaturas entre as faces e figura de mérito. Avaliando desta forma a Figura 74 mostra as curvas de  $R_A$ ,  $R_B$  e  $R_C$  sobrepostas uma em relação as outras devido a apresentarem os mesmos resultados. Em relação ao experimental os maiores erros ocorrem em valores de potência tendendo a zero. Na região de máximo o valor experimental atingiu 0,78 W e as curvas das três resistências forneceram 0,74 W.

Figura 74 - Potência elétrica máxima experimental e potência elétrica teórica do modelo 4.



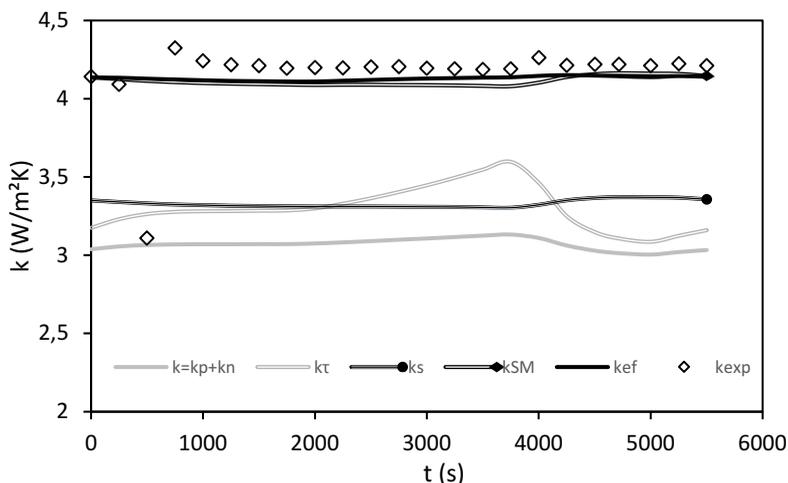
Fonte: Autor (2019).

### 6.4.6 Taxa de transferência de calor

As análises das taxas de transferência de calor envolvem os modelos 1,2,3 e 4. Sendo que as condutividades térmicas dos modelos 2,3 e 4 também serão discutidas. Todas as avaliações são em referência a célula 1. A análise dos resultados do modelo 1 se aplicam sobre a célula 1 do CubeSat, logo todos os dados iniciais e valores de tensão e corrente elétrica obtidos anteriormente podem ser utilizados para se estimar a transferência de energia térmica experimental na face superior do TEG.

Na Figura 75 são apresentadas as condutividades térmicas, térmica equivalente e térmicas efetivas.

Figura 75 - Estimativa das condutividades térmicas em função do tempo para os modelos propostos.



Fonte: Autor (2019).

A primeira representa a soma das condutividades térmicas dos pares termoeletrônicos  $n$  e  $p$ , referenciada pelo modelo 1. As condutividades efetivas,  $k_s$ , determinadas por Baranowski, Snyder e Toberer (2013) e  $k_{sm}$  condutividade efetiva com modificações a partir da inclusão de uma constante “c” pertencem ao modelo 2. Elas são propostas neste trabalho e foram descritas na Seção 4.4. A condutividade  $k_t$ , modelo 3, é a condutividade equivalente sugerida neste trabalho, também representada para o par  $p$  e  $n$  e obtida a partir de (124). O modelo 4 é a CTE obtida

pela equação (128) e condutividade térmica experimental é dado pela equação (200) para fins de comparação.

$$k_{\text{exp}} = \frac{L_{\text{leg}} Q_{\text{exp}}}{n A_{\text{leg}} \Delta T} \quad (200)$$

Na Figura 75 a condutividade térmica  $k_{\tau}$  atinge um máximo de 3,11 W/mK, enquanto que a condutividade térmica de um par **p-n** em torno de 3,01 W/mK. A sugerida por Baranowski, Snyder e Toberer (2013) obtém-se um valor máximo de 3,37 W/mK, mas com um valor corrigido atinge a marca de 4,16 W/mK. A CTE,  $k_{\text{cf}}$ , chega a um máximo de 4,14 W/mK e a condutividade térmica experimental um máximo de 4,22 W/mK. Verifica-se na Figura 75 que o valor que mais se aproxima da condutividade térmica experimental durante toda a jornada é o modelo 4, CTE.

A transferência de calor experimental é encontrada a partir do rearranjo da equação (39):

$$\dot{Q}_{\text{exp}} = \left[ K_{\text{TEG}} \Delta T + \frac{V_{\text{exp}}^2}{(R_{\text{in}} + R_{\text{L}}) \Delta T} T_{\text{inf}} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_{\text{exp}}}{R_{\text{in}} + R_{\text{L}}} \right)^2 R_{\text{in}} \right] \quad (201)$$

Onde  $T_{\text{inf}}$  é a temperatura na face inferior.

Os modelos teóricos utilizam os parâmetros  $\alpha(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $k(T)$  e  $\tau(T)$  contidos no APÊNDICE C – Fenômenos Termoelétricos, fornecidos pelo fabricante, e os dados de Morsch Filho *et al.* (2017) em conjunto com as equações descritas respectivamente na Tabela 3.

Para o modelo 1 a expressão da taxa de transferência de calor idealizada, isto é sem perdas, é apresentada pela equação (39) que é rearranjada conforme (202). Nela insere-se a condutância da expressão (106). No modelo 1, com perdas, utiliza-se a equação para a taxa de transferência de calor com efeitos Thomson (52) que é rearranjada pela equação (203) e novamente usa-se a condutância de (106).

$$\dot{Q} = \left[ K_{\text{TEG}} \Delta T + \frac{V_{\text{max}}^2}{(R_{\text{in}} + R_{\text{L}}) \Delta T} T_{\text{inf}} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_{\text{max}}}{R_{\text{in}} + R_{\text{L}}} \right)^2 R_{\text{in}} \right] \quad (202)$$

$$\dot{Q} = \left[ K_{TEG} \Delta T + \frac{V_{\tau \max}^2}{(R_{in} + R_L) \Delta T} T_{inf} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_{\tau \max}}{R_{in} + R_L} \right)^2 R_{in} \right] \quad (203)$$

Onde  $V_{\max}$  é retirado de (49) e  $V_{\tau \max}$  de (67).

O modelo 2 avalia duas taxas de transferência de calor. Adota a equação idealizada citada anteriormente com a inclusão da condutância (112) para prever a primeira taxa de energia térmica e a condutância modificada pela inserção da constante “c” na condutividade efetiva conforme (113) para a contemplar a segunda taxa de transferência de calor.

O modelo 3 utiliza a (203) com perdas por efeito Thomson incluindo a (127) nesta expressão. Para a verificação da contribuição de cada fenômeno (Seebeck, Thomson, Peltier, Joule e Fourier) sobre a transferência de calor foram realizadas algumas avaliações:

1) A primeira avaliação se divide em duas:

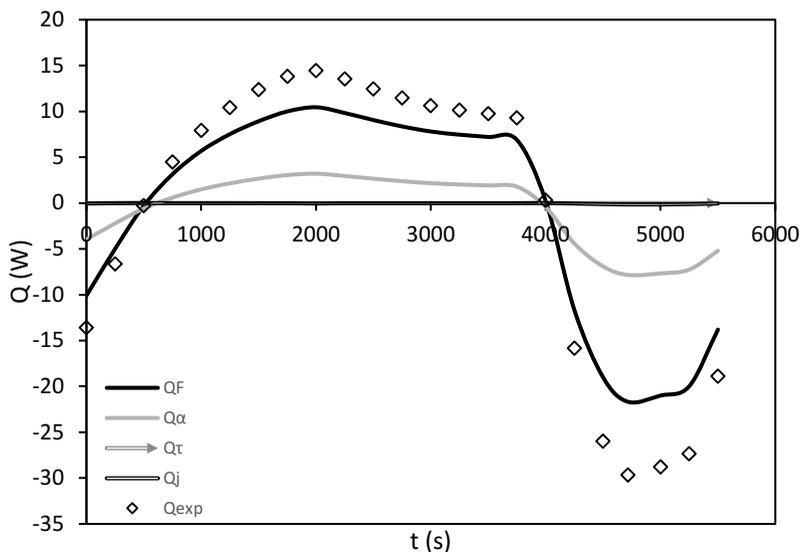
- Contempla somente os valores de transferência de calor adotando o modelo 1. Na análise é demonstrado a taxa de transferência de calor por condução de Fourier, os efeitos Seebeck/Peltier, Joule, Thomson e uma comparação com os valores experimentais. Todas as propriedades variam com a temperatura e estão representadas na Figura 76.
- Compara o modelo 1 com perdas e sem perdas aos valores experimentais. Como referência uma análise simplificada de Fourier utiliza a condutividade térmica constante variando-se apenas a temperatura. Considera condutividades térmicas iguais para os elementos p e n e logo para todos os 241 pares, sabendo que  $k = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  para o Telureto de Bismuto. Assim, aplica-se na equação (100) e obtêm-se a estimativa de transferência de calor por condução térmica. Consta na Figura 77.

2) A partir do modelo 2, sugere-se neste trabalho utilização da condutividade térmica efetiva sugerida por Baranowski, Snyder e Toberer (2013), vide (107). Ela foi desenvolvida para um par termoelétrico, porém neste trabalho realiza-se uma avaliação para todo o dispositivo, contendo os 241 pares, investigando dessa forma o comportamento da condutividade térmica e a

transferência de energia térmica. Essa proposta é ilustrada na Figura 78.

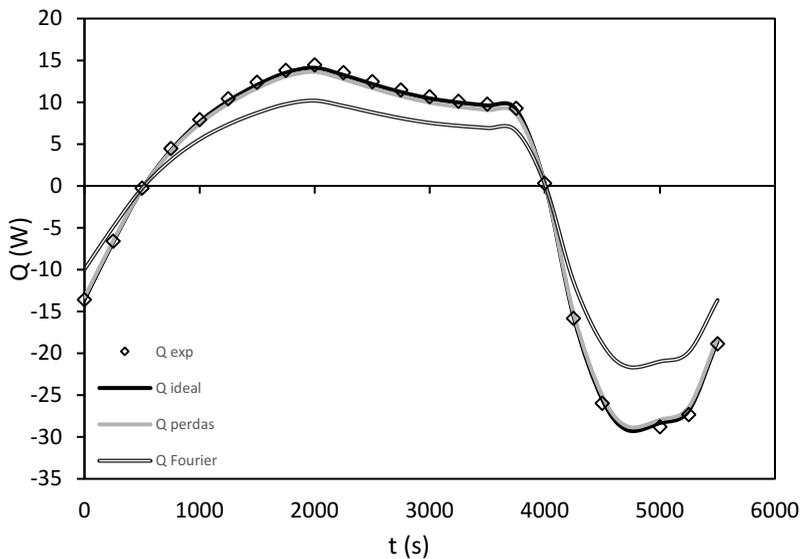
- 3) Ainda no modelo 2, uma outra proposta de condutividade térmica é sugerida neste trabalho a partir da mesma equação de condutividade térmica efetiva (110), a mesma sugerida por Baranowski, Snyder e Toberer (2013). Contudo agora com a introdução de uma constante,  $c = 1,215$ . Essa ação resulta em uma condutividade térmica efetiva modificada representando mais uma proposta na análise transferência de calor para o gerador termoelétrico. Isso é mostrado na Figura 78
- 4) Por fim com base no modelo 3, a última avaliação é uma proposta sugerida por esse trabalho. Uma condutividade térmica equivalente com inclusão dos efeitos Thomson. Nela as propriedades variam com a temperatura, conforme os dados fornecidos pelo fabricante para as propriedades  $\alpha(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $k(T)$ . Lembrando que o valor de  $zT$  é estimado como a média dos valores dos pares termoelétricos. A Figura 79 demonstra essa proposta.

Figura 76 - Comparativos entre as taxas de transferências de calor do modelo 1 em relação ao experimental.



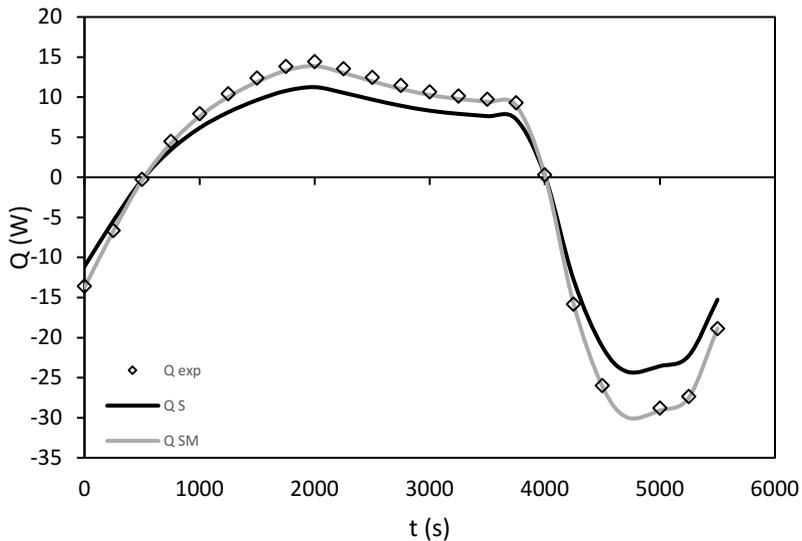
Fonte: Autor (2019).

Figura 77 - Transferência de calor do modelo 1 em relação ao experimental.



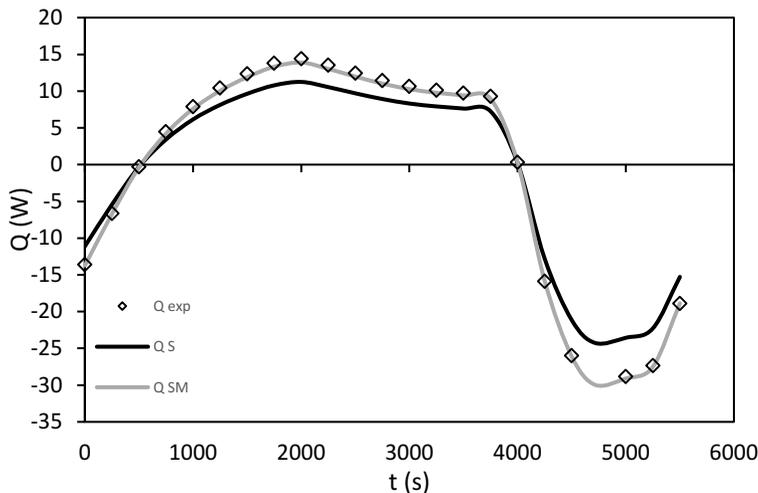
Fonte: Autor (2019).

Figura 78 - Transferência de calor na face inferior da célula 1 do TEG durante a órbita do satélite. Comparação entre o modelo 3 e o experimental.



Fonte: Autor (2019).

Figura 79 - Transferência de calor na face inferior da célula 1 do TEG durante a órbita do satélite. Comparação entre o modelo 4 e o experimental.

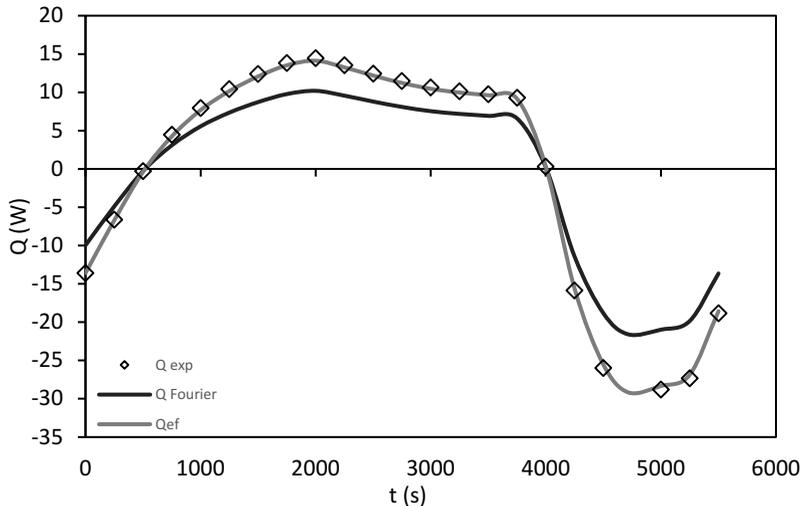


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

#### 6.4.7 Transferência de calor a partir de CTE – modelo 4

A validação da condutividade térmica efetiva é realizada através da comparação entre os dados teóricos e os dados experimentais, conforme a Figura 80. Desta vez não é possível realizar um comparativo com as outras resistências porque resultariam em diferentes valores de transferência de calor devido a equação (201) que utiliza o  $V_{exp}$ ,  $T_{sup}$  e  $\Delta T$  mas também usa  $R_{in}$ . Isso já é o suficiente para perceber a proximidade com os valores experimentais durante toda a curva. O distanciamento entre a curva de Fourier demonstra que os efeitos Peltier/Seebeck mais o efeito Joule influenciam no aumento da transferência de calor tanto na absorção como na rejeição de calor. A transferência de calor por condução representa cerca de 76 % enquanto que os efeitos Peltier/Seebeck 26,8% e o efeito Joule aproximadamente 0,2%. O modelo de condutividade térmica efetiva coincide exatamente como o modelo ideal conforme explicado anteriormente e por isso a diferença máxima entre as taxas de calor experimental e a adotada pelo modelo de condutividade térmica efetiva chegam ao mesmo valor, 0,5 W.

Figura 80 - Transferência de calor experimental, Fourier e comparação com o modelo de CTE.

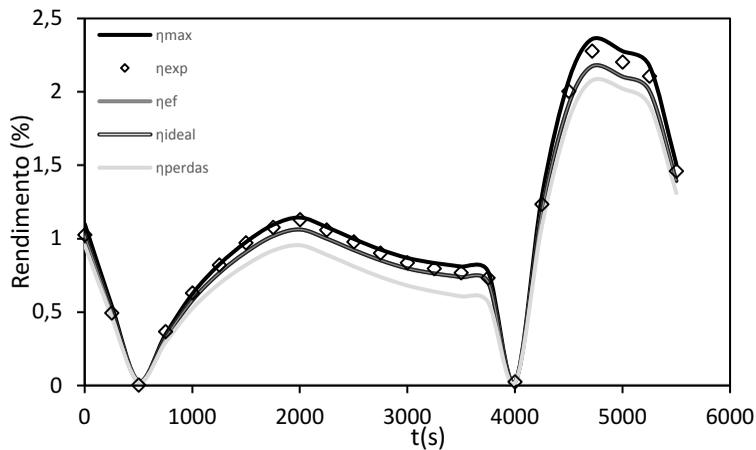


Fonte: Autor (2019).

### 6.4.8 Rendimentos

Na Figura 81, os rendimentos são avaliados através dos valores

Figura 81 - Rendimentos na célula 1 do CubeSat em órbita.



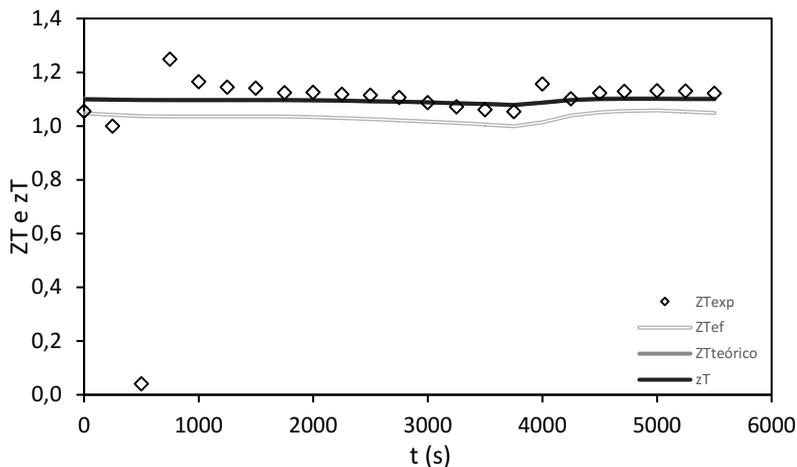
Fonte: Autor (2019).

experimentais, modelo 1 ideal e não ideal, a partir do modelo 4 e como referência máximo rendimento teórico possível a partir da equação. Os valores experimentais, ideais e não ideais foram obtidos através da equação (71), o rendimento utilizando conceitos de condutividade térmica efetiva são calculados a partir (174) e para o rendimento máximo a expressão (98). Os rendimentos com modelo 1 ideal e por condutividade térmica efetiva do modelo 4 apresentaram os mesmos resultados e ficaram mais próximos dos valores experimentais. Os modelos 1 e 4 mostrado nas curvas da Figura 81 registraram um erro máximo 4,51 % em relação aos valores experimentais. Na mesma figura percebe-se que o rendimento máximo possível é de cerca de 2,4%.

#### 6.4.9 Número de mérito

Finalmente para validar o número de mérito do dispositivo conforme proposta deste trabalho, de acordo com a equação (178), recorre-se a expressão (176). Inserindo o valor do rendimento experimental encontrado anteriormente, pode-se assim obter o número de mérito experimental do dispositivo (vide Figura 82).

Figura 82 - Avaliação na face 1 das Figuras de mérito do dispositivo e número de mérito do material durante a órbita.



Fonte: Autor (2019).

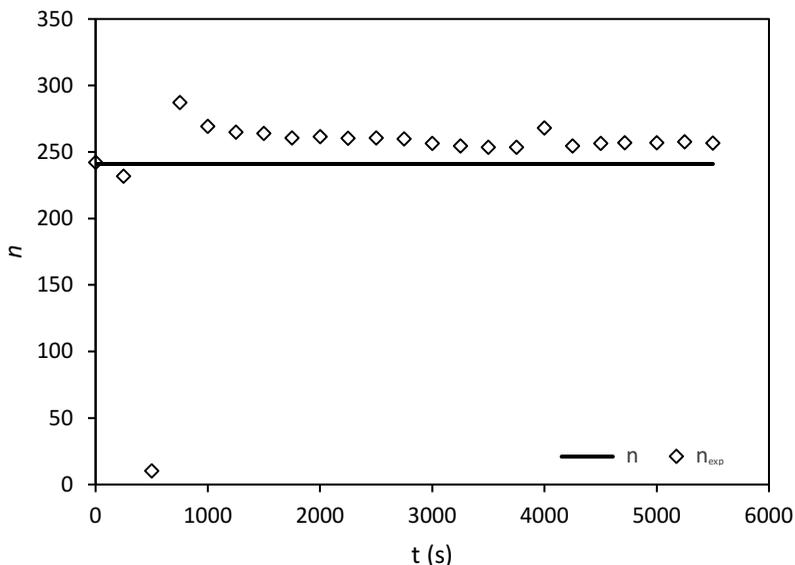
A equação (13) fornece o número de mérito do dispositivo e a (11) o número de mérito do material. Todas as equações são avaliadas com

propriedades variáveis. Nota-se na Figura 82 que todas as figuras de méritos ficaram muito próximas de 1. A curva que mais se aproxima da experimental é a curva teórica do dispositivo. O ZT sugerido pelo modelo CTE ficou suavemente abaixo de ZT experimental com um erro médio próximo de 5%.

#### 6.4.10 Determinação do número de pares – modelo 5

Utilizando a equação (183) no comparativo com os valores de tensão máxima experimentais determina-se o número de pares  $n$ . Na Figura 83 observa-se a grande proximidade dos valores teóricos com os experimentais,  $n_{exp}$ , por todo o percurso. A única exceção acontece em instantes próximos a 500 s onde ocorre um afastamento dos valores devido a variação de temperatura tender a zero. Em todos os pontos em que as variações de temperaturas não tendem a zero os resultados teóricos e experimentais ficaram próximos. O valor teórico manteve com exatidão o valor de 241 pares que é o fornecido pelo fabricante. A medição experimental obteve erro médio de 5% atingindo picos máximos de 9%.

Figura 83 - Número de pares avaliados com os dados do satélite em órbita na face 1 a partir do modelo 5.



Fonte: Autor (2019).

Terminada as validações das propostas sugeridas neste trabalho prossegue-se com outra parte importante que são as análises em outras faces determinando o quanto que o satélite pode gerar bem como qual face gera mais quantidade de energia.

## 6.5 RESULTADOS NAS 6 FACES DO CUBESAT – MODELO 1

Nesta Seção serão apresentadas as potências máxima e de saída, e a energia gerada nas 6 faces do CubeSat durante uma órbita. É utilizado somente o modelo 1, ideal, validado na Seção 6.4 para avaliar essas variáveis durante a órbita do satélite.

### 6.5.1 Potências de saída e máxima nas faces do nanossatélite

Utilizando informações de Morsch Filho *et al.* (2017), Ostrufka (2017) e a partir dos fundamentos abordados até este ponto são avaliadas as seis faces do FloripaSat para a geração de energia através de TEG's. Na avaliação são detalhados os resultados das potências elétricas máxima e de saída de cada face para um gerador termoelétrico submetido a um gradiente de temperatura. As potências de saída foram estimadas para resistores de carga externa de 1, 5 e 10  $\Omega$ . A resistência interna escolhida para esta avaliação foi a da equação (190).

Conforme a Figura 25, que mostra a vista explodida do FloripaSat, observa-se as faces 1 a 6 onde estão fixados os painéis solares. A célula 1 foi a utilizada até agora para a validação dos modelos propostos. Nessa Seção são apresentados os resultados da geração de energia elétrica em todas as faces juntamente com os resultados experimentais em bancada.

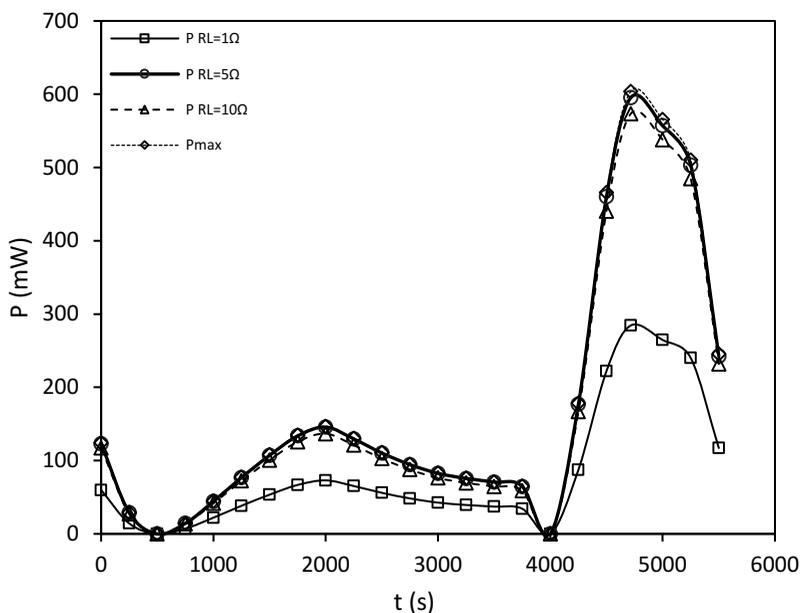
A potência de saída experimental é calculada a partir da equação (197) e a potência máxima experimental é avaliada a partir da equação (51) que pode ser rearranjada e resulta em (199). Entende-se como potência máxima o maior valor possível de potência em um determinado instante da órbita do nanossatélite. O posicionamento do satélite em relação ao Sol implica nas configurações de temperaturas nas partes externas e internas, assim a temperatura média influencia na resistência interna. O valor da tensão máxima sofre interferência conjunta da temperatura média, agindo na variação do coeficiente de Seebeck. Os valores das potências geradas sempre serão positivos, pois no caso de uma diferença de potencial negativa acarreta em uma corrente negativa e consequentemente uma potência positiva. O mesmo acontecerá para todas

as outras células que serão avaliadas. Então, o menor valor de potência possível é zero e acontecerá quando  $\Delta T$  for igual a zero.

É importante destacar as diferenças entre as potências máximas de saída e as potências máximas de pico. A potência máxima de saída é o valor avaliado na condição em que a resistência interna é igual a externa obedecendo a equação (196). A potência máxima de pico é o maior valor de potência encontrado durante a órbita do satélite.

Na Figura 84 são apresentados os resultados da face 1. O valor da potência máxima de pico ocorre nas proximidades do instante de 4716 s e são quase coincidentes com o maior valor de potência saída.

Figura 84 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10  $\Omega$  na célula 1 em função do tempo.



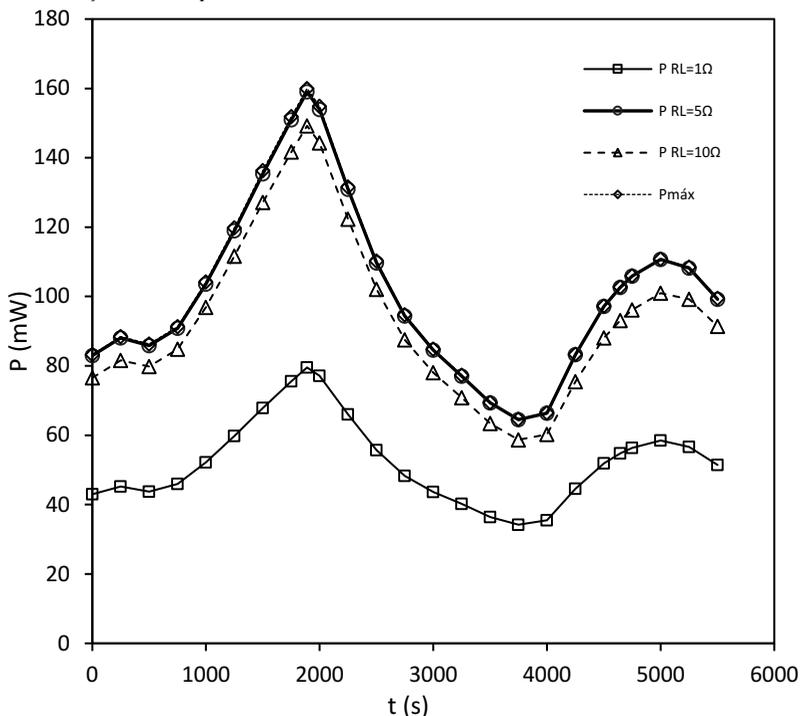
Fonte: Autor (2019).

Observa-se que o maior valor de potência de saída ocorre com a resistência de 5  $\Omega$ , atingindo um máximo de 595,4 mW, seguido pelo resistor de 10  $\Omega$  que fornece 573,4 mW e finalmente com o 1  $\Omega$  que alcança a marca de 284,4 mW, isso pode ser visto com melhores detalhes na Figura 84. A potência máxima de pico conforme citado anteriormente acontece quando a resistência de carga externa se torna igual a interna.

Considerando esta condição, o valor da potência máxima de pico acontece no tempo de 4716 s gerando 603,7 mW. Nota-se que o valor da resistência é de  $5,88 \Omega$ .

A célula 2 como visto na Figura 85 fica submetida durante toda a trajetória do CubeSat a um gradiente de temperatura negativo. As respostas das potências máximas e potências de saída constam na figura citada. No caso da célula 2 a potência máxima de pico e as potências máxima de saída são praticamente coincidentes, isto é, acontecem no tempo aproximado de 1890 s. Fica evidente neste momento que a melhor estratégia para utilização do gerador termoelétrico consistirá na escolha de uma resistência de carga externa que possua o valor mais próximo possível da resistência interna do TEG. A potência máxima de pico acontece no tempo de 1890 s produzindo 160 mW.

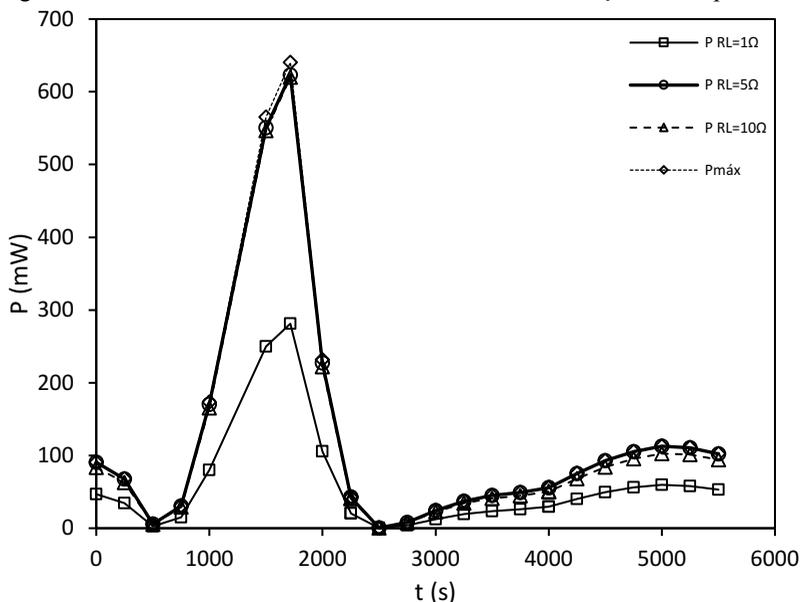
Figura 85 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10  $\Omega$  na célula 2 em função do tempo.



Fonte: Autor (2019).

A célula 3 é a face que mais gera potência de saída e onde ocorre a maior potência máxima de pico em relação a todas as outras faces, cerca de 640,4 mW no tempo de 1715 s (vide Figura 86). As potências de saída com resistores de 1, 5 e 10  $\Omega$  fornecem respectivamente 281, 623 e 620 mW nesse mesmo instante. A célula 3 fica submetida a um mínimo de -14,38 K e máximo de 38,66 K.

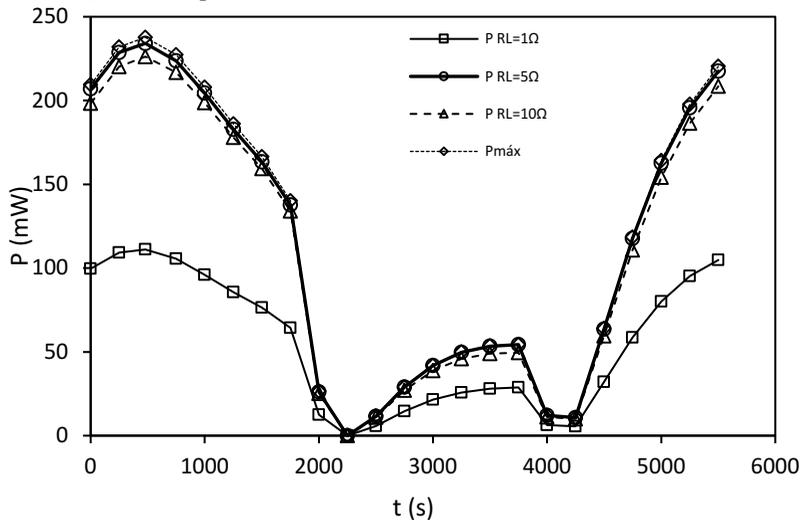
Figura 86 - Potências máxima e de saída na célula 3 em função do tempo.



Fonte: Autor (2019).

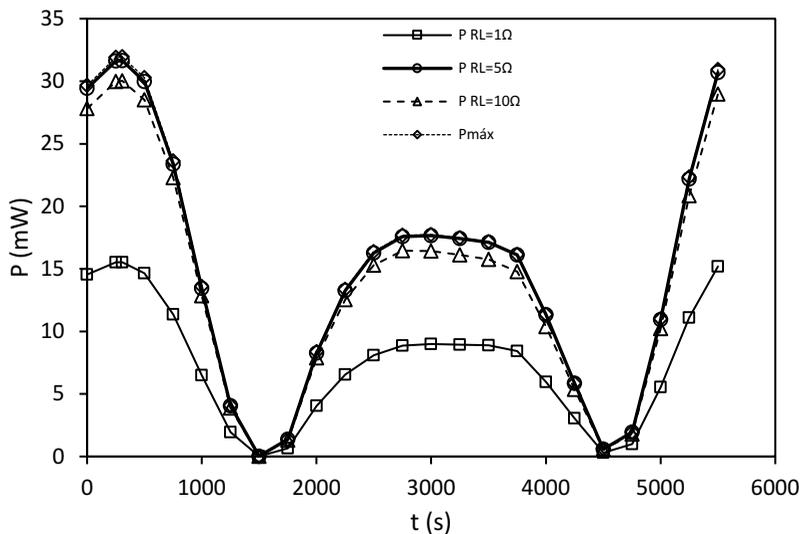
As análises das células 4, 5 e 6 são apresentadas respectivamente nas Figura 87, Figura 88 e Figura 89. A potência de pico, ponto de máximo nas curvas do gráfico, foram coletadas durante toda a curva e por isso será destacada com o propósito de comparar com os valores de potência máxima de saída. Os casos em que essas potências são coincidentes ocorrem nas células 1,2 e 3. Nesses três casos vemos que a potência máxima de saída acontece de fato no mesmo instante que a potência de pico. Nas células 4,5 e 6 embora com valores muito próximos, a potência de pico ocorreu em instante(s) diferente(s) do momento em que ocorre a potência máxima de saída.

Figura 87 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10  $\Omega$  na célula 4 em função do tempo.



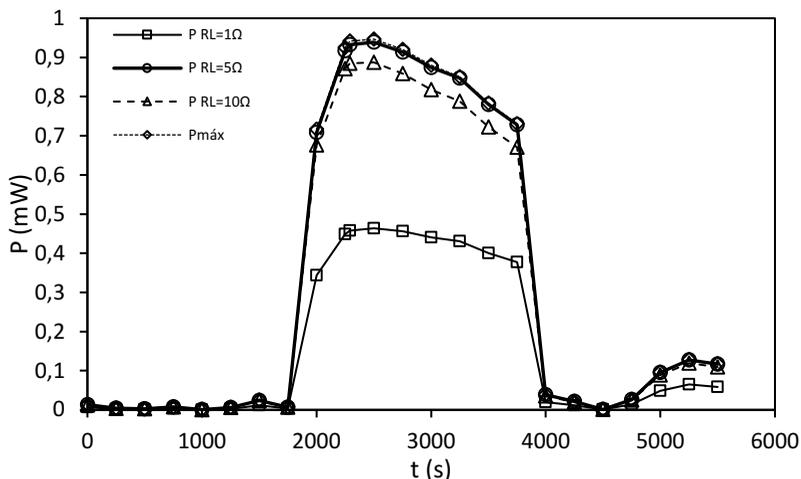
Fonte: Autor (2019).

Figura 88 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10  $\Omega$  na célula 5 em função do tempo.



Fonte: Autor (2019).

Figura 89 - Potências máxima e de saída com resistores de 1, 5 e 10  $\Omega$  na célula 6 em função do tempo.



Fonte: Autor (2019).

### 6.5.2 Energia gerada nas faces do nanossatélite

Finalmente são mostrados os valores em Watt-hora nas 6 faces do nanossatélite de acordo com a equação abaixo.

$$W_h = \sum_{i=1}^n P \Delta t \quad (204)$$

A quantidade de energia máxima em uma hora representada por  $Wh_{\max}$  é calculada a partir das somas das potências máximas de saída durante toda a órbita do satélite. As outras energias estão relacionadas as potências de saída com resistores de 1, 5 e 10  $\Omega$  como carga externa (vide Tabela 7). Conclui-se que as células que mais geram energia são, nesta ordem, a 3, 1, 4, 2, 5 e 6. A face 6 conforme já era esperado é a face que menos produz potência elétrica, porque ela permanece com a face voltada para a superfície terrestre. Somando as contribuições energéticas de cada face, conforme Tabela 8, chega-se a valores entre 400 a 819,05 mWh, a situação de maior energia elétrica produzida fica com a carga de 5  $\Omega$  que é a mais próxima da resistência externa atingindo 819,05 mWh. E a situação ideal onde a resistência externa é igual a interna tem a possibilidade de gerar 828,35 mWh.

Tabela 7 - Potência geradas em cada face de um CubeSat.

<b>Célula</b>	<b>t (s)</b>	<b><math>\bar{T}</math> (K)</b>	<b><math>\Delta T</math> (K)</b>	<b><math>P_{RL=1\Omega}</math> (mW)</b>	<b><math>P_{RL=5\Omega}</math> (mW)</b>	<b><math>P_{RL=10\Omega}</math> (mW)</b>	<b><math>P_{max}</math> (mW)</b>	<b><math>P_{pmax}</math> (mW)</b>
1	4716	17,00	37,36	284,40	595,30	573,30	603,70	603,70
2	1890	5,29	17,85	79,54	159,00	149,20	160,00	160,00
3	1715	33,25	38,59	281,20	623,10	620,00	640,40	640,40
4	481	18,64	22,71	111,10	234,10	226,20	237,70	237,80
5	307	10,12	8,18	15,53	31,65	30,03	31,95	31,96
6	2290	10,25	-1,26	0,46	0,93	0,89	0,94	0,95

Fonte: Autor (2019).

Tabela 8 - Energia produzida nas faces do nanossatélite

<b>Célula</b>	<b>Wh 1<math>\Omega</math></b>	<b>Wh 5<math>\Omega</math></b>	<b>Wh 10<math>\Omega</math></b>	<b>Whmax</b>
	<b>(mWh)</b>	<b>(mWh)</b>	<b>(mWh)</b>	<b>(mWh)</b>
1	128,09	262,13	249,39	264,93
2	81,76	158,93	147,03	159,54
3	98,35	205,35	198,00	208,85
4	82,74	171,52	164,37	173,75
5	10,33	20,65	19,40	20,80
6	0,24	0,47	0,44	0,47
<b>Total</b>	<b>401,49</b>	<b>819,05</b>	<b>778,62</b>	<b>828,35</b>

Fonte: Autor (2019).

Segundo FloripaSat (2018), os 6 painéis juntos geram aproximadamente um total de 3242 mWh. Comparando as células solares com os TEG's a partir da Tabela 8 observa-se que na condição máxima é possível um acréscimo de energia de 26%, 828,35 mWh, o que corresponde a um total de 4070 mWh. Utilizando uma carga externa de 5  $\Omega$  o acréscimo chega-se a 25 %, 819,05 mWh, totalizando 4061 mWh. Operando com carga externa de 10  $\Omega$  verifica-se 24 %, 778,62 mWh, o que significa em conjunto 4020 mWh, e funcionando com 1  $\Omega$  resulta em 12 %, 401,49 mWh, que equivale a 3643,5 mWh de energia gerada pelos dois dispositivos.

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os resultados experimentais e teóricos de três tipos de geradores termoelétricos. Uma bancada experimental foi desenvolvida e diferentes condições de testes foram executadas. Foram desenvolvidos cinco modelos analíticos para a determinação de parâmetros como tensão, potência elétrica gerada e rendimento, modelos 1 e 4, para diferentes gradientes térmicos na célula 1. Foram apresentadas quatro condutividades térmicas, sendo duas propostas pelo autor, CTE e equivalente com efeito Thomson, a de Baranowski; Snyder; Toberer, (2013) aplicada a um dispositivo e a com inserção de um fator de ajuste na última condutividade térmica citada. As taxas de transferências de calor foram avaliadas em todos os modelos propostos em relação a órbita do satélite na célula 1. O modelo 4, relacionou  $zT$  com  $ZT$ , e possibilitou um caminho para determinação do número de pares de um dispositivo representado pelo modelo 5.

As principais contribuições deste trabalho são apresentadas a seguir.

- Avaliando o modelo 1, foi observado que o tempo de 4716 s é o instante em que as propriedades atingem os valores de máximo na órbita avaliada na face 1. No modelo 1 em referência ao instante citado, as tensões em circuito aberto para o modelo ideal atingiram um máximo de -3,79 V e não ideal -3,67 V. O valor experimental medido neste instante foi de -3,91 V o que representa um erro máximo de 3% em relação ao ideal e 6% para a análise com perdas. Para as tensões de saída nesse mesmo instante a variação máxima entre a tensão de saída experimental e a tensão de saída ideal teórica chega a um ponto de máximo de 0,13 V em módulo, a variação de tensão experimental em relação a tensão de saída com perdas atinge um máximo de 0,24 V em módulo. Essas variações são exatamente as mesmas analisando as tensões em circuito aberto e logo possuem o mesmo percentual de erro. Os maiores valores da potência de saída experimental chegaram a 0,57 W seguido pela potência de saída ideal máxima que fica em torno de 0,54 W e por último a potência de saída considerando as perdas com 0,50 W.
- Nas proximidades do instante de 4716 s ocorre a diferença máxima entre a potência experimental e a potência ideal

chegando a 0,04 W. Entre 4615 e 4768,4 s aconteceram as maiores variações entre as potências de saída experimentais e não ideais com valor estimado em cerca de 0,07 W. Verifica-se que o modelo 1 ideal fica mais próximo do modelo experimental. As potências experimental, ideal e não ideal forneceram um valor de 0,16; 0,16 e 0,15 W representando um erro de 1% entre avaliação sem perdas e 9% com perdas ambas em referências aos valores experimentais. O valor de 9% aparenta ser expressivo, porém representa aproximadamente uma diferença de 0,01 W o que é relativamente aceitável quando comparado aos valores de potência gerada. Destaca-se que em relação a análise do modelo 1 ideal, são poucos os pontos que possuem erros acima de 5% durante toda a curva, os maiores erros ocorrem quando a variação de temperatura tende a zero e logo os valores de potência e tensão máxima superam 5%. O modelo não ideal apresenta erros que superaram mais pontos acima de 5% que em relação a análise sem perdas deixando a última como melhor opção.

- No modelo 1, investigando os maiores valores das potências máximas durante a órbita encontram-se 0,78 W experimental, 0,74 W para o modelo 1 ideal e 0,69 W para a não ideal.
- A taxa de transferência de calor máxima foi de 29,17 W para o modelo 1 na análise ideal com um erro máximo de 5%. Na avaliação não ideal 28,73 W com 7,8 % de erro. O maior rendimento ideal foi de 2,17%, com perdas 2,08% e o máximo possível 2,36%. Em todas as análises do modelo 1, a avaliação ideal sem efeitos Thomson, foi a que mais se aproximou dos resultados experimentais.
- Os resultados do modelo 1 realizados nos geradores termoelétricos TGPR-5V-40S e 10W-4V-40S submetidos a temperaturas abaixo de zero graus constam nas Tabela 12 e Tabela 13. Os valores experimentais em ambos os geradores se distanciaram dos teóricos conforme o aumento de temperatura na face quente. O primeiro TEG de 5W se comporta conforme o modelo não ideal para baixas temperaturas na face fria como 260 e 273 K. Para temperaturas acima de 283 K mantidas na face fria o modelo ideal é o que mais se aproxima. Para o TEG de 10 W as respostas ficaram bem abaixo do modelo não ideal que possui os menores valores. Avaliando ambos os modelos se observa que os materiais dentro desses geradores possuem propriedades

inferiores aos materiais escolhidos por Poudel *et al* (2008) e Yan *et al.* (2010) que possuem propriedades termoelétricas superiores a dos materiais dos TEG's. Assim, nessas análises o valor de tensão máxima atingido foi aproximadamente 1,5 V, isso representa um indicativo que até para baixas temperaturas e, portanto, no vácuo os geradores termoelétricos são uma alternativa favorável.

- O modelo 3 de Baranowski; Snyder; Toberer, (2013) foi aplicado ao dispositivo como um todo. Mostrou uma condutividade térmica efetiva,  $k_s$ , de um par termoelétrico com um aumento entre 5 a 11% em relação a um par termoelétrico de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  e ficou entre 19 a 23% abaixo da condutividade térmica experimental. Com a inserção do fator de ajuste “c” a condutividade térmica modificada,  $k_{sm}$ , teve um aumento de 30 a 39% em relação ao  $k$  de um par de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  e ficou muito próxima de  $k_{exp}$ , atingindo um erro máximo de 5% em relação a  $k_{exp}$ . A taxa de transferência de calor experimental máxima foi de 29,67 W, a taxa máxima de  $\dot{Q}_s$ , 24,26 W, e  $\dot{Q}_{sm}$  29,26 W. Os erros máximos de  $\dot{Q}_s$  em relação a  $\dot{Q}_{exp}$  foram respectivamente de 18 a 22% e  $\dot{Q}_{sm}$  não superou 5,4% em relação a taxa de transferência de calor experimental. O modelo de condutividade térmica efetiva sugerida com a inserção de uma constante “c” de valor igual a 1,235 tornou-se uma excelente opção mostrando-se a segunda condutividade térmica efetiva que apresentou os resultados mais próximos de transferência de calor.
- O desenvolvimento de uma proposta de condutividade térmica equivalente utilizando os efeitos Thomson nas condutividades térmicas dos elementos  $p$  e  $n$  resultaram em um aumento de 3 a 15 % em relação aos dados de condutividade térmica fornecidos pelo fabricante. Percebe-se que no modelo 3 com uma variação de temperatura máxima de 35,84 K entre as faces, o que representa uma diferença relativamente baixa, provocou uma alteração expressiva na condutividade térmica equivalente. Constatou-se que as transferências de calor resultaram em valores suavemente acima dos valores experimentais estimados, em média acima de 2% atingindo picos de aproximadamente 4%,

tanto a absorção de calor como a rejeição de calor foram maiores em referência as medições experimentais.

- O modelo de condutividade térmica efetiva, CTE, foi o método mais completo deste trabalho. Através dele foi possível obter todas as propriedades do modelo 1, uma relação adicional entre  $zT$  e  $ZT$ , e uma metodologia para obtenção do número de pares, modelo 5. A  $k_{ef}$  foi a que mais se aproximou de  $k_{exp}$ , atingindo um erro máximo de 5%. A condutividade térmica efetiva incluiu os efeitos Seebeck/Peltier, Joule a condução de Fourier e por isso ficou um valor 35% acima de  $k$  de um par do  $Bi_2Te_3$  que era o esperado. Neste trabalho para o mesmo dispositivo é possível relacionar a condutividade térmica efetiva do lado quente como  $k_{ef_h} \approx 1,35k$ . A partir das CTEs do lado quente e frio foram determinadas e validadas  $V_{max}$ ,  $V$ ,  $P$  e  $P_{max}$ . A tensão em circuito aberto experimental registrou no início da jornada espacial 1,75 V, a tensão efetiva em circuito aberto com  $R_A$  mostrou -1,978 V, a com  $R_B$  -1,75 V e com  $R_C$  -1,79 V. Os pontos de máximo em relação as tensões citadas anteriormente são: -3,91; -4,32; 3,79 e 3,89 V. A curva que mais se aproximou foi a que utilizava a resistência  $R_B$ . Uma notável comparação decorre que o modelo de condutividade térmica efetiva, utilizando  $R_B$ , confere integralmente com o modelo ideal (modelo 1) gerando erros próximos a 0%. O valor inicial da tensão experimental de saída foi cerca de -1,19V. As tensões provenientes de modelo de condutividade térmica efetiva considerando as resistências elétrica A, B e C apontaram para -1,23 V, 1,18 V e -1,19 V. O valor máximo experimental gerado de -2,63 V e os considerando as resistências de A à C -2,64; -2,55 e -2,57 V. Dessa vez o valor máximo ficou mais próximo na sequência de  $R_A$ ,  $R_B$  e  $R_C$ . Os menores erros também aconteceram no sentido de  $R_A$  para  $R_C$  quando se avalia a curva como um todo. No ponto de valor máximo, quando  $t = 4716$  s e  $\Delta T = -35,84$  K, os erros nessa mesma ordem de resistências atingem respectivamente 1%, 3% e 2%. Os valores iniciais de potência de saída experimental, e os

considerando as resistências de A até C são respectivamente 0,15;0,14 e 0,14 W. Na mesma ordem de referência as potências de saída máxima que aconteceram no tempo de 4716 s, tendo uma variação de temperatura de 35,84 K (a máxima em módulo) foram 0,69;0,70;0,65 e 0,66 W. A curva que mais se aproximou foi a com a primeira resistência chegando a um erro de 1 %, seguida da segunda resistência com um erro de 6 % e por fim a última registrando um erro de 5 % nesse ponto. Em todos os casos em relação a curva experimental ocorreu uma estreita proximidade. Os valores iniciais de todas as quatro potências máximas investigadas, experimental e com relação as três resistências, convergiram para 0,16 W. Os resultados extremos aconteceram no tempo supracitado de 4716 s e atingiram ápices de 0,78 W experimental e 0,74 W teórico para as três resistências. As avaliações utilizando a metodologia de Snyder, Snyder (2017) associada a uma regressão numérica para 260 K permitiram uma visão sobre as propriedades  $s$ ,  $u$ ,  $zT$ ,  $ZT$ ,  $\Phi$  a baixas temperaturas. O erro entre os números de méritos do material e do dispositivo avaliado pela CTE ficaram em média em torno de 5%. Em pontos isolados variaram de 1 a 17%, mas mantendo as proximidades de 5% durante a órbita da face 1. O  $ZT$  utilizando teoria clássica foi coincidente com  $zT$  e ambos ficaram suavemente acima dos valores experimentais não ultrapassando 7% de erro. Os rendimentos por condutividade térmica efetiva e ideal apresentaram os mesmos resultados e atingiram o mesmo máximo de 2,17%. Eles ficaram mais próximos dos valores experimentais em relação aos demais modelos.

- Desenvolvimento do modelo de condutividade térmica efetiva sugerido neste trabalho conjuntamente com o modelo ideal trouxeram os resultados mais próximos dos experimentais. A condutividade térmica efetiva tem a vantagem de ser simples, prática, consistente e aplicável a todos os principais parâmetros como tensão, corrente e potência elétrica, transferência de calor,

rendimento,  $zT$  e  $ZT$  e suas relações. Portanto, modelo 4 se adaptou aos dados do nanossatélite.

- A metodologia desenvolvida pelo modelo 5 permitiu prever analiticamente o número de pares de um gerador termoelétrico a partir de dados do material termoelétrico e possibilitou experimentalmente medir esses valores através de dados de tensão elétrica, variação de temperatura e dados do fabricante. As medidas de tensão elétrica como temperatura são mais fáceis de se obter do que em relação a corrente e potência elétrica. Esse método também ofereceu a estimativa do número de pares de TEG's conectados em circuito fechados, o equacionamento utiliza tensão de saída e favorece em processos que não podem ser interrompidos.

Conclui-se que a implementação de geradores termoelétricos de modo geral é viável, pois consiste em uma alternativa para o aumento da eficiência e confiabilidade com a vantagem adicional de não dependerem da natureza do calor consumível, e ainda promoverem geração de energia contínua durante a órbita. Nesse caso é uma excelente opção na operação em conjunto com um painel solar conforme foi demonstrado na Subseção 6.5.2 onde ficou demonstrado um possível de acréscimo de 26% de energia em relação a produzida pela célula solar. Sua aplicação na Terra pode ser útil na absorção de calor residual tornando-se fontes de energias alternativas, renováveis e com mínimo ou nenhum efeito nocivo ao ambiente. Mesmo operando a temperaturas abaixo de zero graus produziram energia útil. Os resultados experimentais e os modelos propostos demonstraram que para temperaturas abaixo de 360 K com variações máximas de 35,84 K os efeitos Thomson são muito pequenos, em muitos casos desprezíveis. Isso se confirma pela maior aproximação dos valores experimentais com modelos ideais que são os que não adotam as influências desses efeitos. No futuro com o desenvolvimento sucessivo dos materiais termoelétricos o número de mérito e fator de compatibilidade serão mais elevados, assim os TEG's produzirão potências maiores servindo como dispositivos que funcionam em conjunto ou de forma híbrida com painéis solares e até mesmo de forma

independente. Sem dúvidas esse é o primeiro passo, pois conforme o aumento da eficiência dos geradores mais favorável ainda será a sua aplicação não somente no espaço, mas na indústria, em ambientes remotos, no dia a dia das pessoas, enfim nas mais diversificadas atividades terrestres.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para os próximos trabalhos a escolha de geradores termoelétricos com materiais que possibilitem uma eficiência termoelétrica maior, isto é, um material com propriedades termoelétricas superiores ao Telureto de Bismuto. Os compostos por óxidos ( $\text{SrTiO}_3$ ) e ligas Half-Heusler ( $\text{NbFeSb}$ ,  $\text{NbCoSn}$ ) são opções promissoras para o futuro. No presente, os materiais a base de Telureto de chumbo ( $\text{PbTe}$ ) possibilitam maiores gerações de energia devido a possuírem  $zT$  superiores ao  $\text{Bi}_2\text{Te}$  que tem número de mérito em torno de 1,1. Heremans *et al.* (2008) demonstraram uma liga de  $\text{PbTe}$  com adição de tálio com  $zT$  de 1,5. Pei *et al.* (2011) utilizando  $\text{PbTe}$  e incluindo sódio relataram um  $zT$  de 1,8. Em 2012 Biswas *et al.* (2012) desenvolveram um novo material a base de Telureto de chumbo alcançando um número de mérito de 2,2 que é o mais alto encontrado até o momento.

Indica-se no modelo 3, avaliações envolvendo faixas de temperaturas maiores como por exemplo a partir de 400 K onde os efeitos Thomson são mais intensos.

A realização de testes reais com o CubeSat em órbita para acompanhamento e validação dos modelos serão grandes avanços para os novos trabalhos.

Melhorias nos modelos e a utilização do CTE aplicada a TEC's.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AUDIFFRED, Diego Bonkowski de La Sierra. **Utilização de dispositivos termoeétricos para geração de energia elétrica em nanosatélites**.2015. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- BARANOWSKI, Lauryn L.; SNYDER, G. Jeffrey; TOBERER, Eric S.. Effective thermal conductivity in thermoelectric materials. **Journal Of Applied Physics**, [s.l.], v. 113, n. 20, p.204904-20490410, 28 maio 2013. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4807314>.
- BECKER, Mayara Pereira. **Automatização de um sistema caracterizador de dispositivos termoeétricos**. 2016. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- BISWAS, Kanishka et al. High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures. **Nature**, [s.l.], v. 489, n. 7416, p.414-418, set. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11439>.
- BJØRK, R. et al. Analysis of the internal heat losses in a thermoelectric generator. **International Journal Of Thermal Sciences**, [s.l.], v. 85, p. 12-20, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.003>.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. Porto Alegre: Mcgraw-hill, 2012. 906 p. CHAMPIER, Daniel. Thermoelectric generators: A review of applications. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 140, p.167-181, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>.
- CORPORATION, Accuratus Ceramic. **Aluminum Oxide: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Properties**. 2013. Disponível em: <<https://accuratus.com/alumox.html>>. Acesso em: 18 out. 2018.
- CRONIN B. VINING, 2008, New York. **The Limited Role for Thermoelectrics in the Climate Crisis**. New York: Solution Summit, 2008. 10 p. Disponível em:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=C205E818812ED42D5154BC6970E1DBAB?doi=10.1.1>>. Acesso em: 03 maio 2018.

DALOLA, S. et al. Characterization of Thermoelectric Modules for Powering Autonomous Sensors. **Ieee Transactions On Instrumentation And Measurement**, [s.l.], v. 58, n. 1, p.99-107, jan. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tim.2008.928405>.

EIBL, Oliver et al (Ed.). **Thermoelectric Bi2Te3 Nanomaterials**. Weinheim: Wiley-vch, 2015. 314 p.

EUA. Jeff Snyder. Mse Department At Northwestern University (Org.). **Thermoelectrics**: Northwestern Materials Science and Engineering. 2018. Disponível em: <<http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/engineering.html>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

EVERREDTRONICS LTD (China). **EVERREDtronics**. 2018. Disponível em: <[http://www.everredtronics.com/thermoelectric\\_materials.html](http://www.everredtronics.com/thermoelectric_materials.html)>. Acesso em: 15 jan. 2018.

FLORIPASAT. **FloripaSat Technical Description**. Disponível em: <<https://www.gitbook.com/book/tuliogomesp/FloripaSat-technical-manual/details>>. Acesso em: 12 out. 2018.

FRIED, e. **Thermal conduction contribution to heat transfer at contacts**: Thermal Conductivity. London: R.p. Tye, 1969. (Academic Press).

G. JEFFREY SNYDER (Evanston). Northwestern University. **Brief History of Thermoelectrics**. Disponível em: <<http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

GMBH, Eurockot Launch Services. **EUROCKOT Successfully Launches MOM**: Rockot hits different Orbits. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20100303013451/http://www.eurockot.com/alist.asp?cnt=20040706&main=5>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

GOLDSMID, H. Julian. **Introduction to Thermoelectricity**. New South Wales: Springer, 2009. 242 p.

GOUPIL, Christophe (Ed.). **Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements**. Weinheim: Wiley-vch, 2015. 360 p.

GOUPIL, Christophe et al. Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications. **Entropy**, [s.l.], v. 13, n. 8, p.1481-1517, 15 ago. 2011. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/e13081481>.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, J.earl. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.

HE, Jiaqing; KANATZIDIS, Mercuri G.; DRAVID, Vinayak P.. High performance bulk thermoelectrics via a panoscopic approach. **Materials Today**, [s.l.], v. 16, n. 5, p.166-176, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2013.05.004>.

HELVAJIAN, Henry; JANSON, Siegfried W.. **Small Satellites: Past, Present, and Future**. El Segundo: Aerospace Press, 2008. 876 p.

HEREMANS, J. P. et al. Enhancement of Thermoelectric Efficiency in PbTe by Distortion of the Electronic Density of States. **Science**, [s.l.], v. 321, n. 5888, p.554-557, 25 jul. 2008. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1159725>.

HOLLANDS, K. G. T. et al. Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers. **Journal Of Heat Transfer**, [s.l.], v. 98, n. 2, p. 189-193, 1976. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3450517>.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 643 p.

IOFFE, A. F. et al. Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling. **Physics Today**, [s.l.], v. 12, n. 5, p.42-42, maio 1959. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3060810>.

ISMAIL, Basel; AHMED, Wael. Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology. **Recent Patents On Electrical Engineering**, [s.l.], v. 2, n. 1, p.27-39, 1 jan. 2009. Bentham Science Publishers Ltd.  
<http://dx.doi.org/10.2174/1874476110902010027>.

JACQUES, Lionel. **Thermal Design of the Oufiti-1 nanosatellite**. 2009.142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Aerospace Engineering, University Of Liège, Liège, 2009. Disponível em:  
<[http://www.leodium.ulg.ac.be/cmsms/uploads/08-09\\_Jacques.pdf](http://www.leodium.ulg.ac.be/cmsms/uploads/08-09_Jacques.pdf)>.  
Acesso em: 02 mar. 2018.

KARDITSAS, Panayiotis J; BAPTISTE, Marc-jean (Comp.). **Thermal and Structural Properties of Fusion related Materials**. 1995.  
Disponível em:  
<<http://www.ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/al2o3.html>>. Acesso em: 04 maio 2018.

KAUSHIK, S.c.; MANIKANDAN, S.. The influence of Thomson effect in the energy and exergy efficiency of an annular thermoelectric generator. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 103, p.200-207, out. 2015. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.037>.

LAMBA, Ravita; KAUSHIK, S.c.. Thermodynamic analysis of thermoelectric generator including influence of Thomson effect and leg geometry configuration. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 144, p.388-398, jul. 2017. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.069>.

LAN, Song et al. A dynamic model for thermoelectric generator applied to vehicle waste heat recovery. **Applied Energy**, [s.l.], v. 210, p.327-338, jan. 2018. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.004>.

LANDAU, L.d.; LIFSHITZ, E.m.. STEADY CURRENT. **Electrodynamics Of Continuous Media**, [s.l.], p.86-104, 1984. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-030275-1.50009-6>.

LEE, Hosung. **Thermoelectrics: Design and Materials**. Chichester: Wiley, 2016. 431 p.

LI, Jing-feng et al. High-performance nanostructured thermoelectric materials. **Npg Asia Materials**, [s.l.], v. 2, n. 4, p.152-158, out. 2010. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/asiamat.2010.138>.

LINEYKIN, Simon; BEN-YAAKOV, Shmuel. Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules. **Ieee Transactions On Industry Applications**, [s.l.], v. 43, n. 2, p.505-512, 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tia.2006.889813>.

MACIÁ-BARBER, Enrique. **Thermoelectric Materials: Advances and Applications**. Boca Ranton: Crc Press, 2015. 364 p.

MATERIALS, Azo. **Alumina - Aluminium Oxide - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: A Refractory Ceramic Oxide**. 2001. Disponível em: <<https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52>>. Acesso em: 18 out. 2018.

MELCOR. **Thermoelectric Handbook: The Standard in Thermoelectrics**. 2006. Disponível em: <[http://www.hansfuchs.org/PSS\\_VLE/CHAPTER\\_03/CASES/Materials/Melcor\\_TE\\_Handbook.pdf](http://www.hansfuchs.org/PSS_VLE/CHAPTER_03/CASES/Materials/Melcor_TE_Handbook.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2018.

MELLO, Hilton Andrade de; INTRATOR, Edmond. **Dispositivos Semicondutores**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1980. 298 p. Disponível em: <<http://www.hamello.com/PDF/DispositivosSemicondutorescompletoRedSize.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

MORELLI, Donald T.. **Thermoelectric Devices**. New York: Wiley-vch, 1997. 339 p. 21 v.

MORREL, R. **Handbook of propertis of technical & engineering ceramics**. London: Her Majesty's Stationery Office, 1985. 255 p.

MORSCH FILHO, Edemar et al. Numerical investigation of orbital inclination influence on thermal control of a nanosatellite in LEO. In: **PROCEEDINGS OF THE 2ND IAA LATIN AMERICAN CUBESAT WORKSHOP.**, 2., 2017, Florianópolis. **IAA-LACW 2016**. Florianópolis: International Academy Of Astronautics, 2017. v. 2, p. 1 - 765.

MORSCH FILHO, Edegar. **Simulação Numérica da Transferência de Calor em um Nanosatélite**. 2015. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Centro de Engenharia da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/133864>>. Acesso em: 01 set. 2018.

ONSAGER, Lars. Reciprocal Relations in Irreversible Processes. I. **Physical Review**, [s.l.], v. 37, n. 4, p.405-426, 15 fev. 1931. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrev.37.405>.

OSTRUFKA, André Luiz Alcantara. **Avaliação experimental do posicionamento de um gerador termoeétrico em CubeSats**. 2017. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

PEI, Yanzhong et al. High thermoelectric figure of merit in heavy hole dominated PbTe. **Energy & Environmental Science**, [s.l.], v. 4, n. 6, p.2085-2089, 2011. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c0ee00456a>.

POUDEL, B. et al. High-Thermoelectric Performance of Nanostructured Bismuth Antimony Telluride Bulk Alloys. **Science**, [s.l.], v. 320, n. 5876, p.634-638, 2 maio 2008. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1156446>.

ROSA, Aldo Vieira da. **Fundamentals of Renewable Energy Processes**. Amsterdam: Elsevier, 2005.

ROSA, Aldo Vieira da. **Processos de Energias Renováveis**: Tradução da Terceira Edição. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ROWE, David M. et al (Ed.). **CRC Handbook of Thermoelectrics**. Boca Raton: Crc, 1995. 701 p.

RULL-BRAVO, M. et al. Skutterudites as thermoelectric materials: revisited. **Rsc Advances**, [s.l.], v. 5, n. 52, p.41653-41667, 2015. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c5ra03942h>.

SEARS, Francis Weston et al. **Física: Eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo: Pearson Addison-wesley, 2009. SEMENYUK, V et al. Novel high performance thermoelectric microcollers with diamond substrates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMOELECTRICS, 16., 1997, Dresden. **Novel high performance thermoelectric microcollers with diamond substrates**. Piscataway: Ieee, 1997. p. 683 - 686.

SEMENYUK, V.. Heat Sinks for Miniature Thermoelectric Coolers: Selection and Characterization. **Journal Of Electronic Materials**, [s.l.], v. 43, n. 6, p.2452-2458, 1 maio 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-014-3157-7>.

SHERMAN, B.; HEIKES, R. R.; URE, R. W.. Calculation of Efficiency of Thermoelectric Devices. **Journal Of Applied Physics**, [s.l.], v. 31, n. 1, p.1-16, jan. 1960. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1735380>.

SHINOHARA, Yoshikazu. Recent progress of thermoelectric devices or modules in Japan. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 4, n. 12, p.12333-12342, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.001>.

SHOEMAKE, G.e.; RAYNE, J.a.; URE, R.w.. Specific heat of n-type Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> from 1.3 to 90 °K. **Physics Letters A**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.45-46, maio 1968. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601\(68\)91328-5](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601(68)91328-5).

SNYDER, G. Jeffrey. Application of the compatibility factor to the design of segmented and cascaded thermoelectric generators. **Applied Physics Letters**, [s.l.], v. 84, n. 13, p.2436-2438, 29 mar. 2004. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1689396>.

SNYDER, G. Jeffrey; CAILLAT, T.. Using the Compatibility Factor to Design High Efficiency Segmented Thermoelectric Generators. **Mrs Proceedings**, [s.l.], v. 793, p.37-42, jan. 2003. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1557/proc-793-s2.1>.

SNYDER, G. Jeffrey; SNYDER, Alemayouh H.. Figure of merit ZT of a thermoelectric device defined from materials properties. **Energy & Environmental Science**, [s.l.], v. 10, n. 11, p.2280-2283, 2017. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c7ee02007d>.

SNYDER, G. Jeffrey; TOBERER, Eric S.. Complex thermoelectric materials. **Nature Materials**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.105-114, fev. 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat2090>.

SNYDER, G. Jeffrey; URSELL, Tristan S.. Thermoelectric Efficiency and Compatibility. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 91, n. 14, p.1-4, 2 out. 2003. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.91.148301>.

TEGMART. **TEG Modules**. Disponível em: <<https://www.tegmart.com/thermoelectric-modules/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

THERMOELECTRIC APPLICATIONS WORKSHOP, 3., 2012, Oludeniz. **Thermoelectric generator performance for passenger vehicles**. Irwnidale: Amerigon, 2012. 28 p. Disponível em: <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/fl0/crane\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/fl0/crane_0.pdf)>. Acesso em: 22 out. 2018.

THERMOELECTRICS APPLICATIONS WORKSHOP, 2., 2011, San Diego. **Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive Waste Heat at GM**. São Diego: General Motors Global Research & Development, 2011. 37 p. Disponível em: <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/fl3/meisner\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/fl3/meisner_0.pdf)>. Acesso em: 23 out. 2018.

TRITT, Terry M. (Ed.). **Thermal Conductivity: Theory, Properties and Applications**. Nova York: Springer Science & Business Media, 2006. 290 p.

URSELL, T.s.; SNYDER, G.j.. Compatibility of segmented thermoelectric generators. **Twenty-first International Conference On Thermoelectrics, 2002. Proceedings Ict '02.**, [s.l.], p.412-417, 2002. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ict.2002.1190349>.

VON LUKOWICZ, Marian et al. Thermoelectric Generators on Satellites—An Approach for Waste Heat Recovery in Space. **Energies**, [s.l.], v. 9, n. 7, p.1-14, 14 jul. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en9070541>.

WANG, S.; SNYDER, G.j.; CAILLAT, T.. Thermoelectric properties of Nb/sub 3/Sb/sub x/Te/sub 7-x/ compounds. **Twenty-first International Conference On Thermoelectrics, 2002. Proceedings Ict '02.**, [s.l.], p.5-350, 2004. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ict.2002.1190292>.

WILLIAMS, Matt. Mars compared to Earth. 2015. Disponível em: <<https://phys.org/news/2015-12-mars-earth.html>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

XIE, Zhipeng et al. Mechanical and thermal properties of 99% and 92% alumina at cryogenic temperatures. **Ceramics International**, [s.l.], v. 37, n. 7, p.2165-2168, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.03.066>.

YAN, Xiao et al. Experimental Studies on Anisotropic Thermoelectric Properties and Structures of n-Type Bi<sub>2</sub>Te<sub>2.7</sub>Se<sub>0.3</sub>. **Nano Letters**, [s.l.], v. 10, n. 9, p.3373-3378, 8 set. 2010. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/nl101156v>.

ZHAO, Li-dong; DRAVID, Vinayak P.; KANATZIDIS, Mercouri G.. The panoramic approach to high performance thermoelectrics. **Energy Environ. Sci.**, [s.l.], v. 7, n. 1, p.251-268, 2014. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c3ee43099e>.

## APÊNDICE A – FENÔMENOS ELÉTRICOS

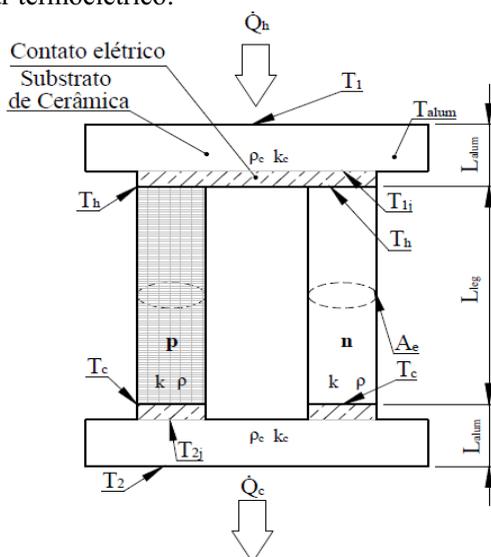
### A.1 RESISTÊNCIA ELÉTRICA E DE CONTATOS ELÉTRICOS

A resistência elétrica interna dos elementos que compõe o módulo termoeétrico segundo Lee (2016) seguem nas equações (205) e (206) que mostram as contribuições da resistência elétrica do material mais a resistência contato elétrico,  $R_c$ .

$$R_m = R + R_c'' \quad (205)$$

$$R_m = \left( \frac{\rho l_{leg}}{A_e} + \frac{\rho''}{A_e} \right) \quad (206)$$

Figura 90 - Par termoeétrico.



Fonte: Autor (2019).

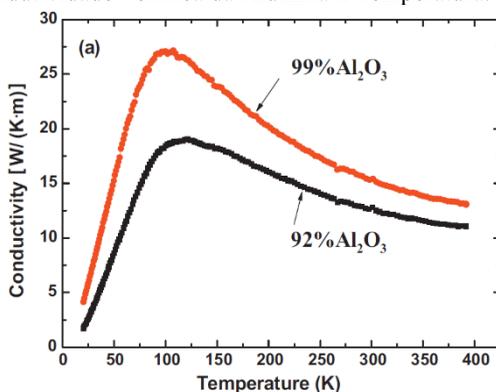
Onde  $A_e$  se refere a área efetiva, a área da seção transversal da haste do semicondutor  $p$  ou  $n$ , local onde ocorrem a absorção e rejeição de calor, respectivamente na face quente e fria. O termo  $\rho''$  representa a resistividade elétrica de contato na “junta” entre o contato elétrico e a cerâmica, tudo isso pode ser visto na Figura 90.

## APÊNDICE B – FENÔMENOS TÉRMICOS

### B.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO $\text{Al}_2\text{O}_3$

A condutividade térmica do Substrato de Cerâmica,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , também chamada de Alumina é um dos materiais de uso frequente em TEG's e TEC's. O valor dessa propriedade térmica é muito importante para atender diversas finalizadas, Xie *et al.* (2011) conforme Figura 91 mostra o comportamento do material desde as temperaturas mais baixas aproximadamente 25 K até 400 K para dois materiais, um possuindo 99% e outro 92% de Alumina.

Figura 91 - Condutividade Térmica da Alumina x Temperatura.



Fonte: Xie *et al.* (2011).

### B.2 CORRELAÇÕES TÉRMICAS

Retiradas de Incropera *et al.* (2008) respectivamente a viscosidade cinemática e número de Prandtl em função da temperatura.

$$\nu = -6,67 \times 10^{-18} \cdot T^5 + 1,27 \times 10^{-14} \cdot T^4 - 9,54 \times 10^{-12} \cdot T^3 + 3,66 \times 10^{-9} \cdot T^2 - 6,21 \times 10^{-7} \cdot T + 4,41 \times 10^{-5} \quad (207)$$

$$Pr = -8,27 \times 10^{-13} \cdot T^5 + 1,57 \times 10^{-9} \cdot T^4 - 1,17 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 4,31 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 7,84 \times 10^{-2} \cdot T + 6,36 \quad (208)$$

## APÊNDICE C – FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS

### C.1 PRINCIPAIS PROPRIEDADES

As principais propriedades termoelétricas do Telureto de Bismuto em função da temperatura são demonstradas a seguir. Expressões obtidas respectivamente dos gráficos das Figura 8 e Figura 9 na faixa de 300 K descrevem o comportamento do coeficiente de Seebeck, resistividade térmica e condutividade térmica para elementos do tipo **p** e **n**. Para os elementos do tipo **p** seguem as equações (209), (210) e (211)

$$\alpha_p = 1,21 \cdot 10^{-12} T^6 - 29,77 \cdot 10^{-8} T^5 + 3,02 \cdot 10^{-6} T^4 - 0,001617 T^3 + 0,481 T^2 - 74,71 T + 4873 \quad (209)$$

$$\rho_p = 3 \cdot 10^{-14} T^6 - 9 \cdot 10^{-11} T^5 + 9 \cdot 10^{-8} T^4 - 5 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0148 T^2 - 2,39 T + 159,83 \quad (210)$$

$$k_p = -2,64 \cdot 10^{-15} T^6 + 6,96 \cdot 10^{-12} T^5 - 8,032 \cdot 10^{-9} T^4 + 5,1 \cdot 10^{-6} T^3 - 0,001844 T^2 + 0,3502 T - 25,84 \quad (211)$$

Para elementos do tipo **n** seguem as equações (212), (213) e (214):

$$\alpha_n = -3 \cdot 10^{-12} T^6 + 7 \cdot 10^{-9} T^5 - 7 \cdot 10^{-6} T^4 + 3,8 \cdot 10^{-3} T^3 - 1,16 T^2 + 185,74 T - 12395 \quad (212)$$

$$\rho_n = -2 \cdot 10^{-14} T^6 + 6 \cdot 10^{-11} T^5 - 6 \cdot 10^{-8} T^4 + 3 \cdot 10^{-5} T^3 - 0,0108 T^2 + 1,78 T - 121,14 \quad (213)$$

$$k_n = 1 \cdot 10^{-14} T^6 - 3 \cdot 10^{-11} T^5 + 3 \cdot 10^{-8} T^4 - 2 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,006 T^2 - 1,024 T + 72,50 \quad (214)$$

### C.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA (EIBL)

$$k = 7 \cdot 10^{-15} T^6 - 2 \cdot 10^{-11} T^5 + 1 \cdot 10^{-8} T^4 - 6 \cdot 10^{-6} T^3 + 0,0014 T^2 - 0,1872 T + 12,045 \quad (215)$$

## C.3 EXTRAPOLAÇÃO A PARTIR DE 260 K

$$\begin{aligned} \rho_{p_{ext}} = & -5,65 \cdot 10^{-15} T^6 + 1,54 \cdot T^{-11} T^5 - 1,70 \cdot 10^{-8} T^4 + \\ & + 9,87 \cdot 10^{-6} T^3 - 3,14 \cdot 10^{-3} T^2 + 0,523 T - 35,2 \end{aligned} \quad (216)$$

$$\begin{aligned} \rho_{n_{ext}} = & -2,23 \cdot 10^{-14} T^6 + 5,78 \cdot 10^{-11} T^5 - 6,1 \cdot 10^{-8} T^4 + \\ & + 34,67 \cdot 10^{-6} T^3 - 10,84 \cdot 10^{-3} T^2 + 1,79 T - 121,1 \end{aligned} \quad (217)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{p_{ext}} = & 1,21 \cdot 10^{-12} T^6 - 3,01 \cdot 10^{-9} T^5 + 3,10 \cdot 10^{-6} T^4 - \\ & - 0,001692 T^3 + 0,5134 T^2 - 81,65 T + 5456 \end{aligned} \quad (218)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{n_{ext}} = & -1,27 \cdot 10^{-12} T^6 + 2,97 \cdot 10^{-9} T^5 - 2,98 \cdot 10^{-6} T^4 - 18,76 T^3 - \\ & - 0,4875 T^2 + 78,22 T - 5339 \end{aligned} \quad (219)$$

$$\begin{aligned} k_{p_{ext}} = & 1,04 \cdot 10^{-14} T^6 - 2,6 \cdot 10^{-11} T^5 + 2,63 \cdot 10^{-8} T^4 - 13,77 \cdot 10^{-6} T^3 + \\ & + 39,34 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,5837 T + 36,43 \end{aligned} \quad (220)$$

$$\begin{aligned} k_{n_{ext}} = & 2,7 \cdot 10^{-15} T^6 - 8,36 \cdot 10^{-12} T^5 + 1,02 \cdot 10^{-8} T^4 - 6,32 \cdot 10^{-6} T^3 + \\ & + 2,12 \cdot 10^{-3} T^2 - 0,37 T + 27,34 \end{aligned} \quad (221)$$

$$\begin{aligned} \tau_{p_{ext}} = & 6 \times 10^{-12} \cdot T^5 - 12,47 \times 10^{-9} \cdot T^4 + 10,31 \times 10^{-6} \cdot T^3 - \\ & - 4,25 \times 10^{-3} \cdot T^2 + 8,74 \times 10^{-1} \cdot T - 70,56 \end{aligned} \quad (222)$$

$$\begin{aligned} \tau_{n_{ext}} = & -7,32 \times 10^{-12} \cdot T^5 + 14,85 \times 10^{-9} \cdot T^4 - 11,92 \times 10^{-6} \cdot T^3 + \\ & + 0,05 \cdot T^2 - 0,97 \cdot T + 78,22 \end{aligned} \quad (223)$$

## C.4 PROPRIEDADES DO TEG 241-1.0-1.2

Valores extrapoladas a partir de 260 K. Para elementos do tipo **p e n**:

$$\begin{aligned} \rho_{p_{ext}} = & 2,24 \times 10^{-15} T^6 - 3,019 \times 10^{-12} T^5 + 1,14 \times 10^{-9} T^4 \\ & + 2,21 \times 10^{-8} T^3 - 7,60 \times 10^{-5} T^2 + 1,20 \times 10^{-2} \cdot T \end{aligned} \quad (224)$$

$$\rho_{n_{ext}} = 2,19 \times 10^{-14} T^6 - 4,94 \times 10^{-11} T^5 + 4,61 \times 10^{-8} T^4 - 2,27 \times 10^{-5} T^3 + 6,27 \times 10^{-3} T^2 - 9,18 \times 10^{-1} T + 5,62 \times 10 \quad (225)$$

$$\alpha_{\rho_{ext}} = 1,80 \times 10^{-12} T^6 - 3,51 \times 10^{-9} T^5 + 2,72 \times 10^{-6} T^4 - 1,06 \times 10^{-3} T^3 + 2,19 \times 10^{-1} T^2 - 2,19 \times 10 T + 9,85 \times 10^2 \quad (226)$$

$$\alpha_{n_{ext}} = -1,85 \times 10^{-12} T^6 + 3,73 \times 10^{-9} T^5 - 3,01 \times 10^{-6} T^4 + 1,23 \times 10^{-3} T^3 - 2,68 \times 10^{-1} T^2 + 2,84 \times 10 T - 1,29 \times 10^3 \quad (227)$$

$$k_{\rho_{ext}} = 1,45 \times 10^{-14} T^6 - 2,86 \times 10^{-11} T^5 + 2,19 \times 10^{-8} T^4 - 8,12 \times 10^{-6} T^3 + 1,42 \times 10^{-3} T^2 - 8,63 \times 10^{-2} T \quad (228)$$

$$k_{n_{ext}} = -3,11 \times 10^{-15} T^6 + 8,75 \times 10^{-12} T^5 - 1,01 \times 10^{-8} T^4 + 6,21 \times 10^{-6} T^3 - 2,08 \times 10^{-3} T^2 + 3,57 \times 10^{-1} T - 2,27 \times 10 \quad (229)$$

$$\tau_{\rho_{ext}} = 9,17 \cdot 10^{-18} \cdot T^5 - 1,43 \cdot 10^{-14} \cdot T^4 + 8,29 \cdot 10^{-12} \cdot T^3 - 2,18 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 2,43 \cdot 10^{-7} \cdot T - 6,83 \cdot 10^{-6} \quad (230)$$

$$\tau_{n_{ext}} = -1,3 \cdot 10^{-17} \cdot T^5 + 2,24 \cdot 10^{-14} \cdot T^4 - 1,48 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 + 4,75 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 - 7,28 \cdot 10^{-7} \cdot T + 0,42 \times 10^{-4} \quad (231)$$

C.5 PROPRIEDADES DO  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  A PARTIR DE 260 KTabela 9 – Propriedades do  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  estimada a partir de 260 K para o tipo p.

p-Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>												
T	T	$\alpha$	$\rho$	k	zT	max ef red	s	u	ef red	$\Phi$	efficiency	ZT
(C)	(K)	( $\mu\text{V/K}$ )	( $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ )	(W/m K)			(1/V)	(1/V)		(V)		
-13	260	174,10	0,63	1,15	1,09	18,3%	9,87	2,89585	10,2%	0,391		
-8	265	175,10	0,65	1,14	1,09	18,2%	9,59	2,89984	10,4%	0,391	0,2%	0,43
-3	270	176,40	0,68	1,14	1,09	18,2%	9,37	2,90463	10,6%	0,392	0,3%	0,43
2	275	177,90	0,70	1,14	1,10	18,3%	9,18	2,91	10,8%	0,393	0,5%	0,44
7	280	179,60	0,72	1,13	1,11	18,5%	9,02	2,91598	11,1%	0,393	0,7%	0,44
12	285	181,30	0,74	1,13	1,13	18,7%	8,88	2,92212	11,4%	0,394	0,8%	0,44
17	290	183,20	0,76	1,12	1,15	18,9%	8,75	2,9289	11,6%	0,395	1,0%	0,45
22	295	185,10	0,78	1,12	1,17	19,1%	8,64	2,93584	11,9%	0,395	1,2%	0,46
25	298	186,2	0,79	1,14	1,15	18,9%	8,42	2,9400	12,0%	0,396	1,3%	0,46
27	300	187,0	0,79	1,11	1,19	19,3%	8,54	2,9425	12,2%	0,396	1,4%	0,47
32	305	188,9	0,81	1,11	1,21	19,6%	8,45	2,9486	12,5%	0,397	1,6%	0,48
37	310	190,8	0,83	1,10	1,23	19,8%	8,36	2,9549	12,8%	0,398	1,8%	0,50
42	315	192,7	0,85	1,09	1,26	20,1%	8,27	2,9613	13,1%	0,398	2,0%	0,51
47	320	194,6	0,87	1,08	1,28	20,3%	8,20	2,9678	13,3%	0,399	2,2%	0,53
52	325	196,4	0,89	1,08	1,30	20,6%	8,12	2,9742	13,6%	0,400	2,4%	0,54
57	330	198,1	0,91	1,07	1,33	20,8%	8,03	2,9804	13,9%	0,401	2,6%	0,55
62	335	199,8	0,94	1,06	1,35	21,0%	7,95	2,9867	14,2%	0,402	2,8%	0,57
67	340	201,4	0,96	1,05	1,37	21,2%	7,87	2,9929	14,5%	0,403	3,0%	0,58
72	345	202,9	0,98	1,04	1,39	21,4%	7,78	2,9989	14,7%	0,403	3,2%	0,59
77	350	204,4	1,01	1,04	1,40	21,6%	7,70	3,0050	15,0%	0,404	3,4%	0,60
82	355	205,7	1,03	1,03	1,42	21,7%	7,61	3,0105	15,2%	0,405	3,6%	0,61
87	360	207,0	1,05	1,02	1,43	21,9%	7,51	3,0162	15,5%	0,406	3,8%	0,62

Fonte: Autor (2019).

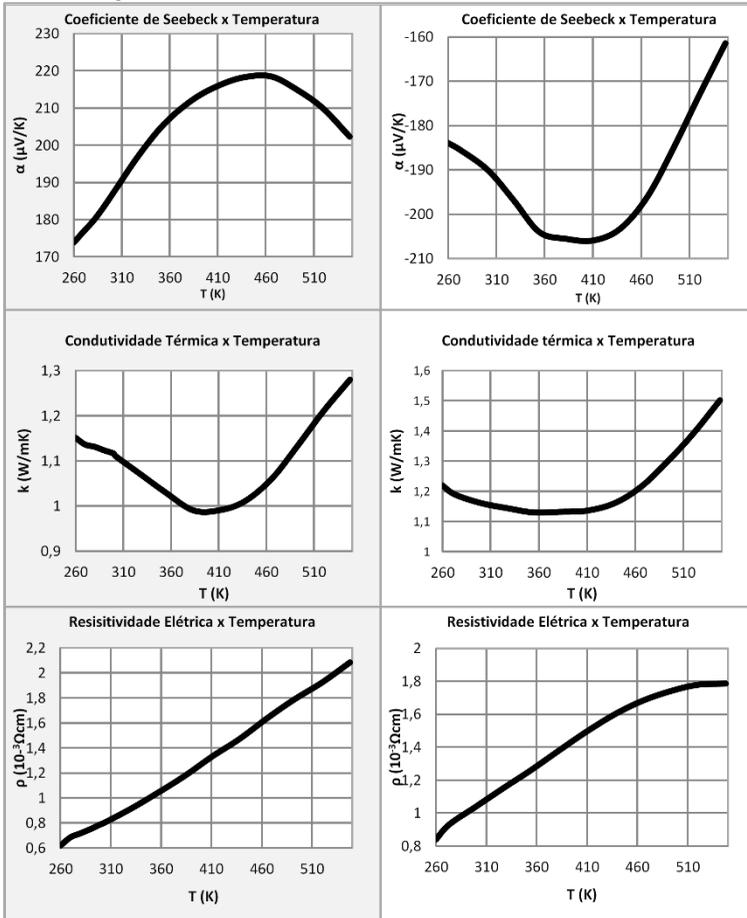
Tabela 10 - Propriedades do  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  estimada a partir de 260 K para o tipo n

n-Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>												
T	T	$\alpha$	$\rho$	k	zT	max ef red	s	u	ef red	$\Phi$	efficiency	ZT
(C)	(K)	( $\mu\text{V/K}$ )	( $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ )	(W/m K)			(1/V)	(1/V)		(V)		
-13	260	-184,2	0,84	1,22	0,86	15,4%	-7,59	-1,9976	7,8%	-0,549		
-8	265	-184,3	0,88	1,21	0,85	15,3%	-7,38	-1,9985	7,9%	-0,549	0,1%	0,31
-3	270	-184,6	0,91	1,20	0,85	15,2%	-7,20	-1,9997	8,0%	-0,550	0,3%	0,32
2	275	-185,1	0,94	1,19	0,85	15,2%	-7,06	-2,0011	8,1%	-0,551	0,4%	0,32
7	280	-185,9	0,96	1,18	0,85	15,3%	-6,94	-2,0029	8,3%	-0,551	0,5%	0,32
12	285	-186,8	0,98	1,17	0,86	15,4%	-6,84	-2,0048	8,4%	-0,552	0,6%	0,32
17	290	-187,9	1,01	1,17	0,87	15,5%	-6,75	-2,007	8,6%	-0,553	0,8%	0,33
22	295	-189,0	1,03	1,16	0,88	15,7%	-6,67	-2,0093	8,8%	-0,553	0,9%	0,33
25	298	-189,1	1,04	1,16	0,88	15,7%	-6,61	-2,0100	8,9%	-0,554	1,0%	0,33
27	300	-190,2	1,05	1,16	0,89	15,8%	-6,60	-2,0115	9,0%	-0,554	1,0%	0,34
32	305	-191,5	1,07	1,16	0,91	16,0%	-6,53	-2,0136	9,2%	-0,555	1,2%	0,35
37	310	-192,8	1,08	1,15	0,92	16,2%	-6,46	-2,0157	9,3%	-0,556	1,3%	0,36
42	315	-194,0	1,10	1,15	0,93	16,3%	-6,39	-2,0178	9,5%	-0,557	1,5%	0,36
47	320	-195,3	1,12	1,15	0,95	16,5%	-6,33	-2,0200	9,7%	-0,558	1,6%	0,37
52	325	-196,6	1,14	1,15	0,96	16,7%	-6,26	-2,0222	9,9%	-0,558	1,8%	0,38
57	330	-197,8	1,16	1,14	0,97	16,8%	-6,20	-2,0244	10,1%	-0,559	1,9%	0,39
62	335	-198,9	1,18	1,14	0,98	17,0%	-6,13	-2,0265	10,3%	-0,560	2,1%	0,39
67	340	-200,0	1,20	1,14	1,00	17,1%	-6,07	-2,0285	10,4%	-0,561	2,2%	0,40
72	345	-201,0	1,22	1,14	1,00	17,2%	-5,99	-2,0305	10,6%	-0,562	2,4%	0,41
77	350	-202,0	1,24	1,14	1,01	17,3%	-5,92	-2,0326	10,8%	-0,563	2,5%	0,41
82	355	-202,9	1,26	1,13	1,02	17,4%	-5,85	-2,0345	10,9%	-0,564	2,7%	0,42
87	360	-203,7	1,28	1,13	1,03	17,5%	-5,78	-2,0363	11,1%	-0,564	2,8%	0,43

Fonte: Autor (2019).

## C.6 ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DO $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ A PARTIR DE 260 K

Figura 92 - Valores extrapolados a partir de 260 K. Coeficiente de Seebeck, Condutividade térmica e resistividade elétrica em função da temperatura para os elementos p e n. Elemento **p** a esquerda com área gráfica em cinza e elemento **n** a direita com área gráfica em branco.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 11 - Coeficiente de Seebeck, Resistividade elétrica e condutividade térmica em função da temperatura em [K] para elemento tipo *p* e *n*.

<b>T</b>	<b><math>\rho_p</math></b>	<b><math>\rho_n</math></b>	<b><math>\alpha_p</math></b>	<b><math>\alpha_n</math></b>	<b><math>k_p</math></b>	<b><math>k_n</math></b>
<b>260</b>	0,8421	0,6282	174,1	-184,2	1,148	1,22
<b>265</b>	0,877	0,6524	175,1	-184,3	1,144	1,207
<b>270</b>	0,908	0,675	176,4	-184,6	1,14	1,197
<b>275</b>	0,9358	0,6964	177,9	-185,1	1,136	1,188
<b>280</b>	0,9611	0,7168	179,6	-185,9	1,132	1,18
<b>285</b>	0,9843	0,7365	181,3	-186,8	1,128	1,174
<b>290</b>	1,006	0,7559	183,2	-187,9	1,123	1,169
<b>295</b>	1,026	0,775	185,1	-189	1,118	1,164
<b>300</b>	1,046	0,794	187	-190,2	1,112	1,16
<b>305</b>	1,065	0,8132	188,9	-191,5	1,106	1,156
<b>310</b>	1,084	0,8326	190,8	-192,8	1,099	1,153
<b>315</b>	1,103	0,8523	192,7	-194	1,092	1,151
<b>320</b>	1,122	0,8725	194,6	-195,3	1,084	1,148
<b>325</b>	1,141	0,8932	196,4	-196,6	1,076	1,146
<b>330</b>	1,16	0,9144	198,1	-197,8	1,068	1,143
<b>335</b>	1,18	0,9362	199,8	-198,9	1,06	1,141
<b>340</b>	1,2	0,9586	201,4	-200	1,052	1,139
<b>345</b>	1,221	0,9817	202,9	-201	1,044	1,138
<b>350</b>	1,241	1,005	204,4	-202	1,036	1,136
<b>355</b>	1,263	1,029	205,7	-202,9	1,028	1,134
<b>360</b>	1,284	1,054	207	-203,7	1,021	1,133

Fonte: Autor (2019).

## C.7 RESULTADOS DO TEG 5W-5V-40S

Tabela 12 - Tensões elétricas em circuito aberto avaliadas no TEG 5W-5V-40S.

<b>Temperatura Face Quente</b>	<b>Experimental</b>	<b>Ideal</b>	<b>Não Ideal</b>
$T_c = 260 \text{ K}$			
$T_h \text{ (K)}$	Tensão (V)	Tensão (V)	Tensão (V)
273	0,38	0,59	0,35
283	0,68	1,05	0,57
293	0,99	1,51	0,74
303	1,30	1,98	0,90
$T_c = 273 \text{ K}$			
273	0,00	0,00	0,00
283	0,29	0,46	0,22
293	0,59	0,93	0,41
303	0,91	1,40	0,58
313	1,24	1,88	0,73
$T_c = 283 \text{ K}$			
283	0,00	0,00	0,00
293	0,33	0,47	0,19
303	0,69	0,94	0,37
313	1,08	1,42	0,53
323	1,51	1,91	0,70
$T_c = 293 \text{ K}$			
293	0,00	0,00	0,00
303	0,38	0,47	0,18
313	0,78	0,96	0,35
323	1,15	1,45	0,52
333	1,42	1,94	0,70

Fonte: Autor (2019).

## C.8 RESULTADOS TEG 10W-4V-40S

Tabela 13 - Tensões elétricas em circuito aberto avaliadas no TEG 10W-4V-40S.

<b>Temperatura Face Quente</b>	<b>Experimental</b>	<b>Ideal</b>	<b>Não Ideal</b>
$T_c = 260 \text{ K}$			
$T_h \text{ (K)}$	Tensão (V)	Tensão (V)	Tensão (V)
273	0,18	0,59	0,46
283	0,31	1,05	0,74
293	0,41	1,51	0,97
303	0,52	1,98	1,18
$T_c = 273 \text{ K}$			
273	0,00	0,00	0,00
283	0,15	0,46	0,29
293	0,32	0,93	0,54
303	0,50	1,40	0,77
$T_c = 283 \text{ K}$			
283	0,00	0,00	0,00
293	0,13	0,47	0,26
303	0,28	0,94	0,49
313	0,43	1,42	0,71
323	0,57	1,91	0,94
$T_c = 293 \text{ K}$			
293	0,00	0,00	0,00
303	0,14	0,47	0,24
313	0,29	0,96	0,47
323	0,45	1,45	0,70

Fonte: Autor (2019).

## APÊNDICE D – INCERTEZAS

### D.1 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Uma breve análise das incertezas nas potências elétricas é demonstrada tomando como referência a face 1. Seja as temperaturas nas duas faces, a tensão máxima, uma resistência externa de  $10 \Omega$  selecionada e a equação (191) como resistência interna. As potências experimentais são detalhadas e comparadas com as potências do modelo ideal, não ideal e o modelo proposto que usa os conceitos de condutividade térmica efetiva.

$$T = \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}}{2} \quad (232)$$

$$\delta T = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial T_{\text{sup}}} \delta T_{\text{sup}} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial T_{\text{inf}}} \delta T_{\text{inf}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (233)$$

$$\delta T = \left[ \left( \frac{1}{2} \delta T_{\text{sup}} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \delta T_{\text{inf}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (234)$$

$$\delta T = \left[ \frac{1}{4} (\delta T_{\text{sup}}^2 + \delta T_{\text{inf}}^2) \right]^{1/2} \quad (235)$$

$$\delta T = \frac{1}{2} \left[ \delta T_{\text{sup}}^2 + \delta T_{\text{inf}}^2 \right]^{1/2} \quad (236)$$

Mas  $\delta T_{\text{sup}} = \delta T_{\text{inf}}$  e  $\delta T = \frac{\sqrt{2}}{2} \delta T_{\text{sup}}$  assim como  $\delta T_{\text{sup}} = 1$

$$\delta T = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (237)$$

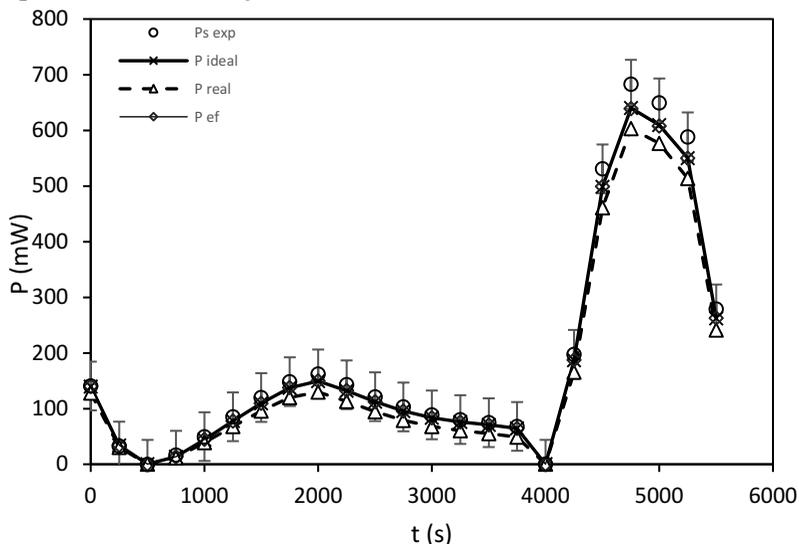
Sabendo que  $R_{in} = R_B$ ,  $\delta R_{in} = \frac{\partial R_{in}}{\partial T} \delta T$  e como  $\delta T = \frac{\sqrt{2}}{2} \delta T_{sup}$  chega-se me (265).

$$\delta R_{in} = \frac{0,022\sqrt{2}}{2} \delta T_{sup} \quad (238)$$

$$\delta R_{in} = \frac{0,022\sqrt{2}}{2} \approx 0,02 \quad (239)$$

$$\delta P = \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial V_{exp}} \delta V_{exp} \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial R_{in}} \delta R_{in} \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial R_L} \delta R_L \right)^2 \right]^{1/2} \quad (240)$$

Figura 93 - Incerteza na potência durante a órbita do satélite na face 1.



Fonte: Autor (2019).

Na Figura 93 vemos todas as potências do modelo ideal e da condutividade térmica efetiva dentro das tolerâncias durante toda a órbita. O modelo não ideal em pontos de maior potência se distancia um pouco da margem de tolerância que é bem estreita cerca de zero a 3,80 mW aproximadamente.

## ANEXO A – GERADORES TERMOELÉTRICOS

### A.1 DADOS EVERREDTRONICS LTD

Tabela 14 - Dados do Fabricante para elementos do tipo p e n.

Propriedades do Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	Tipo p	Tipo n
Pureza	99,99%	99,99%
Coefficiente de Seebeck ( $\alpha$ )	200-230 $\mu\text{V/K}$	205-235 $\mu\text{V/K}$
Condutividade Térmica (k)	1,2-1,6 W/mK	1,2-1,6 W/mK
Condutividade Elétrica ( $\sigma$ )	850-1250	950-1250
ZT (300 K)	1,1	1

Fonte: Everredtronics Ltd (2018).

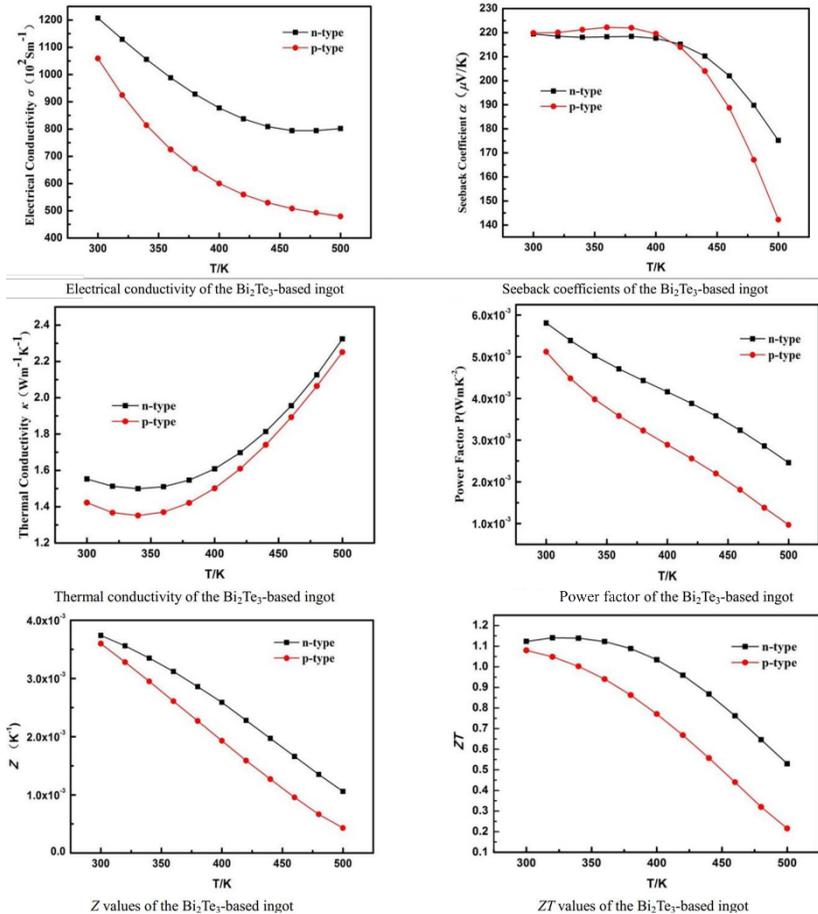
Figura 94 - Folha de dados com especificações de performance.

#### Performance Specification Sheet

Performance Specification	p-Type	n-Type	Note
Type Number	TIG-BiTe-P-1	TIG-BiTe-N-1	
Diameter (mm)	31 ± 2	31 ± 2	
Length (mm)	250 ± 30	250 ± 30	
Density (g cm <sup>-3</sup> )	6.8	7.8	
Electrical Conductivity $\sigma$ (10 <sup>2</sup> S m <sup>-1</sup> )	850 ~ 1250	850-1250	300 K
Seebeck Coefficient $\alpha$ ( $\mu\text{V K}^{-1}$ )	190 ~ 230	190 ~ 230	300 K
Thermal Conductivity $\kappa$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1.2 ~ 1.6	1.2 ~ 1.6	300 K
Power Factor P (W m K <sup>-2</sup> )	≥ 0.005	≥ 0.005	300 K
ZT value	≥ 1.0	≥ 1.0	300 K

Fonte: Everredtronics Ltd (2018).

Figura 95 - Principais propriedades termoeétricas do Telureto de Bismuto para elementos do tipo p e n.



Fonte: Everredronics Ltd (2018).