

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

PPGE3M

PROTÓTIPO DE UM MICROGERADOR TERMOELÉTRICO PARA CAPTAÇÃO DE
ENERGIAS RESIDUAIS BASEADO NO EFEITO *SEEBECK* COM SISTEMA DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR INTERCAMBIÁVEL

Oswaldo Hideo Ando Junior

Tese para obtenção do Título de Doutor
em Engenharia

Porto Alegre

2014

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

PROTÓTIPO DE UM MICROGERADOR TERMOELÉTRICO PARA CAPTAÇÃO DE
ENERGIAS RESIDUAIS BASEADO NO EFEITO *SEEBECK* COM SISTEMA DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR INTERCAMBIÁVEL

OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR
Mestre em Engenharia Elétrica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Porto Alegre
2014

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Chesman de Araújo Feitosa, CCET/UFRN

Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti, PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. João Paulo Pereira do Carmo, SEL/USP

Dr. Alexandre Polozine, UFRGS

Prof. Dr. Telmo Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

DEDICATÓRIA

In Memoriam Luci Maria Ando.

III

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Sr. Oswaldo Hideo Ando pelo amor, por me incentivar nos meus estudos e em minhas escolhas.

Ao meu filho Pietro Hiroshi Ando pelo amor incondicional.

A Ivonete, pelo amor, paciência, dedicação e compreensão.

Ao meu orientador, Professor Dr. Lirio Schaeffer por ter me incentivado a continuar meus estudos, e principalmente pela confiança e apoio.

A Professora Dra. Célia de Fraga Malfatti pelo incentivo à pesquisa e principalmente pelo entusiasmo contagiante em desenvolver pesquisa.

Ao Professor Dr. João Paulo Pereira do Carmo pela ajuda e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Arturo Suman Bretas por ter acreditado na minha capacidade e ter incentivado a continuar meus estudos.

Aos Professores do Programa de Pós Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEE e PPGE3M) pelos ensinamentos no decorrer desta caminhada.

Ao Dr. Mario Orlando Oliveira, pela ajuda, coleguismo e apoio.

Aos meus colegas de trabalho da SATC, em especial, Me. Anderson Diogo Spacek, Me. João Mota Neto e Esp. Cleber Lourenço Izidoro pelo apoio, ajuda e incentivo.

A todos meus familiares, amigos e colegas, pelo apoio e compreensão de minha ausência.

A UFRGS e a Faculdade SATC por ter me oportunizado mais esta conquista.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | VIII |
| LISTA DE TABELAS | XIII |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | XIV |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XV |
| RESUMO | XIX |
| ABSTRACT | XX |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 21 |
| 1.1 Justificativa e Relevância | 21 |
| 1.2 Visão Geral da Tese..... | 22 |
| 1.3 Contribuição do Projeto..... | 23 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 25 |
| 2.1 Evolução Histórica da Termoeletricidade | 25 |
| 2.1.1 Materiais Termoelétricos | 29 |
| 2.1.2 Módulos Termoelétricos | 33 |
| 2.1.2.1 Transdutor Termoelétrico | 35 |
| 2.1.2.2 Refrigeração Termoelétrica | 36 |
| 2.1.2.3 Geração Termoelétrica..... | 40 |
| 2.2 Estado da Arte | 42 |
| 2.2.1 Utilização em Veículos à Combustão | 43 |
| 2.2.2 Utilização na Indústria Aeroespacial | 47 |
| 2.2.3 Utilização em Instalações Residenciais e Prediais..... | 49 |
| 2.2.3.1 Utilização do Efeito Termoelétrico em Instalações Residenciais..... | 50 |
| 2.2.3.2 Utilização do Efeito Termoelétrico em Instalações Prediais | 53 |
| 2.2.3.3 Utilização do Efeito Termoelétrico em Instalações Industriais | 54 |
| 2.2.4 Utilização do Efeito Termoelétrico em Pequenos Gradientes de Temperatura.... | 55 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.2.4.1 | Utilização para Microgeração Termoelétrica na Área Eletrônica..... | 57 |
| 2.2.4.2 | Utilização para Geração Termoelétrica em Equipamentos Portáteis..... | 59 |
| 2.2.4.3 | Utilização do Efeito Termoelétrico na Geração de Energia Solar | 62 |
| 2.2.5 | Estudos Recentes da Utilização da Termoeletricidade | 63 |
| 3 | METODOLOGIA DE CÁLCULO | 69 |
| 3.1 | Microgerador Termoelétrico para Captação de Energias Residuais | 69 |
| 3.2 | Dimensionamento Elétrico de um Sistema Cogeração Termoelétrico | 72 |
| 3.3 | Previsão de Demanda de Energia Elétrica do Sistema Cogeração Termoelétrico ... | 73 |
| 3.4 | Estimativa da Corrente na Carga | 74 |
| 3.5 | Estimativa da Quantidade de Módulos Termoelétricos..... | 74 |
| 3.5.1 | Associação em Série do Arranjo de Módulos Termoelétricos | 77 |
| 3.5.2 | Associação em Paralelo do Arranjo de Módulos Termoelétricos..... | 78 |
| 3.5.3 | Arranjo Elétrico do Sistema de Conversão Termoelétrico | 78 |
| 3.6 | Estimativa da Área Mínima Ocupada..... | 79 |
| 3.7 | Demonstrativo do Procedimento de Cálculo | 79 |
| 3.8 | Dimensionamento do Conversor CC-CC | 82 |
| 3.9 | Dimensionamento do Sistema de Armazenamento | 84 |
| 4 | ANÁLISE EXPERIMENTAL | 85 |
| 4.1 | Análise de Desempenho de Módulos Termoelétricos | 85 |
| 4.2 | Desempenho dos Módulos Termoelétricos em Associações Elétricas..... | 97 |
| 4.2.1 | Associação em Série de Módulos Termoelétricos | 97 |
| 4.2.2 | Associação em Paralelo de Módulos Termoelétricos | 99 |
| 4.3 | Desenvolvimento Preliminar de um Microgerador Termoelétrico..... | 102 |
| 4.4 | Considerações Finais | 111 |
| 5 | DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MICROGERADOR TERMOELÉTRICO | 112 |
| 5.1 | Ensaio de Caracterização e Validação do Microgerador Termoelétrico..... | 115 |
| 5.1.1 | Ensaio da tensão de circuito aberto ou a vazio | 117 |
| 5.1.2 | Determinação da Curva de Caracterização da Tensão <i>versus</i> Corrente | 118 |
| 5.1.3 | Determinação da Resistência Interna do Microgerador..... | 119 |
| 5.1.4 | Determinação da Curva de Potência do Microgerador | 121 |
| 5.1.5 | Ensaio de validação do microgerador termoelétrico..... | 123 |
| 5.1.6 | Desempenho do microgerador termoelétrico..... | 124 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1.7 | Viabilidade Técnica e Econômica do Microgerador | 125 |
| 6 | ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS..... | 127 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 132 |
| 8 | TRABALHOS FUTUROS | 135 |
| | REFERÊNCIAS | 137 |
| | ANEXO - Conversor CC-CC <i>Boost</i> | 145 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1- Demonstrativo do Efeito <i>Seebeck</i> [9] | 26 |
| Figura 2.2 - Demonstrativo do Efeito Peltier [9]..... | 27 |
| Figura 2.3 – Demonstrativo do Efeito Thomson [8] | 28 |
| Figura 2.4 – Correlação da Figura de Mérito (ZT) para diferentes temperaturas (T) [15].. | 31 |
| Figura 2.5 – Rendimento do Módulo em relação ao gradiente de temperatura e a ZT [10] | 32 |
| Figura 2.6 – Demonstrativo das Junções do Módulo Termoelétrico [1]..... | 33 |
| Figura 2.7 – Módulo Termoelétrico TEHP1-24156-1.2 [21] | 34 |
| Figura 2.8 – Módulo Termoelétrico com Múltiplas Camadas [8]..... | 34 |
| Figura 2.9 – Princípio de funcionamento de um termopar [7]. | 35 |
| Figura 2.10 – Funcionamento do módulo termoelétrico como refrigerador [3] | 37 |
| Figura 2.11 - Modelo Característico do Sistema de Transferência Térmica [23]..... | 38 |
| Figura 2.12 – Esquema de um Refrigerador Termoelétrico (a), Refrigerador Portátil (a) [6] | 39 |
| Figura 2.13 – Comparativo entre o rendimento do módulo termoelétrico e a refrigeração com compressor [18]. | 40 |
| Figura 2.14 – Funcionamento do módulo termoelétrico como gerador [3] | 41 |
| Figura 2.15 - Gerador termoelétrico de 180W para um veículo utilitário esportivo híbrido [9]. | 45 |
| Figura 2.16 - Gerador termoelétrico aplicado no automóvel da BMW [9]..... | 45 |
| Figura 2.17 – Distribuição da combustão em um automóvel [26] | 46 |
| Figura 2.18 – Experiências de Automóveis Equipados com Material Termoelétrico [9]... | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.19 – Demonstrativo do RTG da Sonda <i>Voyager</i> [28]..... | 47 |
| Figura 2.20 – Projeto do MMRTG [28]. | 48 |
| Figura 2.21 – Temperaturas da superfície de uma Turbina de avião [29]..... | 49 |
| Figura 2.22 – Fogão a lenha desenvolvido pela <i>Hi-Z technology</i> [30]..... | 50 |
| Figura 2.23 – Fogão a lenha em que foi realizado o experimento [31]..... | 51 |
| Figura 2.24 - Fixação dos módulos termoeletricos na parede do fogão a lenha [31]..... | 51 |
| Figura 2.25 – Tensão de circuito aberto do módulo termoeletrico [31]..... | 52 |
| Figura 2.26 – <i>Layout</i> da parede do prédio com os módulos termoeletricos [25] | 53 |
| Figura 2.27 – Dispositivo Para Recuperação Industrial de Calor [26]..... | 54 |
| Figura 2.28 – Demonstrativo do <i>GreenTEG</i> [27]..... | 55 |
| Figura 2.29 – O gerador conectado por meio de uma série de canais [32]. | 56 |
| Figura 2.30 – Curva referente a potência de saída à junção termoeletrica [32]. | 57 |
| Figura 2.31 – Gráfico da tensão de saída do módulo em função da temperatura [27]..... | 58 |
| Figura 2.32 – Relógio <i>Citizen Eco-Drive</i> (esquerda) e <i>Seiko Thermic</i> (direita) [1]..... | 59 |
| Figura 2.33 – Protótipo do gerador termoeletrico [1]..... | 60 |
| Figura 2.34 – Oxímetro de pulso sem fios [1]..... | 60 |
| Figura 2.35 – Sistema de monitoração EEG sem fios [1]. | 61 |
| Figura 2.36 – Gerador termoeletrico de pulso desenvolvido pelo grupo de Ziyang Wang [1]. | 61 |
| Figura 2.37 – Relação do desempenho dos módulos termoeletricos testados [39]. | 63 |
| Figura 2.38 – Diagrama de blocos do sensor autônomo [40]..... | 64 |
| Figura 2.39 – Demonstrativo da montagem experimental do gerador termoeletrico [41] .. | 64 |
| Figura 2.40 – Demonstrativo do esquema experimental para análise dos TEG's [42] | 65 |
| Figura 2.41 – Demonstrativo da geometria do dispositivo testado [43]..... | 65 |
| Figura 2.42 – Dispositivo de geração de energia termoeletrica experimental [44]..... | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.43 – Protótipo do TEG (metal líquido) [45]..... | 67 |
| Figura 2.44– Diagrama esquemático (a) e foto da bancada de teste (b) [46]..... | 67 |
| Figura 2.45 – Demonstrativo do Sistema <i>Heat Pipe</i> desenvolvido [48] | 68 |
| Figura 3.1 - Demonstrativo do diagrama de blocos do sistema de cogeração termoelétrica | 70 |
| Figura 3.2 – Fluxograma contendo os passos para o dimensionamento do sistema proposto | 73 |
| Figura 3.3 – Tensão, corrente e potência em função do gradiente de temperatura [49]..... | 75 |
| Figura 3.4 – Curva de desempenho da tensão gerada em função do gradiente de temperatura [21] | 76 |
| Figura 3.5 - Curva de desempenho da tensão sob carga do módulo [21]..... | 80 |
| Figura 3.6 - Curva de desempenho da corrente sob carga do módulo [21]..... | 81 |
| Figura 3.7 – Demonstrativo do arranjo elétrico do conversor termoelétrico..... | 82 |
| Figura 3.8 – Utilização da energia nos conversores CC-CC [51] | 84 |
| | |
| Figura 4.1 - Módulo Termoelétrico INBC1-127.0HTS [49]..... | 86 |
| Figura 4.2 – Curvas de Desempenho do Módulo INBC1-127.0HTS [49]..... | 86 |
| Figura 4.3 - Módulo Termoelétrico Modelo TEHP1-24156-1.2 [21] | 87 |
| Figura 4.4 - Curvas de Desempenho do Módulo Termoelétrico Modelo TEHP1-24156-1.2 [21] | 88 |
| Figura 4.5 - Diagrama de Blocos da Montagem Experimental | 89 |
| Figura 4.6 - Foto do <i>Setup</i> do Experimento | 90 |
| Figura 4.7 - Imagem Termográfica do Experimento Realizado | 90 |
| Figura 4.8 – Demonstrativo da Bancada para Monitoração | 91 |
| Figura 4.9 - Demonstrativo da tela de abertura do <i>software</i> | 91 |
| Figura 4.10 - Demonstrativo da tela de gráficos gerados pelo <i>software</i> | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.11 - Gráfico de Tensão versus ΔT para o módulo INBC1-127.0HTS..... | 94 |
| Figura 4.12 - Gráfico de Tensão versus ΔT para o módulo TEHP1-24156-1.2..... | 94 |
| Figura 4.13 - Gráfico da Potência para o módulo INBC1-127.0HTS..... | 96 |
| Figura 4.14 - Gráfico da Potência para o módulo TEHP1-24156-1.2..... | 96 |
| Figura 4.15 - Associação em série de fontes de tensão..... | 98 |
| Figura 4.16 - Demonstrativo da tensão de saída dos módulos conectados em série..... | 98 |
| Figura 4.17 - Demonstrativo da corrente de saída dos módulos conectados em paralelo... | 99 |
| Figura 4.18 - Associação em paralelo de fontes de tensão..... | 100 |
| Figura 4.19 - Demonstrativo da associação em paralelo com proteção..... | 101 |
| Figura 4.20 - Esquema elétrico da placa de interconexão..... | 101 |
| Figura 4.21 - Demonstrativo do bloco de interconexão desenvolvido..... | 102 |
| Figura 4.22 - Diagrama de Blocos da <i>Setup</i> da Montagem Experimental..... | 103 |
| Figura 4.23 - Demonstrativo da Lâmpada LED..... | 103 |
| Figura 4.24 - Demonstrativo do Bloco de Refrigeração Desenvolvido..... | 105 |
| Figura 4.25 - Demonstrativo da tensão no módulo 1261G-7L31-24CX1 [55]...... | 106 |
| Figura 4.26 - Demonstrativo da disposição dos módulos termoelétrico sobre a fonte quente | 107 |
| Figura 4.27 - Demonstrativo das temperaturas nas faces quente e fria do sistema cogeração. | 107 |
| Figura 4.28 - Temperaturas no sistema cogeração após inserção do bloco de refrigeração. | 108 |
| Figura 4.29 - Imagem Térmica do Experimento..... | 108 |
| Figura 4.30 - Demonstrativo da validação do experimento..... | 109 |
| Figura 4.31 - Demonstrativo da Tensão Gerada pelo Microgerador..... | 110 |
| Figura 4.32 - Demonstrativo da Corrente Fornecida pelo Microgerador..... | 110 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.33 - Demonstrativo da Potência Gerada pelo Microgerador..... | 111 |
| Figura 5.1 - Demonstrativo das partes constituintes do protótipo do microgerador | 112 |
| Figura 5.2 - Desenho do protótipo do microgerador proposto | 113 |
| Figura 5.3 - Demonstrativo do protótipo do microgerador desenvolvido. | 114 |
| Figura 5.4 - Demonstrativo das cargas de teste utilizadas..... | 115 |
| Figura 5.5 - Demonstrativo do arranjo elétrico do microgerador desenvolvido. | 116 |
| Figura 5.6 - Demonstrativo dos resultados obtidos no ensaio a vazio (inbC1-127.08HTS). | 117 |
| Figura 5.7 - Demonstrativo da curva tensão de saída <i>versus</i> corrente de saída (inbC1- 127.08HTS) | 118 |
| Figura 5.8 - Demonstrativo das amostras da resistência interna (R_{int}) medida no ensaio em [Ω] | 119 |
| Figura 5.9 - Demonstrativo dos resultados das médias da resistência interna (R_{int}) para diferentes gradientes de temperatura (ΔT) e seus respectivos desvios padrões (σ_n). 120 | |
| Figura 5.10 - Demonstrativo da curva da potência de saída (P_{out}) <i>versus</i> corrente de saída (I_{out})..... | 122 |
| Figura 5.11 - Demonstrativo da curva da potência de saída (P_{out}) <i>versus</i> tensão de saída (V_{out}). | 122 |
| Figura 5.12 - Demonstrativo dos resultados de validação do microgerador | 123 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Tipos de termopares e suas faixas de medição de temperatura [15]..... | 36 |
| Tabela 2.2 - Características de geração do módulo TGM-254-1.0-1.3 | 58 |
| Tabela 4.1- Especificação Técnica do Módulo TEHP1-24156-1.2 [18]..... | 87 |
| Tabela 4.2 - Valores Experimentais Obtidos para o Módulo INBC1-127.0HTS..... | 93 |
| Tabela 4.3 - Valores Experimentais Obtidos para o Módulo TEHP1-24156-1.2..... | 93 |
| Tabela 4.4 - Valores de Potência Coletados no Experimento para o Módulo INBC1- 127.0HTS..... | 95 |
| Tabela 4.5 - Valores de Potência Coletados no Experimento para o Módulo TEHP1-24156- 1.2. | 95 |
| Tabela 5.1 - Demonstrativos dos custos para montagem do termogerador..... | 126 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------------------------|---|
| Bi_2Te_3 | Telureto de Bismuto |
| BSST | Empresa Fabricante de materiais termoelétricos |
| CC | Corrente Contínua |
| COP | Coeficiente de Performance ou Coeficiente de desempenho |
| GPHS | <i>Fonte de Calor de Uso Geral (General Purpose Heat Source)</i> |
| IAV | Companhia de Engenharia de Carros e Tráfego (<i>Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr</i>) |
| JPL | Laboratório de Propulsão à Jato (<i>Jet Propulsion Laboratory</i>) |
| MIT | Instituto de Tecnologia de Massachussetts (<i>Massachusetts Institute of Technology</i>) |
| MMRTG | Multi Missão Radioisotope Termelétrica Gerador (<i>Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator</i>) |
| NASA | Agência Espacial Americana (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>) |
| NTC | Coeficiente de temperatura negativa (<i>Negative Temperature Coefficient</i>) |
| PbTe | Telureto de Chumbo |
| RTG | Gerador Termoelétrico Radioisotope (<i>Radioisotope Thermoelectric Generator</i>) |
| RTD | Detectores de Temperatura à Resistência (<i>Resistance Temperature Detector</i>) |
| SiGe | Silício-Germânio |
| TEG | Grupo de materiais termoelétricos (<i>Thermoelectric Generator</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|----------------|---|-----------------------|
| A | Área de Contato | [m ²] |
| A_{cond} | Área do condutor | [cm ²] |
| A_e | Área efetiva da perna central do núcleo | [cm ²] |
| $\acute{A}rea$ | Área mínima ocupada pelo sistema termoeletrico | [mm ²] |
| A_{Spico} | Corrente de pico que passa pelo transistor | [A] |
| A_{sup} | Área do condutor cujo valor máximo é limitado pelo valor de 2Δ | [cm ²] |
| $A_{sup+isol}$ | Área do condutor mais a camada de isolamento | [cm ²] |
| A_{total} | Área total ocupada pelos condutores | [cm ²] |
| Aw | Área da janela onde é situado o enrolamento | [cm ²] |
| B_{max} | Máxima densidade de fluxo magnético | [T] |
| c | Calor Específico | [J/(kg.K)] |
| C | Capacitância mínima do capacitor | [F] |
| $Comp$ | Comprimento do módulo utilizado | [mm] |
| D | Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor | [-] |
| D_{cond} | Diâmetro do condutor | [cm] |
| f_s | Frequência de chaveamento | [Hz] |
| Fu | Fator de ocupação do cobre no carretel, geralmente utiliza-se 70% (0,7) | [%] |
| h | Coefficiente de Convecção | [W/m ² *K] |
| I | Corrente | [A] |
| I_{Carga} | Corrente nominal na carga | [A] |
| $I_{Ceficaz}$ | Corrente eficaz no capacitor | [A] |
| I_{conv} | Corrente na entrada do conversor | [A] |

| | | |
|-----------------|--|----------------------|
| $I_{Crítica}$ | Corrente máxima do circuito | [A] |
| I_{Dmed} | Corrente média no diodo | [A] |
| $I_{Deficaz}$ | Corrente eficaz no diodo | [A] |
| I_{gap} | Comprimento do entreferro | [mm] |
| I_{Lpico} | Corrente de pico que passa pelo indutor | [A] |
| $I_{Leficaz}$ | Corrente eficaz que passa pelo indutor | [A] |
| I_{mod} | Corrente fornecida por um módulo | [A] |
| I_{max} | Corrente máxima que circula no conversor | [A] |
| I_o | Corrente de saída do conversor | [A] |
| I_{Smed} | Corrente média que passa pelo transistor | [A] |
| $I_{Teficaz}$ | Corrente eficaz que passa pelo transistor | [A] |
| J_{max} | Máxima densidade de corrente elétrica no cobre do fio | [A/cm ²] |
| k | Condutividade Térmica | [W/(m·K)] |
| L | Indutância do indutor do Conversor | [H] |
| L_{arg} | Largura do módulo utilizado | [mm] |
| Le | Comprimento efetivo do núcleo (fornecido pelo fabricante) | [cm] |
| N_{cond} | Número de condutores | [-] |
| N_{Dias} | Número de dias de autonomia | [-] |
| Ne | Número de espiras | [-] |
| N_{horas} | Número de horas de funcionamento do sistema | [h] |
| N_{mod} | Número total de módulos necessários para realizar o arranjo elétrico do sistema de conversão termoeletrônico | [-] |
| $N_{Paralelo}$ | Número de módulos conectados em paralelo | [-] |
| $N_{Série}$ | Número de módulos conectados em série | [-] |
| P | Potência | [W] |
| P_{Carga} | Potência da carga | [W] |
| $E_{Consumida}$ | Consumo total de energia diária | [Wh] |
| P_{in} | Potência de Entrada | [W] |
| P_{otm} | Potência Otimizada | [W] |

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| P_{real} | Potência Real | [W] |
| P_t | Perdas totais no semicondutor | [W] |
| Q | Energia Térmica | [J] |
| Q_c | Calor Líquido Absorvido | [W] |
| Q_{cond} | Calor Conduzido | [W] |
| Q_h | Calor Dissipado | [W] |
| R | Resistência Elétrica | [Ω] |
| R_{CD} | Resistência térmica de contato entre o semicondutor e o dissipador | [$^{\circ}C/W$] |
| R_{DA} | Resistência térmica de contato entre o dissipador e o ambiente | [$^{\circ}C/W$] |
| R_{JA} | Resistência térmica da junção com o ambiente | [$^{\circ}C/W$] |
| R_{JC} | Resistência térmica da junção para a cápsula | [$^{\circ}C/W$] |
| T | Temperatura | [$^{\circ}C$] |
| T_A | Temperatura ambiente | [$^{\circ}C$] |
| T_C | Temperatura do encapsulamento | [$^{\circ}C$] |
| T_D | Temperatura do dissipador | [$^{\circ}C$] |
| T_f | Temperatura do Lado Frio | [$^{\circ}C$] |
| $T_{f_{Inferior}}$ | Temperatura da Fonte Fria Inferior contida na curva de desempenho | [$^{\circ}C$] |
| $T_{f_{mod}}$ | Temperatura da Fonte Fria presente no módulo termoeletrico | [$^{\circ}C$] |
| $T_{f_{Superior}}$ | Temperatura da Fonte Fria Superior contida na curva de desempenho | [$^{\circ}C$] |
| T_J | Temperatura da junção | [$^{\circ}C$] |
| t_{max} | Limite máximo permitido da profundidade de carga da bateria (0.3 a 0.9) | [-] |
| T_q | Temperatura do Lado Quente | [$^{\circ}C$] |
| T_s | Temperatura da Superfície | [K] |
| T_{∞} | Temperatura Ambiente | [K] |
| V | Tensão | [V] |
| V_{Carga} | Tensão nominal da carga | [V] |
| V_{conv} | Tensão mínima de entrada do conversor | [V] |

| | | |
|-------------------|--|--------------------|
| V_e | Volume magnético efetivo do núcleo (fornecido pelo fabricante) | [cm ³] |
| $V_{Inferior}$ | Tensão gerada para $T_{f_{Inferior}}$ | [V] |
| V_{max} | Tensão máxima no conversor CC-CC | [V] |
| V_{min} | Tensão mínima no conversor CC-CC | [V] |
| V_{mod} | Tensão gerada por módulo para $T_{f_{mod}}$ | [V] |
| V_o | Tensão de saída do conversor | [V] |
| $V_{Superior}$ | Tensão gerada para $T_{f_{Superior}}$ | [V] |
| $W_{L_{max}}$ | Máxima energia a armazenar no indutor | [J] |
| ZT | Figura de Mérito | [1/K] |
| α | Coefficiente de <i>Seebeck</i> | [mV/°C] |
| ΔI_C | Ondulação de corrente máxima no capacitor | [A] |
| ΔI_L | Varição da ondulação de corrente sobre o indutor | [A] |
| ΔT | Varição de Temperatura | [°C] |
| ΔV | Varição de Tensão | [V] |
| ΔV_{Conv} | Tensão média no conversor CC-CC | [V] |
| ΔV_o | Ondulação da tensão de saída do conversor | [V] |
| η | Rendimento | [-] |
| μ_e | Permeabilidade relativa equivalente do núcleo | [H/m] |
| μ_r | Permeabilidade relativa do núcleo (fornecida pelo fabricante) | [H/m] |
| π | Coefficiente Peltier | [V] |

RESUMO

Esta Tese apresenta o desenvolvimento de um protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no Efeito *Seebeck* com sistema de transferência de calor intercambiável. Neste sentido, desenvolveu-se dois sistemas de transferência térmica, sendo um para captação do calor residual de processos industriais constituído por um módulo denominado captor de calor intercambiável e por outro módulo para resfriar o sistema. Destaca-se que o sistema térmico desenvolvido permite a sua adaptação ao processo industrial por meio da troca do captor de calor, otimizando a transferência térmica para o microgerador termoelétrico. Com base nos dados medidos fez-se um tratamento dos dados obtendo-se uma tensão de circuito aberto de $V_{open}=0,4306 \times \Delta T$ [mV] e uma resistência interna de $R_0=9,41\Omega$, com uma tolerância de $\Delta R_{int}=0,77\Omega$ tal que $R_{int}=R_0 \pm \Delta R_{int}=9,41 \pm 0,77\Omega$. As medições feitas com a condição de máxima potência de saída foi obtida em um gradiente de temperatura de $\Delta T=80^\circ\text{C}$ resultando numa potência máxima $P_{out} \approx 29\text{W}$. Como resultado obteve-se o protótipo de um microgerador termoelétrico baseado no Efeito *Seebeck* para captação de energias residuais, customizado e adaptado às características do processo industrial e à respectiva carga (potência e tensão), permitindo a troca e alteração da configuração do sistema de transferência de calor bem como, a reconfiguração do arranjo dos módulos termoelétricos.

Palavras Chave: Materiais Termoelétricos. Microgerador de Estado Sólido. Energia Limpa. Captação de Energias Residuais. Cogeração.

ABSTRACT

This thesis presents the development of a prototype of a thermoelectric microgenerator to energy harvesting based on the Seebeck Effect with interchangeable heat transfer system. In this sense, it developed two heat transfer systems, one for capture of waste heat from industrial processes consisting of a sensor module called interchangeably heat and cool the module to another system. It is noteworthy that the thermal system developed allows its adaptation to industrial process by exchanging the sensor heat, optimizing heat transfer to the thermocouple microgenerator. Based on measured data has a data processing yielding a open circuit voltage of $V_{\text{open}}=0,4306 \times \Delta T$ and an internal resistance of $R_0=9,41\Omega$, with a tolerance of $\Delta R_{\text{int}}=0,77\Omega$ such that $R_{\text{int}}=R_0 \pm \Delta R_{\text{int}}=9,41 \pm 0,77\Omega$. The measurements made on the condition of maximum output was obtained at a temperature gradient of $\Delta T=80^\circ\text{C}$ resulting in a maximum power $P_{\text{out}} \approx 29\text{W}$. As a result we obtained a prototype thermoelectric microgenerator based on Seebeck effect to energy harvesting, energy customized and adapted to the characteristics of industrial process and its load (power and voltage), allowing the exchange and change the configuration of the transfer system heat as well as reconfiguring the arrangement of thermoelectric modules.

Keywords: Thermoelectric Materials. Microgenerator Solid State. Green Energy. Energy Harvesting. Cogeneration.

1 INTRODUÇÃO

A questão energética é vital para todos os países, sendo importante diminuir a dependência sobre os combustíveis fósseis. Com os avanços tecnológicos e a preocupação com o aquecimento global, a busca por fontes alternativas está cada vez maior. Atualmente, a energia elétrica é um bem básico para o desenvolvimento da população que melhora a qualidade de vida, proporcionando crescimento social e econômico. Porém, vive-se uma crise energética que tem evidenciado os limites da oferta de energia para atender a demanda crescente [1, 2].

Portanto, é importante cada vez mais buscar novas formas de conversão de energia por fontes alternativas que são soluções ambientalmente sustentáveis para diversificar a matriz energética mundial e, assim, minimizar os impactos ambientais globais, priorizando a necessidade de se substituir essa fonte energética por outras renováveis [3].

Para o Brasil um desses grandes desafios está relacionado ao aproveitamento energético dos recursos naturais, espalhados de maneira heterogênea nas mais variadas regiões do país. Além disso, o potencial brasileiro para a geração de energia por meio de recursos renováveis é apontado como um dos maiores do mundo [4].

Com a necessidade de buscar novas tecnologias para conversão de energia, os pesquisadores estão reforçando os estudos em termoelectricidade. Alguns estudos recentes mostram avanços no desenvolvimento de materiais termoelétricos com um rendimento superior a 20%, por meio da utilização de terras raras [5]. Atualmente, os materiais termoelétricos são amplamente utilizados em processos de refrigeração transformando energia elétrica em energia térmica [6]. Por se tratar de um efeito reversível, esta pesquisa visa o desenvolvimento de um microgerador termoelétrico de estado sólido para a captação de energias residuais (perdas térmicas) em processos industriais.

1.1 Justificativa e Relevância

A relevância para a utilização da cogeração de energia elétrica é o fato de ser uma

forma de energia alternativa e dependente apenas de perdas térmicas de sistemas. Normalmente, estes resíduos provêm de processos industriais e são liberados ao meio ambiente sem serem aproveitados. Com este projeto, o resíduo não deixará de existir e também não deixará de ser liberado ao meio ambiente, mas será aproveitado parcialmente, para gerar energia elétrica.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, o consumo de energia no Brasil vai crescer 3,7% ao ano até 2030 [5]. Desta forma, necessita-se constantemente de ampliar a oferta de energia para acompanhar a crescente expansão da demanda de energia elétrica. Logo, toda e qualquer pesquisa na busca de novas fontes alternativas de energia irá contribuir para a sustentabilidade e incremento da confiabilidade do setor elétrico.

Na busca pela melhoria da eficiência energética dos processos, um dos principais aspectos analisados para o seu aperfeiçoamento é a redução das perdas que em grande parte são energias residuais. De acordo com o princípio da conservação de energia que estabelece que a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante, o aproveitamento de parte da energia desperdiçada (perdas) pode ser regenerada e utilizada no próprio local gerador deste desperdício. Consequentemente, ao se reaproveitar parte desta energia residual irá maximizar-se o rendimento do sistema como um todo.

Com o desenvolvimento do sistema de cogeração termoelétrica de energia será possível aproveitar as energias residuais de processos industriais. Como por exemplo, processos de conformação como: forjamento e laminação a quente, sistemas de refrigeração industrial, caldeiras, fornos cerâmicos bem como o calor desperdiçado pelo motor de um carro que pode ser convertido em eletricidade para carregar as baterias.

1.2 Visão Geral da Tese

O primeiro capítulo desta Tese apresenta uma introdução geral sobre Termoeletricidade.

O capítulo 2 mostra a revisão bibliográfica geral sobre os efeitos termoelétricos. Inicia-se com o conceito de termoeletricidade e o princípio de funcionamento, aplicação e desenvolvimento dos materiais termoelétricos. Em seguida apresenta-se o estado da arte abordando a evolução histórica dos materiais termoelétricos e as principais contribuições para a utilização da termoeletricidade para conversão de energia.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia de cálculo para o dimensionamento

elétrico do sistema de cogeração termoelétrica desenvolvido, contendo as etapas que envolvem o dimensionamento de um sistema de cogeração termoelétrica de estado sólido a partir de curvas de desempenho e de um gradiente de temperatura predeterminado, seguido pelo detalhamento de cada etapa de projeto.

No capítulo 4 apresenta-se o procedimento e resultados obtidos da análise experimental do sistema de cogeração termoelétrica desenvolvido. Finaliza-se apresentando os resultados e as principais contribuições do modelo experimental para o desenvolvimento e utilização da termoeletricidade para conversão de energia.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados da validação experimental do protótipo do sistema de cogeração termoelétrica desenvolvido e a comprovação da funcionalidade por meio de testes de bancada para levantamento das curvas de potência.

No capítulo 6 apresentam-se as análises e discussões dos resultados sobre o desenvolvimento do microgerador termoelétrico de estado sólido e sua aplicabilidade para captação de perdas térmicas.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões a cerca do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa científica.

No capítulo 8 apresentam-se as principais sugestões de trabalhos futuros. Finaliza-se apresentando as análises e discussões dos resultados

E por fim, apresentam-se as referências utilizadas no desenvolvimento desta Tese de Doutorado.

1.3 Contribuição do Projeto

O trabalho visa o projeto e desenvolvimento de um protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido utilizando módulos termoelétricos para demonstrar a viabilidade técnica da captação de energias residuais (perdas térmicas) em processos industriais. Com o intuito de verificar a eficácia da metodologia foi desenvolvido um Microgerador Termoelétrico de pequeno porte sendo sua validação realizada por meio de análises experimentais que replicam as características de processos industriais que possuem perdas térmicas.

Diante deste cenário, o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- a) Desenvolver um sistema de captação e regeneração de energia elétrica;
- b) Desenvolver e aplicar uma metodologia de cálculo para dimensionamento de um

microgerador termoelétrico baseado no efeito *Seebeck*;

- c) Estudar o desempenho de acordo com as possíveis aplicações do microgerador proposto; e
- d) Testar e validar experimentalmente o microgerador termoelétrico baseado no efeito *Seebeck*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão sobre os principais assuntos relacionados com o desenvolvimento do projeto. Inicia-se com o conceito de termoeletricidade e o princípio de funcionamento dos seus efeitos, seguido pelo desenvolvimento dos materiais termoelétricos e finaliza-se com as principais aplicações dos materiais termoelétricos. É seguido pelo estado da arte dos materiais termoelétricos propriamente ditos. Iniciando com um breve histórico da evolução e desenvolvimento dos materiais termoelétricos e concluindo-se com apresentação das principais contribuições e avanços tecnológicos da utilização da termoeletricidade para conversão de energia térmica em energia elétrica.

2.1 Evolução Histórica da Termoeletricidade

A termoeletricidade é a conversão de energia térmica em energia elétrica através de um gradiente de temperatura. Thomas Johann Seebeck, nascido em Reval (atual Tallinn) na Estônia, no ano de 1770 e falecido em Berlin no ano de 1831, foi o físico precursor do efeito termoelétrico. Este fenômeno é reversível e pode ser subdividido em três efeitos, chamados de efeito *Seebeck*, efeito *Peltier* e o efeito *Thomson* [2, 7, 8].

O efeito *Seebeck* foi descoberto em 1821 por Thomas Seebeck acidentalmente, verificando que dois condutores de materiais metálicos diferentes unidos em suas pontas e com uma diferença de temperatura entre eles, faziam com que uma agulha que estava entre os mesmos fosse deslocada [7]. Entre 1822 e 1823 Thomas Seebeck publicou seus resultados afirmando que condutores (ou semicondutores) diferentes produzem uma tensão quando estão com as extremidades unidas e submetidos a um gradiente de temperatura [9].

Este fenômeno ocorre quando é aplicada uma diferença de temperatura entre as extremidades de um material provocando o movimento de elétrons para a região com menor nível de energia e aumentando a concentração de íons positivos na outra região. O movimento dos elétrons gera uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura,

conforme demonstra a Figura 2.1 [2].

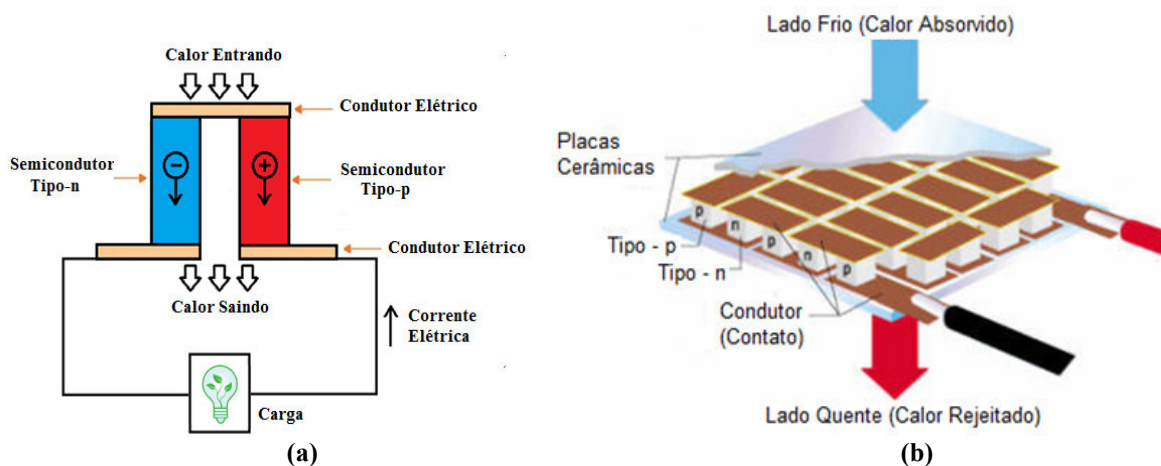


Figura 2.1- Demonstrativo do Efeito *Seebeck* [9]

O Coeficiente de *Seebeck* (α) é igual à tensão produzida (1) entre dois pontos de um condutor, em circuito aberto, quando a junção bimetálica é submetida a um gradiente de temperatura (ΔT) de 1 Kelvin [8, 9, 10]. A geração de tensão elétrica a partir de um condutor ser exposto a um gradiente de temperatura é chamada a efeito *Seebeck*. A eficiência é dada pelo coeficiente de *Seebeck* (α), e é determinado pela taxa de espalhamento e a densidade dos elétrons de condução sendo definido como a relação entre a tensão elétrica gerada para a diferença de temperatura [11].

$$\Delta V = \alpha (T_1 - T_2) \text{ [V]} \quad (1)$$

Onde:

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

$$\alpha = \Delta V / \Delta T \text{ [V/K]} \quad (2)$$

Um bom material termoelétrico tem um Coeficiente de *Seebeck* (α) entre 100mV/K e 300mV/K [11]. Assim, para atingir alguns Volt de tensão são necessários muitos pares termoelétricos ligados em série conforme pode ser visualizado na Figura 2.1 (b) [11].

O efeito *Peltier* foi descoberto alguns anos mais tarde em 1834, quando um físico

francês chamado Jean Charles Athanase Peltier, descobriu o efeito inverso ao efeito *Seebeck*, ou seja, quando uma corrente elétrica (CC) flui no circuito composto por uma junção bimetálica faz com que a junção dos metais resfrie ou aqueça em função do sentido da corrente.

A Figura 2.2 apresenta um exemplo demonstrativo do Efeito *Peltier*. O calor liberado (Q_c) na junção faz com que a corrente elétrica flua da esquerda para a direita. Caso o calor fosse absorvido na junção, a corrente elétrica (I) fluiria em sentido oposto, ou seja, da direita para a esquerda.

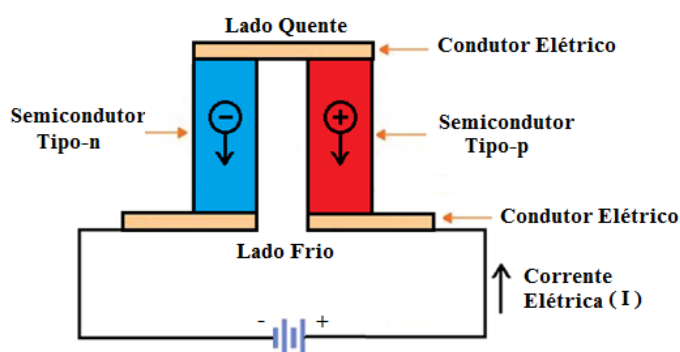


Figura 2.2 - Demonstrativo do Efeito Peltier [9]

Segundo Martins, et. al. [9], o calor absorvido na junção (Q_c) é a potência térmica transmitida dada em [W], por meio de uma espessura (m) de área (m^2), submetida a um gradiente de temperatura (ΔT) em [$^{\circ}C$] e uma condutividade térmica (k).

$$Q_c = \pi \cdot I \text{ [W]} \quad (3)$$

Onde:

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

Destaca-se que a quantidade de calor fornecido é proporcional à corrente que circula pelos condutores. Sendo a polaridade e a amplitude da tensão aplicada depende do gradiente de temperatura (ΔT) e dos materiais usados em sua confecção [1, 3, 7].

Já o efeito *Thomson* foi descoberto em 1851 por William Thomson provou que um material condutor pode irradiar ou absorver calor do meio exterior, quando o mesmo está

submetido a uma corrente elétrica e apresenta uma diferença de temperatura em suas extremidades, como se pode verificar na Figura 2.3.

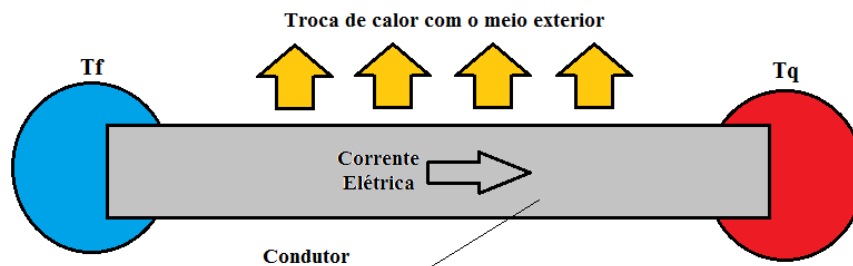


Figura 2.3 – Demonstrativo do Efeito Thomson [8]

Este calor é de proporções bem inferiores ao efeito *Peltier*, por isso geralmente é desprezado [7]. O coeficiente de *Thomson* relaciona o calor com a corrente elétrica e a diferença de temperatura entre a Temperatura da Fonte Fria (T_f) e a Temperatura da Fonte Quente (T_q), correlacionando as grandezas e provando que o Coeficiente *Peltier* (π) está diretamente relacionado com o Coeficiente *Seebeck* (α). A equação 4 apresenta esta relação [8]:

$$\pi = \alpha T \text{ [V]} \quad (4)$$

Onde:

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

Pesquisas recentes apontam para uma nova descoberta chamada Efeito Seebeck de Spin que foi descoberto por E. Saitoh, et. al. que notaram a geração térmica de energia motriz, ou tensão, para o spin do elétron: o efeito *Seebeck* de *Spin* [11]. Usando uma técnica de detecção de rotação que envolve a rotação Efeito Hall, mediu-se a tensão de rotação gerado a partir de um gradiente de temperatura numa ímã. Esta tensão de rotação induzida termicamente persiste mesmo em distâncias muito longe das extremidades da amostra, e rotações pode ser extraído a partir de qualquer posição do ímã simplesmente ligando-o a um metal. O efeito *Seebeck* de *Spin* nos permite passar um corrente, um fluxo de elétrons gira sem correntes elétricas, a uma grande distância [11].

J. Flipse et. al. observaram recentemente o efeito Peltier dependente de rotação e o efeito de Seebeck recíproca dependente de rotação, que são semelhantes à entre o Efeito *Peltier* de *Spin* e o Efeito *Seebeck* de *Spin* mas surgem da física completamente diferente [12]. O efeito *Peltier* de *Spin* no ferromagnético (ferro granada de ítrio isolador - YIG), ou seja, uma corrente de calor é gerada por uma corrente que flui através de uma rotação da platina (Pt) na superfície do YIG. O efeito pode ser explicado pela transferência do binário de rotação, que transforma a corrente de rotação da Pt em uma onda de corrente no YIG [12, 13].

2.1.1 Materiais Termoelétricos

Os materiais termoelétricos são capazes de transformar de forma direta um gradiente de temperatura em energia elétrica, quando um diferencial de temperatura é estabelecido entre as extremidades quente e fria do material. Assim, uma tensão é gerada e ao fluir uma corrente elétrica pelo sistema, uma potência elétrica é gerada.

A classificação dos materiais termoelétricos dá-se em geral como condutores, semicondutores e isolantes. Microscopicamente, a classificação é referida ao comportamento do elétron da camada de valência do material, em ação de um campo elétrico gerado [15].

As características ideais de um material termoelétrico são: elevado Coeficiente de *Seebeck* (α), alta condutividade elétrica (σ) e baixa condutividade térmica (k) sendo que estas três características estabelecem a Figura de Mérito (ZT) dos materiais termoelétricos [9, 13]. Uma alta condutividade elétrica (σ) minimiza o efeito de Joule, já uma baixa condutividade térmica (k) ajuda a manter o calor numa única junção mantendo o gradiente de temperatura (ΔT) entre as junções e o alto Coeficiente de *Seebeck* (α) para obter a máxima conversão de calor em eletricidade [7, 10]. Um metal não possui estas três características da Figura de Mérito (ZT) simultaneamente. A maioria dos metais com elevado Coeficiente de *Seebeck* (α) apresenta um baixo rendimento em termos de conversão termoelétrica [15].

Um bom material termoelétrico deve possuir uma Figura de Mérito (ZT) próxima do valor unitário. O composto de telúrio e bismuto utilizados nos dispositivos termoelétricos possuem um valor da Figura de Mérito (ZT) perto da unidade, à temperatura ambiente. Infelizmente, a Figura de Mérito não é constante com a temperatura [1]. A

Figura de Mérito (ZT) determina o desempenho de um material termoelétrico e é obtida pela equação 5 [18]:

$$ZT = \alpha^2/kR \quad (5)$$

Onde:

- α é o coeficiente de *Seebeck* [V/K];
- k a condutividade térmica [W/(mK)]; e
- R a resistência elétrica [Ω].

A busca por conhecimento e materiais termoelétricos sempre foi intensa. Por exemplo, Abram Fedorovich Ioffe, em 1929, demonstrou que um conversor termoelétrico construído com semicondutores (chumbo e telúrio) apresentava um rendimento energético de cerca de 4% [7].

No início, entre 1950 e 1960, as pesquisas de materiais termoelétricos apontaram o telureto de bismuto (Bi_2Te_3), telureto de chumbo (PbTe) e silício-germânio (SiGe) como sendo os compostos com os materiais com a melhor Figura de Mérito (ZT), divididas em três faixas de temperatura um pouco distintas. O telureto de chumbo e suas ligas têm sido amplamente utilizados em aplicações de refrigeração e em alguns locais de aplicações de baixa potência de geração. O chumbo telureto e o silício-germânio têm sido amplamente utilizados em aplicações de temperaturas mais altas de produção de energia [10].

Pode-se visualizar na Figura 2.4, que os materiais citados são os que apresentam elevados valores de Figura de Mérito (ZT), e por este motivo são os mais utilizados.

Embora não haja nenhum limite teórico estabelecido de Figura de Mérito (ZT), tem sido difícil alcançar valores superiores a 1 devido ao fato de depender dos três fatores anteriormente, repare-se que estes três fatores dependem da concentração transportadora, que é alta em condutores elétricos e baixa em isolantes. Com o aumento da concentração a condutividade elétrica aumenta, mas por outro lado o coeficiente de *Seebeck* diminuiu [3, 9].

Os metais não possuem as características necessárias para uma elevada Figura de Mérito (ZT), e para fazer alterações nos materiais fica difícil, pois mudando-se uma característica as outras também mudam. Isto vem criando limites desafiadores para chegar a uma elevada Figura de Mérito (ZT). Por este motivo, os materiais que apresentam

elevada Figura de Mérito (ZT) são os semicondutores, já que as suas concentrações transportadoras são intermediárias [16, 19].

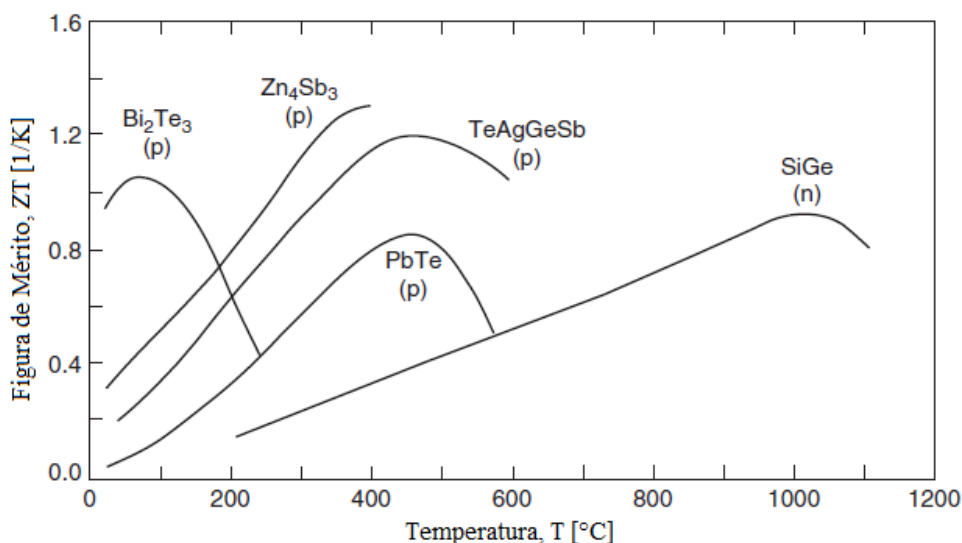


Figura 2.4 – Correlação da Figura de Mérito (ZT) para diferentes temperaturas (T) [15].

Assim, até cerca de 1990, a maioria dos investigadores centraram-se em semicondutores e em compostos de metais de liga leve em esforços para desenvolver melhores materiais termoelétricos. O comportamento destes materiais termoelétricos sempre ficou limitado em Figura de Mérito (ZT) próximo ao valor unitário [10].

Algumas pesquisas da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT-Lincoln Labs), da Universidade Estadual de Michigan e de outras organizações, de 1995 até hoje, levaram à descoberta de uma nova geração de materiais termoelétricos. Estes materiais são estruturas de baixa dimensão, como poços quânticos (materiais tão finos que são definidos de duas dimensões), fios quânticos (extremamente pequena secção transversal e são consideradas de uma dimensão, conhecidos como nanofios), pontos quânticos e super-redes (estrutura de múltiplas camadas de poços quânticos) e serão as alternativas para alcançar melhores figuras de mérito, podendo alcançar valores de 3 ou 4 [10, 16].

A utilização de terras raras permite criar sistemas com a Figura de Mérito (ZT) superior do que as dos demais materiais, por causa dos efeitos quânticos, fazendo aumentar significativamente a densidade dos estados, o que aumenta o Coeficiente de *Seebeck* (α). Também, associam a condutividade elétrica (σ) e térmica (k), permitindo que os materiais possam ter uma baixa condutividade térmica sem uma correspondente diminuição na condutividade elétrica [20].

Diretamente correlacionada à Figura de Mérito (ZT) está a eficiência de conversão de energia térmica em energia elétrica do módulo termoelétrico, que nos módulos atuais raramente excede o rendimento de 5%. Este baixo desempenho tem limitado as aplicações comerciais a refrigeradores. O rendimento (η) pode ser obtido pela equação 6.

$$\eta = \left\{ \left[\frac{(T_q + 273,15) - (T_f + 273,15)}{(T_f + 273,15)} \right] \cdot \left[\frac{(1 + ZT)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + ZT)^{\frac{1}{2}} + 1} \right] \right\} \quad (6)$$

Onde:

- T_q e T_f são respectivamente as temperaturas do lado quente e lado frio [°C].

A Figura 2.5 mostra a relação da Figura de mérito com rendimento do módulo (η). Nota-se que a eficiência está diretamente ligada a ZT. Se existissem materiais com uma Figura de Mérito (ZT) igual a 10, seria possível obter-se um rendimento do módulo termoelétrico (η) da ordem de 25% com 300K de gradiente de temperatura [10].

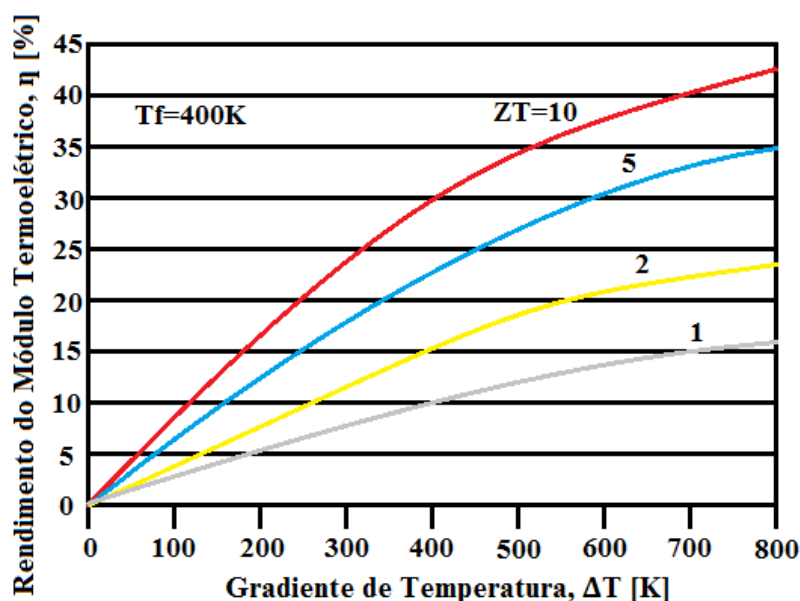


Figura 2.5 – Rendimento do Módulo em relação ao gradiente de temperatura e a ZT [10]

Ressalta-se que a eficiência está relacionada com o rendimento do ciclo de Carnot, e não com a eficiência total do módulo. Ao atingir uma melhor eficiência, os módulos termoelétricos necessitam de menos material radioativo para produzir a mesma quantidade de energia, fazendo com que o sistema de geração de energia fique mais leve e mais barato [10].

2.1.2 Módulos Termoelétricos

Um módulo termoelétrico converte energia térmica em energia elétrica e vice-versa sendo constituído de uma matriz formada por múltiplas junções termoeletricas ligadas em série para aumentar a tensão de saída e em paralelo para aumentar a corrente de saída [10].

Os módulos termoelétricos são capazes de operarem como geradores de gradiente de temperatura ou como geradores de energia elétrica em corrente contínua [2]. Cada junção é constituída por um material do *tipo-p* e outro do *tipo-n*. Os mesmos são ligados em série e agrupados em pares e envolvidos por uma capa cerâmica. As placas cerâmicas possuem condutores de cobre que permitem unir os materiais eletricamente em série e termicamente em paralelo [1].

Atualmente, utilizam-se inúmeras junções para maximizar a potência fornecida por módulo. Na Figura 2.6 apresenta-se o módulo termoelétrico que é composto por uma série de junções agrupadas em forma de matriz, formando um conjunto que varia de 3 a 127 termopares, dependendo do módulo termoelétrico [1]. No módulo quando uma corrente contínua (CC) percorre os pares, havendo uma absorção do calor ambiente, enquanto este é transportado através do módulo que o irradia do outro lado.

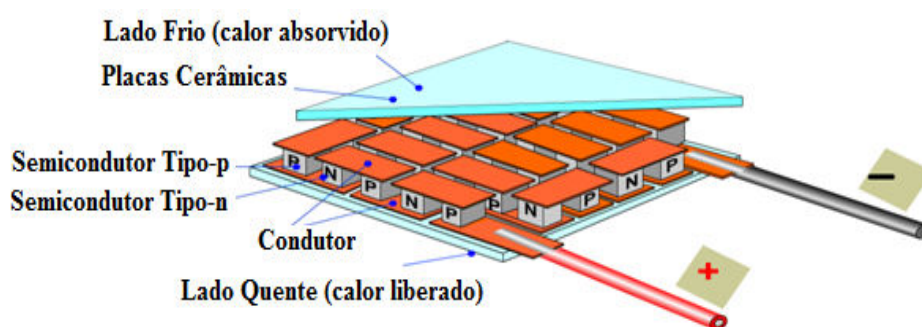


Figura 2.6 – Demonstrativo das Junções do Módulo Termoelétrico [1].

O coeficiente de expansão térmica dos materiais termoelétricos deve ser levado em consideração no projeto de um módulo, pois os mesmos sempre estão expostos a diferenças de temperaturas, podendo uma diferença muito alta ocasionar um “estresse” nos materiais, danificando o dispositivo [20]. Por este motivo os módulos possuem em seus *datasheets* as especificações de temperatura de operação bem como, informações referentes à tensão, corrente e potência que estes podem fornecer além, das dimensões e

demais características necessárias para a sua utilização.

Os módulos termoelétricos comerciais apresentam diversas especificações de acordo com a aplicação. Comercialmente encontram-se módulos que podem variar de 4mm de espessura e 3mm de lado, até 5mm de espessura com 60mm de lado, com estudos para ampliar estes tamanhos. Suas faixas para a transferência de calor podem variar de 1Watt até 125Watt, com estudos sendo realizados que podem aumentar esta faixa. O gradiente de temperatura entre o lado quente e o lado frio pode alcançar até 200°C, e em algumas aplicações são distribuídos em série, funcionando em cascata, a fim de obter diferenciais de temperaturas maiores, que podem chegar a cerca de 300°C. Na Figura 2.7, pode-se visualizar a geometria de um módulo termoelétrico comercial.

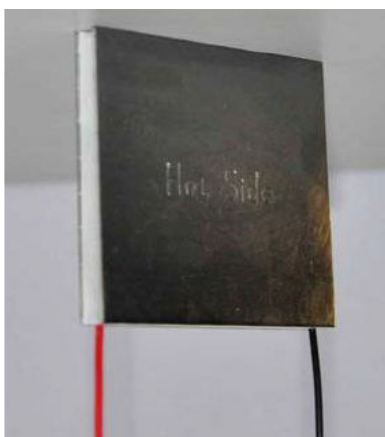


Figura 2.7 – Módulo Termoelétrico TEHP1-24156-1.2 [21]

Existem também módulos de múltiplos estágios, conforme mostra a Figura 2.8. São projetados para atender grandes diferenças de temperatura. Estes módulos podem ter até 20mm de altura, dependendo do número de camadas [17].

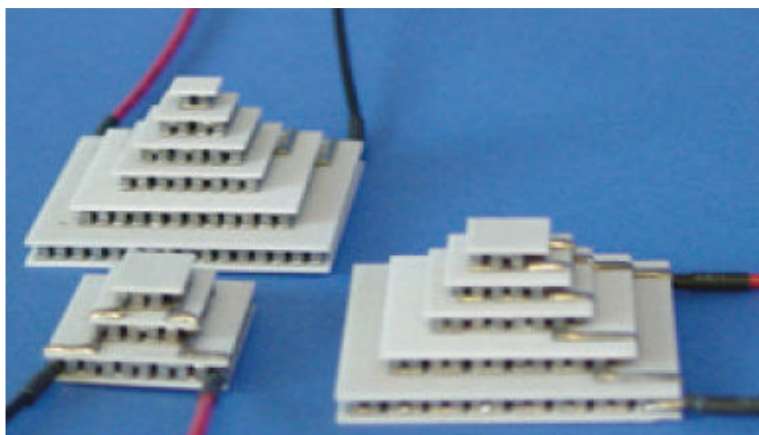


Figura 2.8 – Módulo Termoelétrico com Múltiplas Camadas [8]

Os módulos termoeétricos que estão sendo desenvolvidos para a gerao de energia, s3o mais compactos, com o objetivo de aumentar a pot4ncia obtida por 3rea [6].

2.1.2.1 Transdutor Termoeétrico

Um termopar 4 composto por dois condutores met3licos distintos, de metal puro ou ligas homog4neas. Os dois metais s3o soldados numa extremidade (T_q), que vai ao local onde se deseja fazer a medi3o de temperatura. A outra extremidade dos condutores (V_{out}) 4 utilizada para a medi3o, como se pode verificar na Figura 2.9 [3].

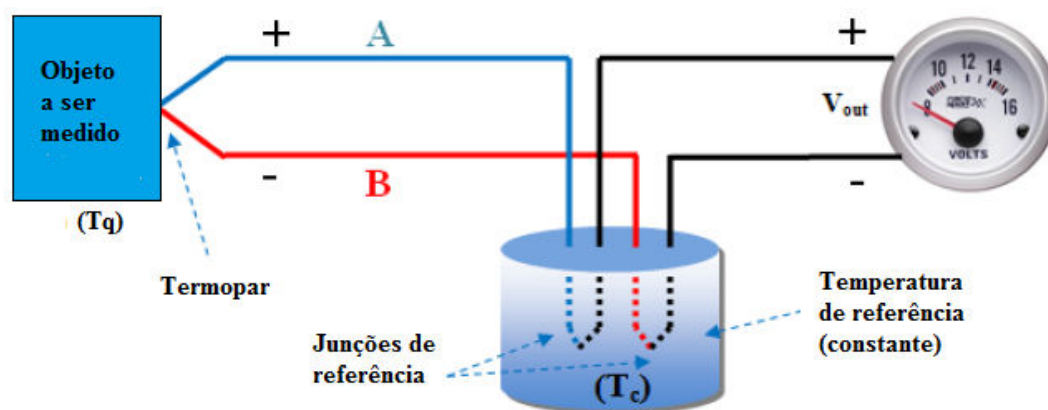


Figura 2.9 – Princpio de funcionamento de um termopar [7].

Destaca-se que o funcionamento dos termopares 4 um exemplo de aplica3o do efeito *Seebeck*, onde a tens3o gerada 4 proporcional ao gradiente de temperatura (ΔT) entre as extremidades do sensor.

Os termopares t4m a fun3o de medir a diferen3a de temperatura entre dois pontos, por este motivo 4 obrigat3rio determinar a temperatura de uma das junoes, para saber a temperatura da outra. A jun3o de refer4ncia geralmente 4 feita por circuitos eletr3nicos. 4 importante que a linearidade do sensor seja a maior possvel de forma a obter um menor erro e maior exatid3o [3].

Os materiais para a fabrica3o de termopares devem ser selecionados levando em conta alguns fatores. A estabilidade, ou seja, as propriedades do material n3o devem alterar significativamente com a sua utiliza3o e os materiais devem ser est3veis no ambiente onde est3o operando. A homogeneidade, ou seja, 4 importante que o material n3o seja homog4neo apenas ao longo de uma dada amostra, mas t4m, a partir de amostra para

amostra, de modo que uma calibração de um termopar seja válida para um lote inteiro. Os termopares ainda devem possuir uma boa capacidade de conversão termoelétrica e uma baixa condutividade térmica [18].

Dentre os diversos tipo de termopares pode-se medir uma gama de temperaturas que podem variar de 20K até 1700K, sabendo que a variação do coeficiente de *Seebeck* não é linear com a temperatura. Um número muito grande de combinações de materiais tem sido considerado para a termometria, mas apenas nove combinações foram padronizadas e atualmente são comercialmente encontradas, sendo que estas combinações são designadas por letras de identificação, como mostrado na Tabela 2.1 [18].

Tabela 2.1 – Tipos de termopares e suas faixas de medição de temperatura [18]

| Tipo | Material | Faixa de temperatura para medição [K] |
|------|--|---------------------------------------|
| B | Pt+30%Rh vs. Pt+6%Rh | 1640 – 1970 |
| C | W+5%Re vs. W+26%Re | 1920 - 2590 |
| E | 90%Ni+10%Cr vs. 55%Cu+45%Ni | 370-1170 |
| J | 99,5%Fe vs. 55%Cu+45%Ni | 370- 1030 |
| K | 90%Ni+10%Cr vs. 95%Ni+2%Al+2%Mn+1%Si | 370-1530 |
| N | 84%Ni+14%Cr+1,5%Si vs. 95%Ni+4,5%Si+0,1%Mg | 920-1530 |
| R | Pt+13%Rh vs. Pt | 1140-1720 |
| S | Pt+30%Rh vs. Pt | 1250-1720 |
| T | Cu vs. 55%Cu+45%Ni | 70-620 |

Os transdutores termoelétricos são utilizados no setor industrial devido à sua linearidade, precisão e estabilidade ser melhor que as de um termistor e de uma termoresistência [3]. Uma grande vantagem deste transdutor deve-se a sua área de medida (junção) ser bastante reduzida, enquanto as suas desvantagens são relacionadas à sua fragilidade e efeitos não desejáveis. Como por exemplo, erros relacionados às distâncias dos cabos de ligação, aquecimento e sensibilidade de pressão [22].

2.1.2.2 Refrigeração Termoelétrica

Segundo o efeito *Peltier*, nesta aplicação uma corrente contínua é aplicada aos terminais do módulo, fazendo com que surja uma diferença térmica entre o lado superior e

o inferior do conversor termoelétrico. A Figura 2.10 mostra o funcionamento de um módulo termoelétrico operando como refrigerador.

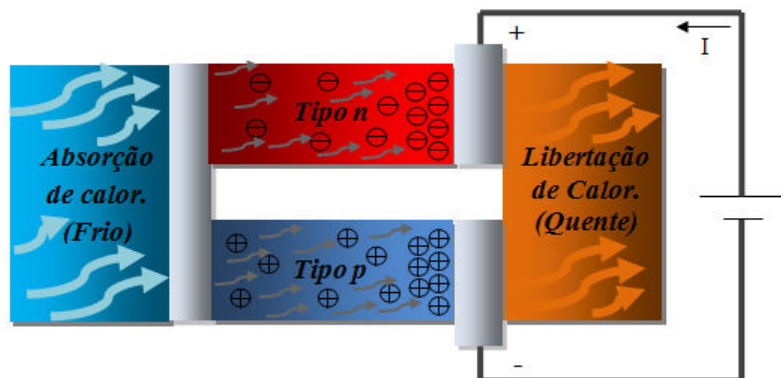


Figura 2.10 – Funcionamento do módulo termoelétrico como refrigerador [3]

Então, o calor é sempre absorvido na junção fria. Os elétrons e as lacunas se deslocam sempre da junção fria para a junção quente e o calor é sempre libertado na junção quente do módulo termoelétrico [3]. É válido lembrar que a capacidade calorífica da célula é proporcional à intensidade da corrente e depende da geometria, do número de pares de elementos e do material utilizado na célula [1, 7].

O coeficiente de desempenho (COP) para o sistema de refrigeração utilizando materiais termoelétricos ainda não apresenta desempenhos elevados, mas estuda-se como sendo o calor absorvido na extremidade fria dividido pela potência elétrica a ser aplicada. A quantidade de calor que venha a ser dissipado na extremidade da parede quente do material resume-se como sendo a soma do calor absorvido na extremidade fria, mais a potência elétrica a ser aplicada.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad [adm] \quad (7)$$

Onde:

- COP - Coeficiente de desempenho [adm];
- Q_c - Calor Líquido absorvido [W]; e
- P_{in} - Potência de Entrada [W].

Logo, pode-se dizer que a potência de entrada é o calor dissipado subtraído do calor que fora absorvido.

$$P_{in} = Q_h - Q_c \quad [W] \quad (8)$$

Onde:

- P_{in} - Potência de Entrada [W];
- Q_h - Calor Dissipado [W]; e
- Q_c - Calor Absorvido [W].

Desta forma, pode-se expressar o coeficiente de desempenho como (Eq. 8), sendo:

$$COP = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \quad (9)$$

Sendo assim, o coeficiente de temperatura resume-se em uma combinação de calor dissipado e calor absorvido. A equação 9 pode ser compreendida conforme a Figura 2.11, onde mostra a dissipação na extremidade quente e a dissipação na extremidade fria.

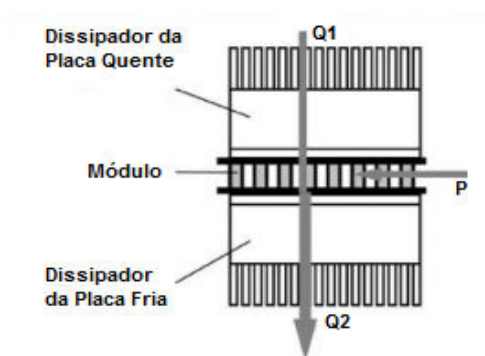


Figura 2.11 - Modelo Característico do Sistema de Transferência Térmica [23]

Com a análise nas equações e na Figura 2.11, conclui-se que o coeficiente de desempenho (COP) representa quantas vezes o calor é removido em relação à unidade de potência de entrada [23].

Atualmente encontram-se produtos utilizando módulos termoelétricos. Dentre estes produtos estão os bebedouros, adegas, incubadoras, caixa para transporte de órgãos, câmaras para armazenagem de vacinas, refrigeradores portáteis, entre outros [8]. A figura 2.12 mostra um esquema de um refrigerador termoelétrico, bem como o modelo de um refrigerador portátil [6].

No modelo apresentado na figura 2.12 é possível visualizar o local onde fica o

módulo termoelétrico. Este ao receber tensão e corrente da fonte de alimentação apresenta o diferencial de temperatura, ou seja, um lado frio e outro quente, sendo que o lado frio do trocador de calor ficará no interior do refrigerador e o lado quente do trocador de calor ficará no lado externo, constituído por um dissipador de calor e ventoinhas.

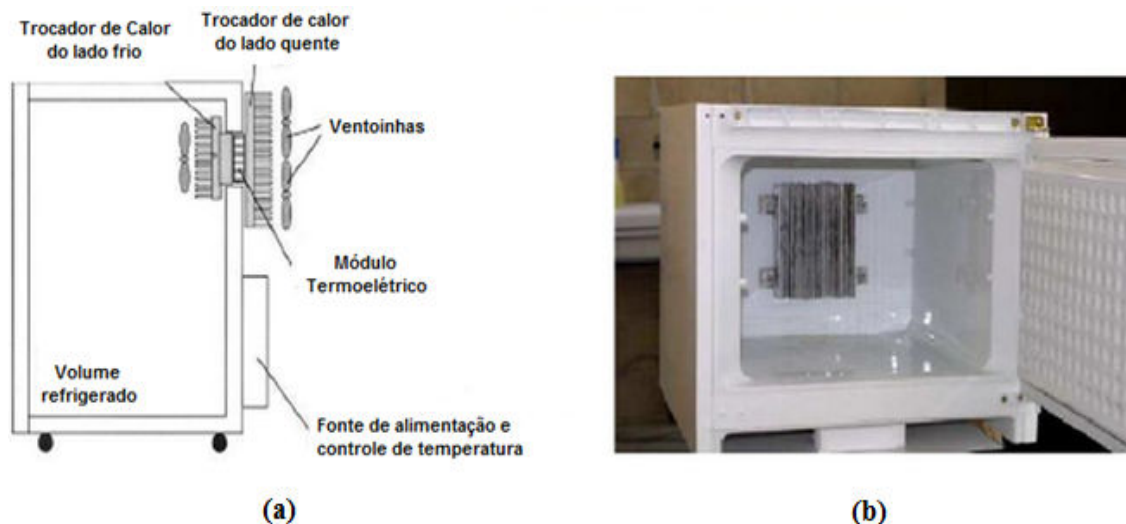


Figura 2.12 – Esquema de um Refrigerador Termoelétrico (a), Refrigerador Portátil (a) [6]

As vantagens da utilização de módulos termoelétricos em um sistema de refrigeração, comparados a outros sistemas, é que os módulos além de possuírem alta durabilidade e precisão, necessitam de um pequeno espaço físico, logo seu peso também é menor. Não apresentam vibrações e nem ruídos durante a operação, não utilizam gases como em sistemas de refrigeração convencionais e não possuem partes móveis. Podem operar em qualquer orientação espacial e, quando bem controlados, garantem um controle de temperatura sem oscilações [17].

Os coeficientes de desempenho apresentados em materiais termoelétricos tem sido inferior aos comparados com os coeficientes do ciclo de Carnot, este que é o mais tradicionalmente utilizado em processos de refrigeração, conseqüentemente possui baixo rendimento e elevado custo de produção [8].

As eficiências entre um processo e outro podem ser comparadas tomando como base as máximas eficiências (η) alcançadas entre as temperaturas de trabalho. A Figura 2.13 apresenta um comparativo entre as máximas eficiências (η) dos módulos termoelétricos e dos refrigeradores a compressor.

Conforme pode ser visto na Figura 2.14, as diferenças são consideráveis entre os rendimentos (η). Enquanto as eficiências de compressores Ciclo Otto chegam a 66%, os

sistemas de refrigeração termoelétricos possuem índice de eficiência ou rendimento entre 10 e 15% [18].

Atualmente, estão sendo realizadas pesquisas no sentido de se aumentar as eficiências e minimizar o custo de fabricação destes módulos, através da obtenção de materiais termoelétricos mais abundantes, de menor custo, e com uma tecnologia de fabricação dos termoelementos e de confecção do produto final mais acessível para inclusão no mercado [18].

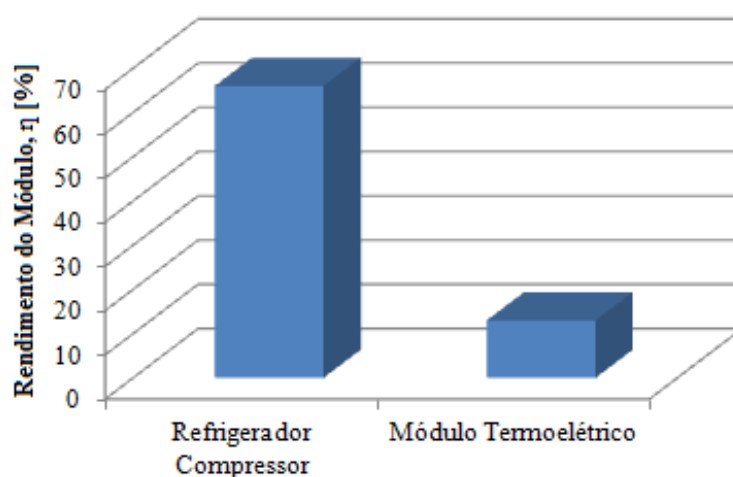


Figura 2.13 – Comparativo entre o rendimento do módulo termoelétrico e a refrigeração com compressor [18].

Uma característica importante dos módulos termoelétricos é o fato de não utilizarem partes mecânicas móveis, o que tem atraído o interesse da microeletrônica no resfriamento localizado em dispositivos, uma vez que a tecnologia pode ser diretamente integrada aos circuitos microeletrônicos [24].

2.1.2.3 Geração Termoelétrica

A geração de energia termoelétrica baseia-se no efeito de *Seebeck*, ou seja, uma geração de diferença de potencial entre duas junções quando elas estão em diferentes temperaturas bem como, uma geração de um gradiente de temperatura quando duas junções são alimentadas por uma tensão, respectivamente [10]. Ao comparar a termoeletricidade com as usinas termoelétricas existentes, os materiais termoelétricos reduzem alguns passos, tal como, o aquecimento de água para geração de vapor.

O gradiente de temperatura entre a face quente e a face fria é diretamente

proporcional à tensão elétrica gerada, conforme pode ser vista na Figura 2.14. Quando o calor é aplicado a uma superfície do gerador termoeletrico, os elétrons do material do *tipo-n*, e as lacunas do material do *tipo-p* irão se mover para longe da fonte de calor. Este movimento de elétrons e lacunas dá origem a uma corrente elétrica. O sentido da corrente é oposto ao movimento dos elétrons, logo no mesmo sentido que o movimento das lacunas [3].

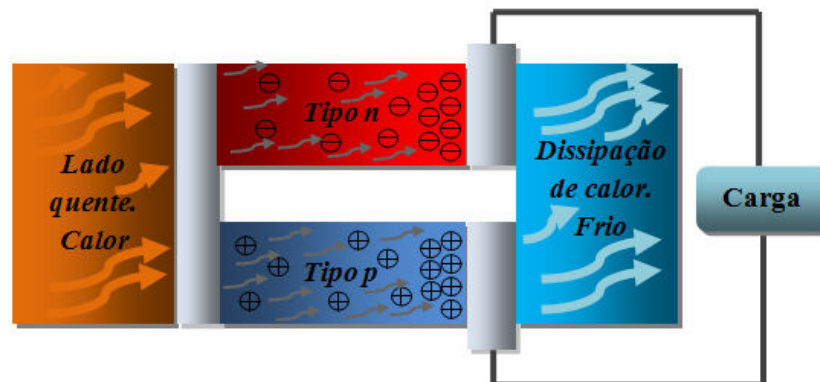


Figura 2.14 – Funcionamento do módulo termoeletrico como gerador [3]

Os módulos termoeletricos são formados por muitas junções do *tipo p* e do *tipo n*. Cada uma delas produz uma tensão na ordem de centenas dos miliVolt, sendo a tensão total multiplicada pelo número de junções (n) e é expressa através da seguinte equação [3, 26]:

$$V = n (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T \text{ [V]} \quad (10)$$

Onde:

- V - Tensão gerada pelo módulo termoeletrico [V];
- n - Número de junções;
- α_p e α_n - Coeficientes *Seebeck* dos materiais condutores [$V \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$]; e
- ΔT é a diferença de temperatura [$^\circ\text{C}$].

O rendimento de um módulo termoeletrico acresce com o gradiente de temperatura e com o aumento da área da secção transversal. Por outro lado, quanto maior o comprimento e a condutibilidade térmica menor é a eficiência [18]. A resistência elétrica interna de um módulo termoeletrico é um parâmetro muito importante, pois a máxima

transferência de energia é obtida quando a resistência elétrica interna do conversor é igual à resistência elétrica da carga [3].

2.2 Estado da Arte

Nos anos 60, o fenômeno termoelétrico esteve no seu auge, quando se pensava que em breve todas as aplicações de refrigeração iriam ser substituídas por dispositivos baseados no Efeito *Peltier*. Nas últimas quatro décadas não houve grande desenvolvimento na área. O coeficiente de desempenho dos dispositivos para arrefecimento por Efeito *Peltier* está ainda 4 a 5 vezes abaixo do coeficiente dos sistemas de refrigeração convencionais. Com o aparecimento de novos materiais e novos métodos de processamento, a termoeletricidade tem despertado o interesse em investigações científicas e na indústria. As aplicações de arrefecimento (módulos *laser*, aplicações biomédicas) e de geração de energia para utilização em *chips* autônomos, onde a utilização de baterias não é adequada, tem motivado o interesse por esta área [9].

No entanto, a investigação tem sido essencialmente orientada no sentido de encontrar novos materiais de elevado desempenho (especialmente recorrendo a nanoestruturas) ou na melhoria de desempenho dos conversores termoelétricos convencionais (tendo como principal objetivo final a refrigeração em aplicações domésticas e a geração de energia no automóvel através das perdas de calor).

Comercialmente, encontram-se para aquisição produtos utilizando o efeito *Peltier*, como por exemplo, os bebedouros, adegas, incubadoras, caixa para transporte de órgãos, câmaras para armazenagem de vacinas, refrigeradores farmacêutico portáteis, entre outros. Estes utilizam a energia elétrica para obter a refrigeração ou o aquecimento, ao contrário do que é proposto no projeto.

Nos automóveis o reaproveitamento de parte da energia térmica libertada no escapamento começou a ser estudado e a mostrar progressos muito recentemente. O primeiro gerador termoelétrico foi construído e publicado por Neild, em 1963 [9].

Atualmente, os materiais termoelétricos são amplamente utilizados em processos de refrigeração transformando energia elétrica em energia térmica [6]. Porém, sua utilização dos módulos termoelétricos está limitada a pequenos volumes ou refrigeração localizada devido a sua viabilidade técnica e econômica [5].

Nos dias atuais têm-se discutido muito sobre fontes de energias limpas e

renováveis, conseqüentemente, a energia proveniente do fenômeno termoelétrico surgiu como uma alternativa dentre as possibilidades. Logo, a utilização de módulos termoelétricos apresenta certas vantagens, como uma alta durabilidade, grande precisão e volume reduzido, além de ser uma excelente forma de captação de energia térmica residual, ou seja, é uma cogeração de energia limpa [17].

No entanto, as pesquisas têm sido essencialmente orientadas no sentido de encontrar novos materiais de elevado desempenho, principalmente recorrendo a nanoestruturas, ou na melhoria do desempenho dos módulos termoelétricos convencionais. Recentemente, pesquisadores norte-americanos também descobriram novos desempenhos em materiais termoelétricos existentes. A equipe de terras raras gerenciada pelo Doutor Evgenii Levin descobriu que ao adicionar o equivalente a 1% de cério ou itérbio ao composto Bi_2Te_3 , os módulos termoelétricos melhoraram o desempenho em até 25% [17].

Os estudos ainda não explicam o porquê de tal melhoramento, porém os cientistas teorizam que a quantidade mínima de elemento aplicado é suficiente para afetar a estrutura cristalina da liga, fazendo com que aperfeiçoe o efeito *Seebeck*. Os estudos estão ainda mais concentrados por este resultado, pois o Doutor Evgenii garante que quando descobrirem a real causa deste efeito poderá ser encontrada formas para ampliá-lo ainda mais, ou ainda, de procurar por outros elementos ou compostos que são capazes de aumentar ainda mais os efeitos termoelétricos [5].

As pesquisas continuam e têm como objetivo final a descoberta de qual é a estrutura cristalina de um material termoelétrico ideal, onde se considera como ideal uma eficiência em média de 20%, nível este que, conforme os especialistas preconizam viabilizará aplicações industriais e domésticas em grande escala. Os resultados recentes obtidos por estes estudos servem como motivação para novas pesquisas, novos projetos e novas descobertas.

A seguir apresentam-se estudos sobre a utilização dos materiais termoelétricos para conversão de energia e os recentes avanços para aplicação dos módulos termoelétricos.

2.2.1 Utilização em Veículos à Combustão

Após cerca de 25 anos, o pesquisador Birkholz publicou resultados do gerador termoelétrico implementado em conjunto com a Porsche no escapamento do modelo 944. Em 1987 a Hi-Z Technology integrou um programa com o objetivo de criar um gerador

termoelétrico capaz de gerar 200W de energia elétrica por conversão de calor que foi publicado em 1991. Numa segunda fase desse programa e com a ambição de gerar 1kW de energia elétrica, foi implementado para testes um gerador termoelétrico, em meados de 1993, num caminhão. Nos testes iniciais, apenas foram gerados cerca de 400W sendo alcançados 1068W após uma série de otimizações. Foram detectados alguns problemas mecânicos durante a fase de testes em veículos sendo utilizados novos conversores HZ-14 para testes de durabilidade [9].

Nos anos seguintes o gerador termoelétrico foi modificado para adaptar a um veículo utilitário esportivo híbrido para gerar 180W de energia elétrica e com a capacidade de carregar baterias de 300V. Em 1999, a Hi-Z Technology iniciou o estudo para construir e testar um gerador termoelétrico para gerar entre 300W e 330W elétricos e com um sistema capaz de carregar baterias de 12 e 24V, alimentando as luzes do automóvel e outros dispositivos e gerou 150W nos resultados apresentados em 2004 [9].

Em 2005, a BSST, BMW, Visteon e Marlow Industries publicaram na *DEER Conference* os resultados do estudo para implementação de um gerador termoelétrico num BMW série 5, com motor de cilindrada 3000 cc, sendo capaz de gerar 500W elétricos com uma diferença de temperatura de 207°C. O consórcio de empresas prevê atingir 1kW de energia elétrica pretendendo comercializar o gerador termoelétrico nos próximos anos [4].

Os autores afirmam conseguirem uma poupança até 10% no uso de combustível. A Volkswagen e a *Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr* (IAV) pretendem implementar um gerador termoelétrico num Volkswagen Golf capaz de alimentar todos os dispositivos eletrônicos do automóvel. Outros fabricantes de automóveis, como a Honda, estão estudando e testando geradores termoelétricos nos seus automóveis. Apesar dos grandes avanços nas últimas décadas neste campo, a energia elétrica produzida é praticamente apenas suficiente para alimentar os dispositivos do automóvel [9].

Logo, combinando a recuperação de calor do escapamento de automóvel com as perdas do sistema de refrigeração seria possível gerar quantidades significativas de energia elétrica. Alguns trabalhos indicam que utilizando conversores termoelétricos com uma eficiência de 5 % seria possível aumentar em 6 % (1 % do sistema de refrigeração e 5 % do escapamento) a energia elétrica num carro híbrido [9].

No gerador apresentado na Figura 2.15 percebe-se que ao redor do catalisador existem 3 faixas onde estão fixados os módulos termoelétricos e conectados para um aumento da potência de saída.



Figura 2.15 - Gerador termoelétrico de 180W para um veículo utilitário esportivo híbrido [9].

Em 2005 a BMW desenvolveu um gerador que produzia uma potência elétrica de 500 Watts com um gradiente de temperatura de 207°C , conforme pode ser visto na Figura 2.16 [9].

Na Figura 2.16 é possível notar que a bateria é carregada através dos módulos termoelétricos que estão localizados na parte de exaustão de gases do motor, local onde a temperatura é elevada logo, maior será a potência de saída do módulo.

A porcentagem de combustível que é desperdiçada pelos gases e a quantidade que é aproveitada pelo motor, estão representadas na Figura 2.17. Pode-se visualizar que as perdas nos motores à combustão são de aproximadamente 57% de gases queimados que podem ser convertidos em energia, resultando em potências de até 200Watts [26].



Figura 2.16 - Gerador termoelétrico aplicado no automóvel da BMW [9]

Tendo em vista que apenas 33% da combustão é transformada em trabalho, estudos mostraram a possível utilização do restante, ou seja, 57% que será perdido. Tendo em vista que em um automóvel existe um sistema de refrigeração, utilizado especificamente para refrigerar o motor, pode-se então gerar um gradiente de temperatura aplicando um material

termoelétrico entre o catalisador e o silenciador do automóvel e ter um canal do refrigerador até o material. O gradiente de temperatura é gerado, e por consequência uma microgeração de energia.

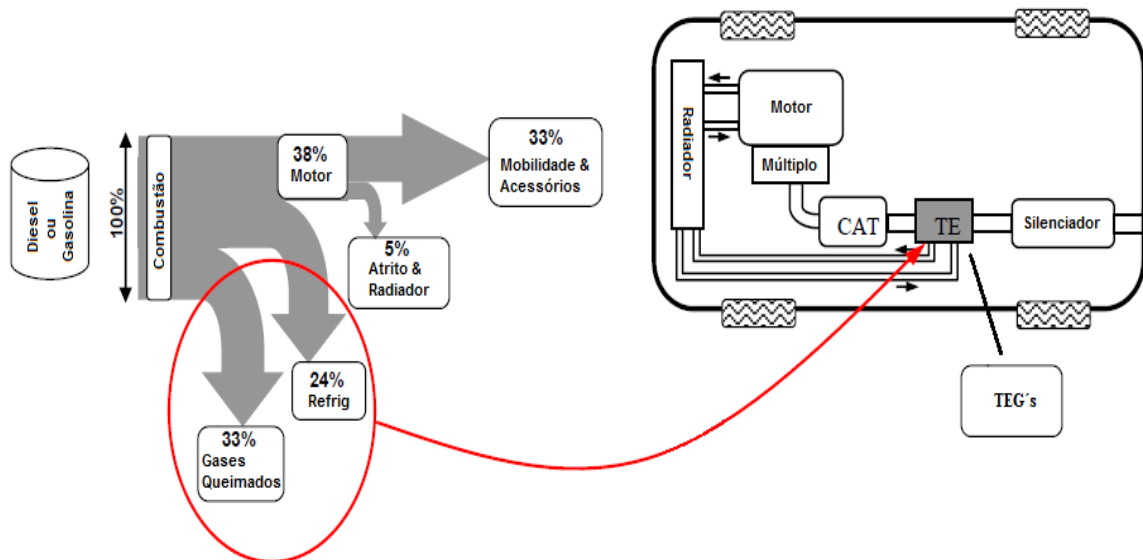


Figura 2.17 – Distribuição da combustão em um automóvel [26]

É válido destacar que combinando a recuperação de calor do escapamento de automóvel com as perdas do sistema de refrigeração, que foram mostradas na Figura 2.17, seria possível gerar quantidades significativas de energia elétrica. Alguns trabalhos indicam que utilizando conversores termoelétricos com uma eficiência de 5% seria possível aumentar em 6% (1% do sistema de refrigeração e 5% do escapamento) a energia elétrica num carro [27].

Atualmente, o dispositivo está sendo projetado para ser inserido apenas no sistema de escapamento, onde o tubo é cortado e o dispositivo é inserido. Porém, conforme Gregory Meisner, um dos cientistas responsáveis por este estudo, é preciso projetar algo que seja mais incorporado ao sistema. Meisner ainda garante que em um futuro próximo estes dispositivos serão tão comuns como os catalisadores são nos dias atuais. A Figura 2.18 demonstra como estão sendo empregados os materiais termoelétricos em automóveis.

Nos Estados Unidos, pretende-se em 2020 ter 90% dos carros com geradores termoelétricos para sistemas de refrigeração interna, e assim substituir os condicionadores de ar. Isso pouparia cerca de 5% da média diária atual do consumo de gasolina do país e reduziria a emissão de gases causadores do efeito estufa [27].

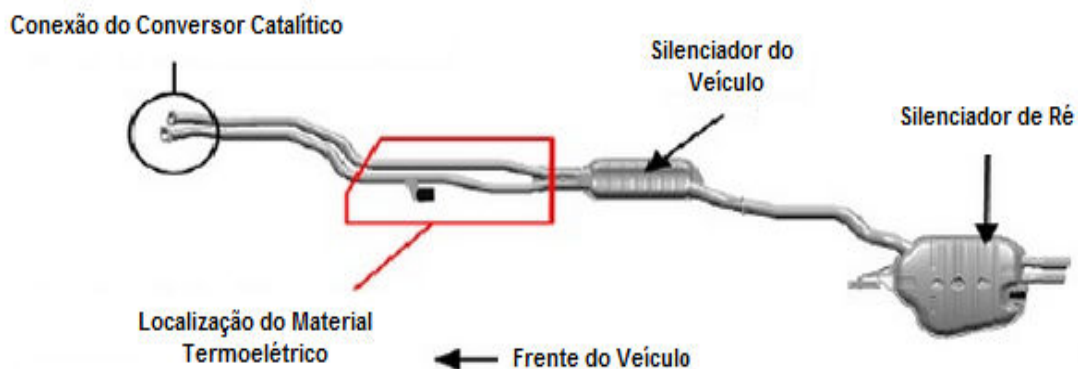


Figura 2.18 – Experiências de Automóveis Equipados com Material Termoelétrico [9]

2.2.2 Utilização na Indústria Aeroespacial

As primeiras aplicações dos módulos termoelétricos foram na sonda espacial *Voyager I* desenvolvida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Atualmente existem várias naves espaciais que utilizam esta tecnologia para suas “missões espaciais”.

A utilização dessas no espaço ocorre devido à necessidade de energia, com simplicidade e pouco peso, e superam largamente as perdas em ineficiência [5]. Na Figura 2.19, como exemplo a sonda *Voyager*, é possível observar onde está localizado o gerador termoelétrico e as demais composições da sonda.

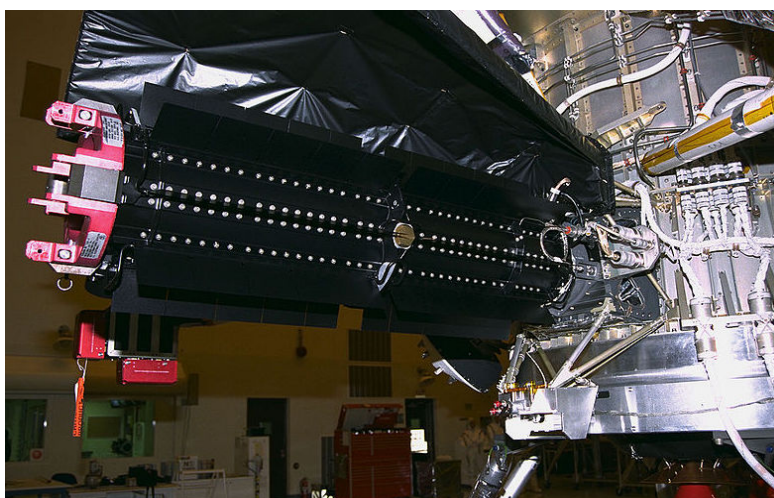


Figura 2.19 – Demonstrativo do RTG da Sonda *Voyager* [28]

Como estas missões exigem segurança e confiabilidade para uma longa duração da energia e do aquecimento da espaçonave, são utilizadas fontes com *Radioisotope*

Thermoelectric Generator (RTG), que são baterias nucleares que convertem calor em eletricidade. Os termopares em RTG usam como fonte de calor a decomposição natural de plutônio radioativo-238, e utilizam o frio do espaço exterior para produzir uma temperatura baixa na junção fria do termopar [28].

Um novo modelo de RTG é o *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator* (MMRTG), que está sendo projetado para operar em corpos planetários com atmosferas como Marte, bem como no vácuo do espaço. Além disso, o MMRTG é um projeto mais flexível e modular capaz de satisfazer as necessidades de uma ampla variedade de missões, pois ele gera energia elétrica em pequenos incrementos, chegando rapidamente em 100Watts. O projeto do MMRTG é apresentado na Figura 2.20.

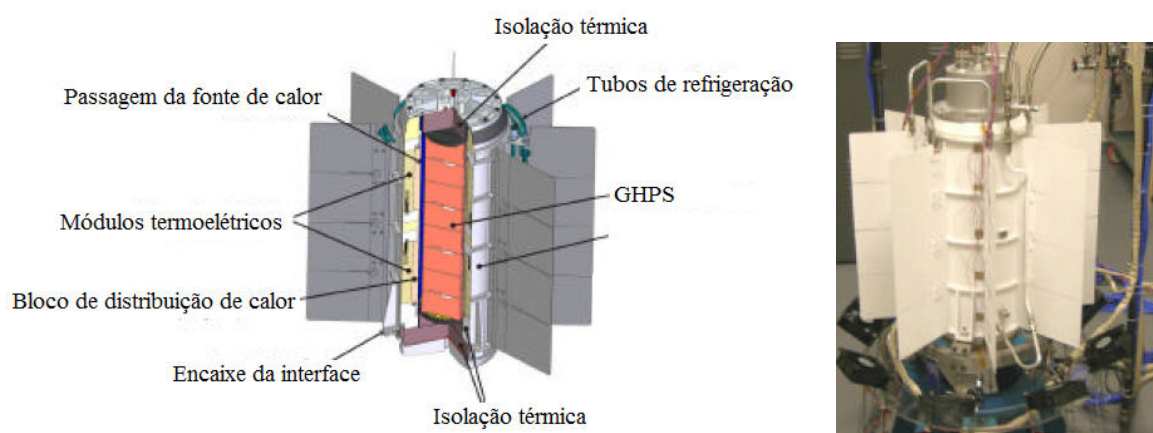


Figura 2.20 – Projeto do MMRTG [28].

Os objetivos do projeto para o MMRTG apresentado na Figura 2.21, incluem garantir um elevado grau de segurança, otimizando os níveis de energia ao longo de um tempo de vida mínimo de 14 anos, além de minimizar o peso. O MMRTG foi projetado para usar uma fonte de calor composto por oito módulos com Fonte de Calor de Uso Geral. O MMRTG contém um total de 4,8 kg (10,6 lb.) de dióxido de plutônio que inicialmente fornece cerca de 2.000Watt de potência térmica e 120Watt de potência elétrica [28].

A redução do consumo de energia elétrica e o aproveitamento da energia disponível na aeronave é um fator importante na aviação comercial, pois contribui para a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera e reduz os custos operacionais [19].

Na refrigeração de alimentos e bebidas para manter alimentos e bebidas em baixas temperaturas e no sistema de ar condicionado do *cockpit*, são utilizadas máquinas de ciclo a vapor muito grandes, pesadas e ineficientes, que utilizam fluidos refrigerantes que produzem danos ao meio ambiente. Os compressores e os ventiladores dos trocadores de

calor causam ruídos. Enquanto os sistemas de refrigeração através dos módulos termoeletrônicos são leves, portáteis e ocupam pouco espaço; são silenciosos e possuem baixo consumo de energia [19].

Para o resfriamento de componentes eletrônicos em aeronaves utilizam-se ventiladores para fazer a exaustão do ar quente das caixas eletrônicas. Com o sistema de resfriamento de componentes eletrônicos embarcados por meio de módulos termoeletrônicos é utilizado apenas consumo de energia CC, sendo que o sistema termoeletrônico é mais eficiente, mais leve, compacto e de menor consumo. Além disso, possuem mínima manutenção e são de confiabilidade superior o que é uma característica muito importante na avaliação de segurança de voo [19].

A Figura 2.21 mostra as temperaturas na superfície do motor de um avião. Estas temperaturas são bem elevadas, representando um bom local para aplicação dos módulos termoeletrônicos.

Estudos da *Boeing Research and Technology* mostram que a aplicação dos módulos ainda está limitada devido à eficiência e ao custo, mas comprovam uma redução no peso do avião, e uma redução superior a 0,5% de combustível, onde nos Estados Unidos nos primeiros 4 meses de 2009 foram gastos 2,415 bilhões de dólares em combustíveis, e com esta redução pode-se economizar 12,075 milhões de dólares por mês [29].

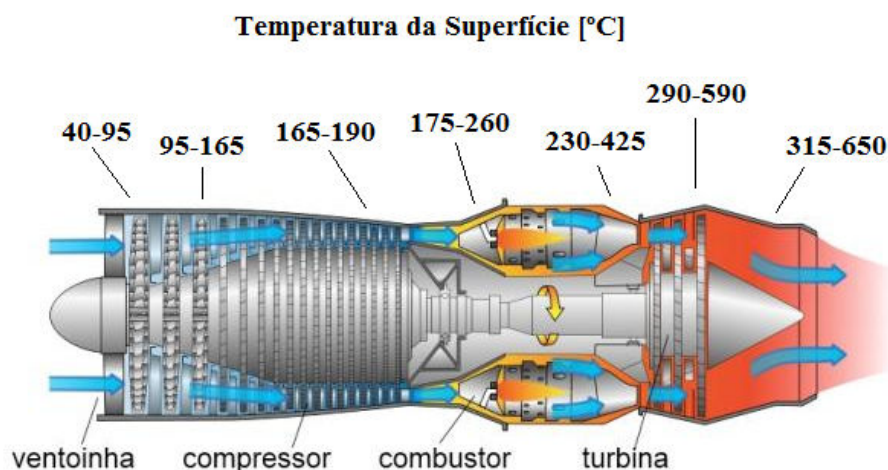


Figura 2.21 – Temperaturas da superfície de uma Turbina de avião [29]

2.2.3 Utilização em Instalações Residenciais e Prediais

Devido à necessidade da conservação de energia, cada vez mais surgem estudos para aplicação dos módulos termoeletrônicos e assim, muitas alternativas. Por exemplo, em

instalações residenciais, testes em fogões a lenha já foram feitos e em instalações prediais. A aplicação de módulos termoelétricos na parede de edifícios também vem sendo estudada.

2.2.3.1 Utilização do Efeito Termoelétrico em Instalações Residenciais

Dentre os estudos para aplicações em uso residencial destacam-se duas aplicações de módulos termoelétricos em fogão a lenha. O primeiro estudo para esta aplicação foi desenvolvido pela *Hi-Z Technology* em 2002. O mesmo é apresentado na Figura 2.22 sendo capaz de gerar 20W e uma tensão de saída de 12 a 14 Vcc [30], enquanto o segundo estudo utiliza-se de um fogão a lenha convencional.

Inicialmente, os testes começaram pela medição da temperatura para mapeamento da superfície com um termômetro infravermelho chegando-se aos seguintes resultados: temperatura ambiente de 28°C. A área mais quente do fogão está no topo da fornalha e a região mais fria fica abaixo do poço de cinzas. Com base nos resultados, a melhor localização para o módulo termoelétrico seria perto do canto superior direito ao lado do fogão, onde permitirá o maior gradiente de temperatura [31], conforme apresentado na Figura 2.23.



Figura 2.22 – Fogão a lenha desenvolvido pela *Hi-Z technology* [30].

Os módulos foram revestidos com pasta térmica em ambas as extremidades e colocados no meio de uma placa de alumínio com a pressão aplicada a eles por meio de

dissipador de calor, o qual foi mantido no lugar por um mecanismo de fixação ajustável, apresentado pela Figura 2.24 [31].



Figura 2.23 – Fogão a lenha em que foi realizado o experimento [31].

As leituras de tensão e temperatura foram feitas no computador por um sistema de aquisição de dados. Os termopares do tipo K foram colocados abaixo da placa de alumínio e do dissipador de calor.

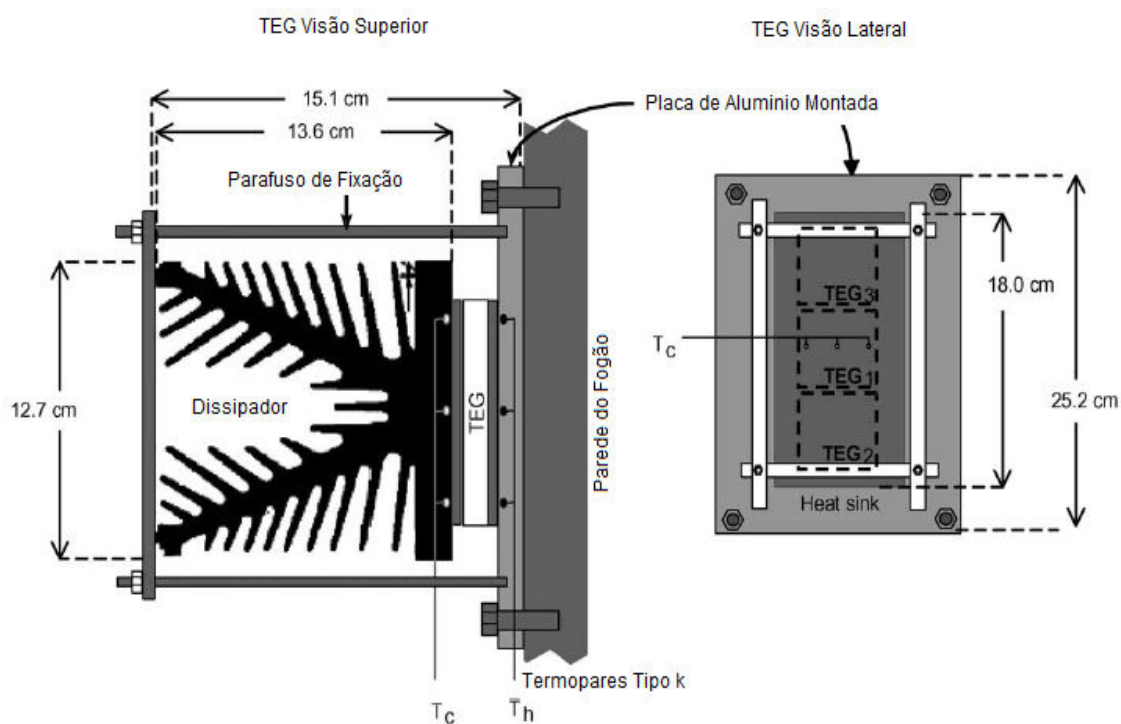


Figura 2.24 - Fixação dos módulos termoelétricos na parede do fogão a lenha [31]

A Figura 2.25 mostra o gráfico da tensão (V) de circuito aberto do módulo termoelétrico onde com o passar do tempo a diferença de temperatura ($\Delta T = T_{\text{quente}} - T_{\text{frio}}$) aumenta até ficar estável. Com isso, a tensão de saída ($V_{\text{saída}}$) também vai aumentando proporcionalmente com o gradiente de temperatura.

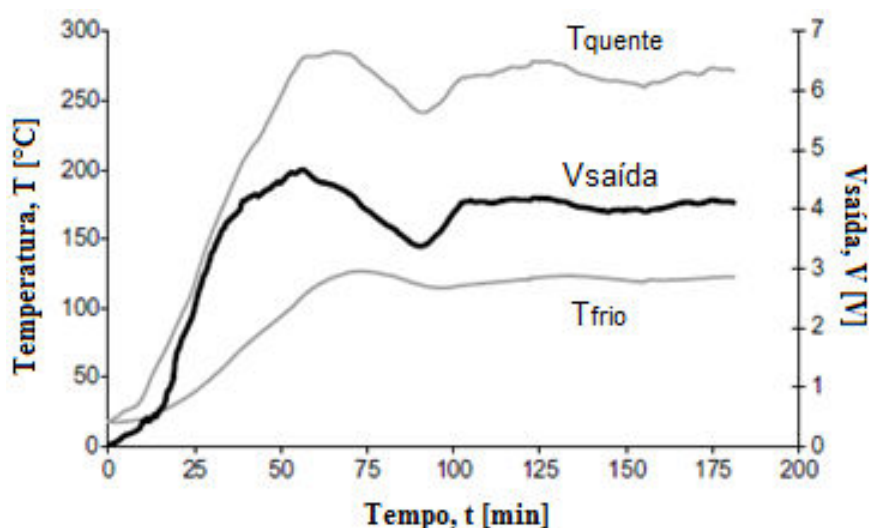


Figura 2.25 – Tensão de circuito aberto do módulo termoeletrico [31].

A tensão de saída com o circuito aberto e as temperaturas de fonte quente foram medidas a partir de 90 minutos, após o estado de equilíbrio de temperatura ter sido alcançado. O número de módulos montados sob o dissipador de calor variou de um a três, com estes ligados eletricamente em série. Após os 90 minutos, a operação do fogão estabilizou com uma temperatura média lado quente de 275°C e uma temperatura do lado frio de 123°C. Com esta diferença de temperatura de 152°C, o módulo produz uma tensão de circuito aberto de 4,1V [31].

Com dois módulos a tensão aumentou para 5,5V e com três foi para 5,7V. O previsto seria que cada módulo adicionasse mais 4,1V à tensão de saída. Isso não ocorreu, pois a temperatura da superfície quente diminuiu com o aumento do número de módulos, devido ao fato de que com um aumento do número de módulos, a taxa de transferência de calor através da superfície do fogão para o módulo aumenta, causando uma queda na temperatura. Com base na tensão de circuito aberto medida, um único módulo proporciona a maior saída de carga de $4,2 \pm 0,08$ W para operação em estado estacionário. Contudo este resultado depende da natureza da combustão e das características de transferência de calor do forno [31].

2.2.3.2 Utilização do Efeito Termoelétrico em Instalações Prediais

O projeto em questão propõe uma montagem nas janelas do prédio da Universidade de Illinois com o objetivo de suprir o consumo de energia elétrica de um prédio com salas comerciais. A diferença de temperatura fica por conta da temperatura exterior em relação à interior [25]. Na Figura 2.26 é mostrado o *layout* de uma parede do prédio, demonstrando como será a disposição do sistema de geração.

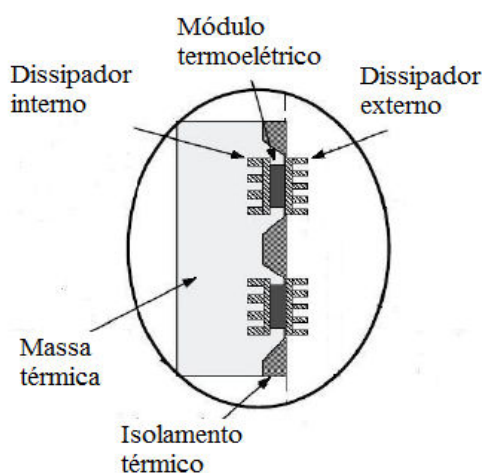


Figura 2.26 – *Layout* da parede do prédio com os módulos termoelétricos [25]

O escritório possui cargas elétricas de iluminação, computadores, monitor, impressora e *scanner*. Várias razões foram levadas em consideração para a escolha deste local. Em primeiro lugar, há um grande número de prédios antigos no campus que tem o mesmo formato. Logo, pode aplicar-se futuramente o mesmo projeto em outros prédios. Em segundo lugar, os escritórios do edifício são pequenos quartos separados então pode separar-se tudo em cargas menores, uma para cada quarto [25].

Para os testes usou-se uma sala com 4,5mx3mx3m. Para a análise da viabilidade preliminar foi considerada a espessura da parede de 0,5m e em apenas em uma das quatro paredes laterais foram usados os módulos termoelétricos. A diferença média de temperatura entre o interior e o exterior, analisada durante seis meses do ano foi de 18°C. Além disso, foi considerado que todos os módulos termoelétricos absorvem quantidades iguais de calor, que a área dos dispositivos é igual a da parede (3mx3m) e que cada módulo tem 3cm x 3cm e estão ligados eletricamente em paralelo [25].

As características de consumo de energia do local também foram estudadas, para calcular quantos módulos termoeétricos são necessários. O espaço a ser iluminado precisa de 2 a 4 luminárias de baixa tensão, bem como uma tensão de 19V e uma corrente de 3A para alimentar o *notebook*, e 24V e 1,1A para alimentar o *scanner* [25].

No geral, para fornecer a quantidade de energia adequada precisa-se de 57W para o *notebook*, 24,1W para o *scanner*, 64 a 128W para a iluminação e 127W para a impressora. Foram feitas medidas 8 horas por dia do escritório e foi visto que a energia necessária para suprir o escritório é de 435W por hora. Para isso foram utilizados para compensar esta carga, os módulos termoeétricos modelo 127cpl/0.4A da *Thermoelectric Inc.* com potência máxima fornecida podendo chegar a 5W de potência. Logo, foram utilizados cerca de 90 módulos termoeétricos, os quais cabem perfeitamente na área da parede, para suprir a potência requisitada pela sala [25].

2.2.3.3 Utilização do Efeito Termoeétrico em Instalações Industriais

O setor industrial também inicia estudos para a aplicação de materiais termoeétricos, baseado no efeito *Seebeck*, para captação de energia residual em fornos industriais ou até mesmo em dutos e chaminés.

A Figura 2.27 apresenta o modelo de um dispositivo para recuperação industrial de calor, onde o calor residual é absorvido pelo bloco de coleta de aquecimento. O módulo termoeétrico está fixado no exterior do dispositivo, exposto a um lado quente e outro frio.

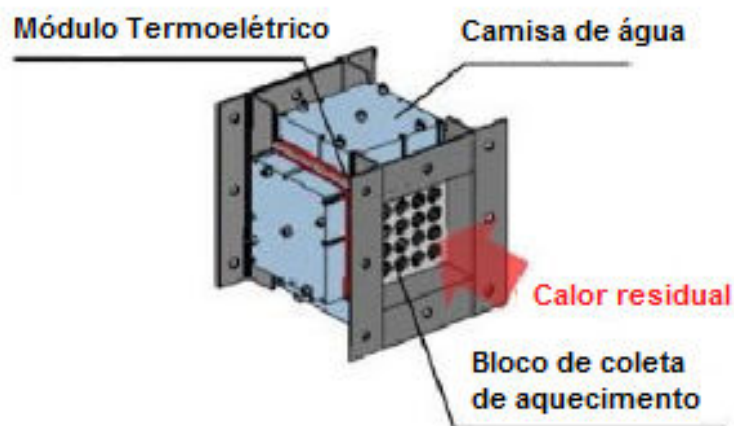


Figura 2.27 – Dispositivo Para Recuperação Industrial de Calor [26]

Em utilizações mais avançadas o pesquisador europeu *Wulf Glatz* foi premiado pelo seu trabalho de microgeração termoelétrica. Assim como os demais materiais termoelétricos, o processo de microgeração de energia não necessita de queima de combustíveis para gerar energia, mas somente pelo gradiente de temperatura (ΔT) em consequência do efeito *Seebeck* [27]. Contribuindo assim para o estudo dos materiais termoelétricos, desenvolvendo um dispositivo de pequeno porte, flexível e versátil, não contendo partes móveis, o que colabora com o baixo custo de manutenção. Substituindo a liga de níquel-cobre por uma de telúrio de bismuto, a geração de potência que se alcança com esta liga é duas vezes maior do que a maior potência já verificada em dispositivos do mesmo princípio. Inicialmente seu produto não trabalha em faixas de temperatura como a do corpo humano, como também não apresenta a possibilidade de transformar eletricidade em calor, conforme o efeito *Peltier*. Sistemas como este são uma forma promissora de energia não poluente. Fato este que o "*GreenTEG*" demonstrado na Figura 2.28, nome dado ao produto, resfria ambiente ao sequestrar o calor, contudo gerando energia ao invés de a gastar [27].

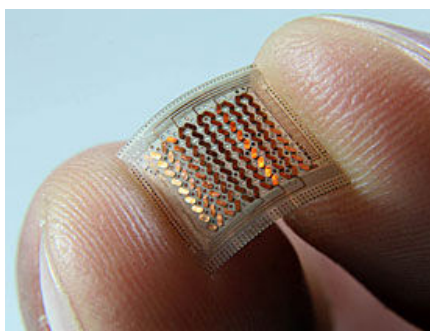


Figura 2.28 – Demonstrativo do *GreenTEG* [27].

2.2.4 Utilização do Efeito Termoelétrico em Pequenos Gradientes de Temperatura

Com o foco em um projeto para um sistema de geração de energia e a viabilidade dos materiais para termopares, foi realizada uma pesquisa visando utilizar a baixa diferença de temperatura para a geração de eletricidade, utilizando ventilação forçada e uma plataforma com canais para circulação de ar.

Os materiais dos termopares utilizados apresentam significativas capacidades de conversão termoelétrica, sendo ideais para a utilização na geração de energia [32].

Este sistema é uma “caixa” retangular, bem isolada na sua superfície exterior e

possui alternadas camadas do painel do gerador até a passagem de escoamento. Nos dois lados do painel, o ar circula através de um procedimento alternativo de contracorrente. Em cada canal, o escoamento de ar revela uma diminuição linear da temperatura, assim parte do ar é utilizada para a conversão de energia elétrica, e a restante é transmitida através do painel para dentro do canal de linha seguinte. O último canal é resfriado com o ar ambiente. Uma vez que a queda de temperatura disponível pode ser dividida entre os canais em paralelo, cada dois canais vizinhos produzem diferença de temperatura, logo geram eletricidade [32].

O sistema compreende uma geração forçada de ar para circulação e uma unidade permutadora de calor de vários estágios. Conforme se pode verificar na Figura 2.29, os números 1 e 2 representam o material *tipo-p* e o material do *tipo-n*, respectivamente, enquanto o número 3 representa a placa de aço e o número 4 o isolante elétrico, sendo as temperaturas do lado quente (T_h) e lado frio (T_c) e, por fim, a resistência (R_L) representa a carga a ser alimentada com a corrente (I).

Como visto na Figura 2.29, o sistema é composto por canais de fluxo de ar, com paredes gerando eletricidade utilizando elementos termoeletrônicos dispostos eletricamente em série. Neste sistema, o ar atmosférico e os ventiladores elétricos fornecem a convecção forçada necessária para o fluxo de ar através dos canais [32].

Em ambientes refrigerados a ar, estes geradores caracterizam-se por dois fatores. A condutividade elétrica é mantida alta, mesmo se a temperatura atmosférica está abaixo de 0°C e a energia de saída responde rapidamente a mudanças nas temperaturas por causa da condutividade térmica elevada destes termopares [32].

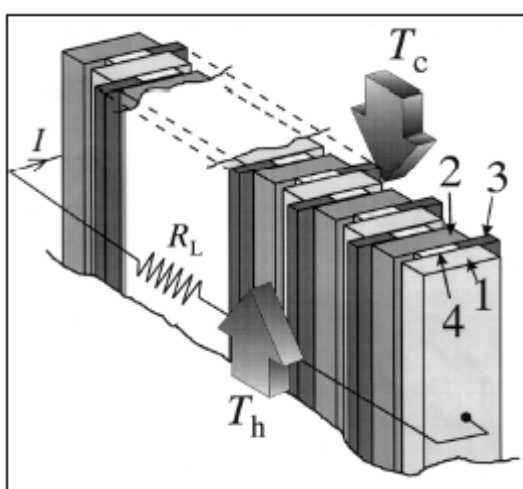


Figura 2.29 – O gerador conectado por meio de uma série de canais [32].

Na Figura 2.30, verifica-se a potência de saída específica da junção termoeétrica em função da diferença de temperatura de junção e a espessura do material *tipo-p*.

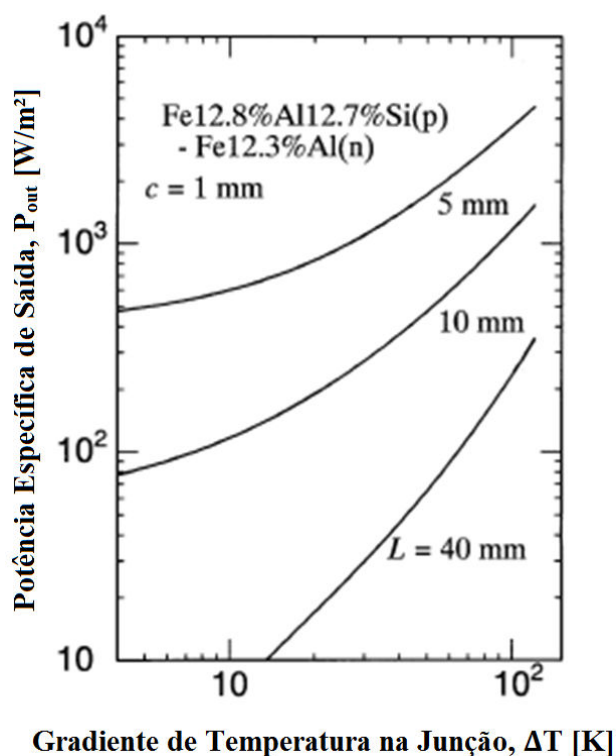


Figura 2.30 – Curva referente a potência de saída à junção termoeétrica [32].

Na Figura 2.30 é possível observar que a potência de saída aumenta conforme aumenta a diferença de temperatura, e conforme diminui a espessura do material *tipo-p*.

2.2.4.1 Utilização para Microgeração Termoeétrica na Área Eletrônica

Para utilização com a função de alimentar sensores, um módulo termoeétrico é acoplado junto a um sensor autônomo, com a finalidade de colocar o sensor sobre uma fonte de calor. Isto faz com que o módulo termoeétrico gere uma tensão o suficiente para alimentar o sensor sem precisar de uma fonte de energia elétrica externa [33].

O módulo termoeétrico utilizado é o módulo TGM-254-1.0-1.3, com dimensões de 40mm de lado e 3,6mm de espessura, composto de 254 pares termoeétricos conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo [33]. Na Tabela 2.2 é possível verificar suas máximas tensões (V) e correntes de saída (I), bem como seu rendimento (η) [33].

Tabela 2.2 - Características de geração do módulo TGM-254-1.0-1.3

| TGM-254-1.0-1.3 | Temperatura Face Fria (Tf) = 0°C | | | | Temperatura Face Quente (Tq) = 50°C | | | |
|-----------------|----------------------------------|--------------|--------------|----------------|-------------------------------------|--------------|--------------|----------------|
| | Tensão [V] | Corrente [A] | Potência [W] | Eficiência [%] | Tensão [V] | Corrente [A] | Potência [W] | Eficiência [%] |
| | 7,7 | 1,1 | 8,5 | 5,8 | 5,1 | 0,74 | 3,8 | 3,8 |

No experimento um dos lados do módulo foi aquecido por um aquecedor, enquanto um dissipador de calor foi aplicado sobre o outro lado para manter a temperatura baixa. As temperaturas nas duas faces do módulo termoeletrico foram medidas usando dois termistores NTC. A diferença de temperatura variou de 0°C a 13°C, conforme é observado na Figura 2.31 [33].

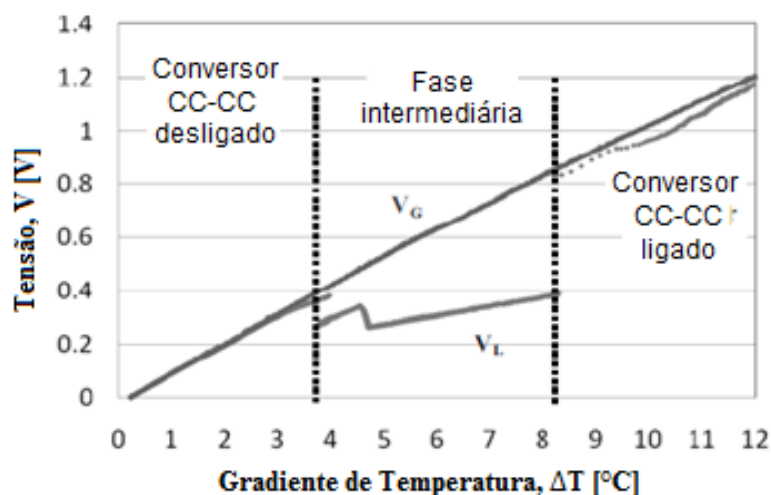


Figura 2.31 – Gráfico da tensão de saída do módulo em função da temperatura [27].

Quando o gradiente de temperatura é inferior a 3°C, o conversor CC-CC está desligado. Neste caso, o módulo termoeletrico não está carregando sobre o Efeito *Seebeck*. Acima de 4°C, o conversor de *step-up* é ligado, mas não por completo, apenas como fonte de auxílio. Quando a diferença de temperatura atinge um valor de 8,5°C, o conversor *step-up* liga completamente e o sensor passa a depender somente do módulo termoeletrico para manter-se ligado. A tensão necessária para manter o sensor ligado somente pelo módulo é de 2,1V, obtida em teste. Com este valor é possível alimentar o microcontrolador e o sensor de temperatura que necessitam de uma potência de 0,9mW e uma corrente de 0,4mA [33].

2.2.4.2 Utilização para Geração Termoelétrica em Equipamentos Portáteis

A capacidade de fabricar pequenos termoelementos semicondutores permite obter quantidades muito pequenas de calor para aplicações de baixa potência, tais como microdispositivos em redes de sensores sem fio, dispositivos móveis e até mesmo em equipamentos médicos. Várias técnicas com filmes finos têm sido utilizadas para produzir pequenos módulos termoelétricos. As empresas *Micropelt*, *Nextreme* e *Thermo Life*, estabeleceram recentemente a produção destes dispositivos [14].

O relógio de pulso é um bom exemplo da captação da energia termoelétrica. O relógio é “alimentado” pelo calor do corpo convertendo a energia térmica do corpo em energia elétrica. Dois modelos foram construídos, um pela *Seiko* e outro pela *Citizen* [14]. Conforme pode ser visto na Figura 2.32, o relógio *Seiko* sob a operação normal produz $22\mu\text{W}$ de energia elétrica. Com apenas um $1,5^\circ\text{C}$ de queda de temperatura a tensão de circuito aberto é de 300mV [34].



Figura 2.32 – Relógio *Citizen Eco-Drive* (esquerda) e *Seiko Thermic* (direita) [1].

O relógio *Citizen Eco-Drive Thermo* possui um gerador termoelétrico com 1242 junções e produz uma tensão de 640mV com a potência de $13,8\mu\text{W}$ por cada grau centígrado de diferença de temperatura. Já o *Seiko Thermic*, com 1040 elementos *Peltier* gera aproximadamente 200mV nas mesmas condições [35].

Quanto ao desenvolvimento na área dos microgeradores, alguns são os grupos de pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento de um gerador termoelétrico utilizando o corpo humano como fonte de calor.

O grupo de *Bert Gyselinckx* projetou um gerador termoelétrico para ser usado numa

rede de sensores corporal. O gerador termoelétrico desenvolvido pode ser visto na Figura 2.33, o qual utiliza módulos comerciais sendo aplicados em redes de sensores. O dispositivo é colocado no local mais conveniente do corpo, de modo a obter o máximo calor corporal possível e, conseqüentemente, a máxima energia. Nestes dispositivos foram utilizados módulos termoelétricos de telureto de bismuto (Bi_2Te_3). Inicialmente o dispositivo foi capaz de armazenar uma potência média de $100\mu\text{W}$ na bateria e obter uma tensão de saída de $2,4\text{V}$ [36].

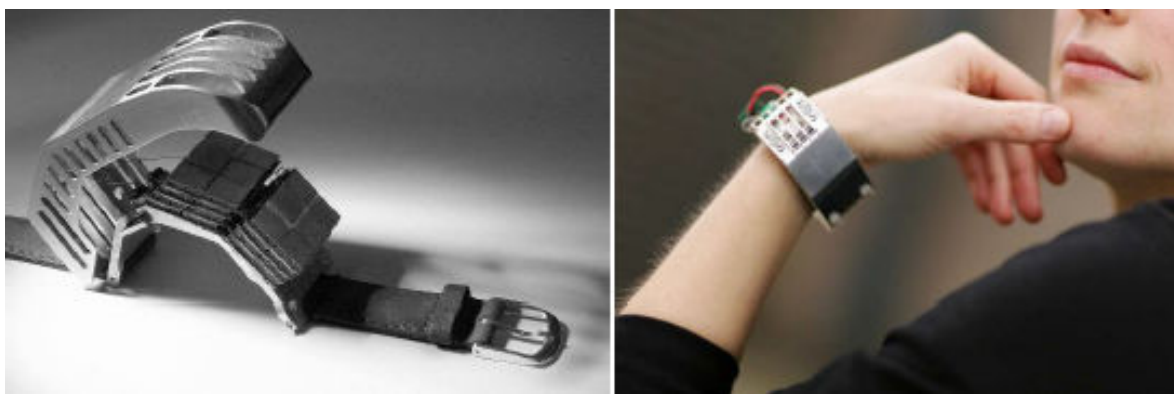


Figura 2.33 – Protótipo do gerador termoelétrico [1].

O grupo de J. Penders desenvolveu o primeiro sistema de monitoração de saúde alimentado por geradores termoelétricos, em que um oxímetro de pulso sem fios (Figura 2.34), é alimentado por um gerador do tipo relógio de pulso e também um sistema de monitoração sem fios, (Figura 2.35), autônomo, alimentado por um gerador termoelétrico utilizado na cabeça. A potência é de $30\mu\text{W}/\text{cm}^2$ para uma tensão superior a 4V quando posicionado no pulso [37].

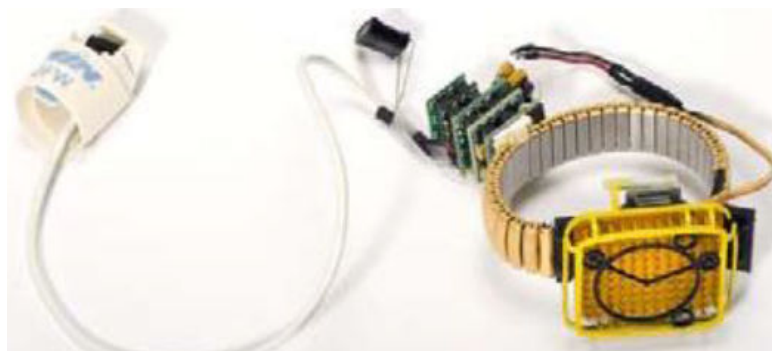


Figura 2.34 – Oxímetro de pulso sem fios [1].

Na Figura 2.34 está o oxímetro, onde à esquerda está o sensor que é colocado no dedo para a medição da quantidade de oxigênio no sangue; junto a ele já está o *display* para monitoração. À direita da figura está a pulseira que fará a alimentação do oxímetro, por meio da diferença de temperatura entre o pulso humano e o meio exterior.



Figura 2.35 – Sistema de monitoração EEG sem fios [1].

O grupo de Ziyang Wang desenvolveu um gerador termoelétrico, que pode também ser usado no pulso. Este gerador pode ser visto na Figura 2.36.



Figura 2.36 – Gerador termoelétrico de pulso desenvolvido pelo grupo de Ziyang Wang [1].

No gerador da Figura 2.36 cada dispositivo termoelétrico contém 2350 ou 4700 junções térmicas. A tensão de saída do gerador termoelétrico chega próximo a 150mV em condições normais e uma potência de saída de 0,3nW [38].

2.2.4.3 Utilização do Efeito Termoelétrico na Geração de Energia Solar

Um modelo teórico foi apresentado para melhorar a eficiência dos módulos termoelétricos. Diferentemente dos modelos atuais disponíveis, este modelo tem em conta o efeito de todos os parâmetros que contribuem para o processo de transferência de calor associado com o dispositivo termoelétrico. O modelo é usado para uma avaliação comparativa de quatro módulos termoelétricos. Um destes é comercialmente disponível e os outros são considerados possuidores de uma geometria ótima, mas com diferentes parâmetros de projeto (térmico e propriedades da camada elétrica de contato) [39].

Os resultados do modelo são comparados com os dados experimentais do módulo comercial no modo de geração de energia, com um gradiente de temperatura feito por um sistema concentrador de energia solar [39].

O dispositivo termoelétrico DT1089 da *Marlow Industries Inc.*, EUA, foi selecionado para fins de teste. A placa quente de cerâmica foi pintada de preto para melhorar a captação da radiação incidente, tendo sido conectada uma resistência de carga variável nos terminais do dispositivo para permitir a medição das características de corrente e tensão. A fonte de calor foi fornecida por luz a partir de uma concentração de calor de infravermelhos de 175W, usando um concentrador cônico para fornecer uma radiação uniforme sobre a superfície do dispositivo.

Com este arranjo, uma energia radiante de $2\text{W}/\text{cm}^2$ foi obtida sobre a superfície da placa cerâmica. A temperatura de junção a frio foi mantida por circulação de água fria por meio de um trocador de calor ligado à placa fria do dispositivo termoelétrico [39].

A Figura 2.37 mostra as curvas características de cada módulo, onde o módulo 1 (comercial) apresentou um rendimento abaixo dos demais módulos estudados. Para cada módulo foi encontrado o comprimento ideal do termoelemento através de cálculos baseados na teoria, onde para uma diferença de temperatura de 70°C o comprimento encontrado foi de $0,075\text{cm}$ [39].

O modelo é usado para otimizar as dimensões do termoelemento para contato das várias propriedades da camada e para prever o desempenho teórico de um módulo termoelétrico comercial. A comparação indica que o desempenho do módulo comercial é inferior ao que se baseia no comprimento do elemento ótimo, principalmente aqueles com camadas de contato melhoradas. Isso enfatiza a importância da otimização de geradores

termoelétricos com base na potência máxima, inclusive quando estão sendo considerados projetos para aplicações onde o custo da energia de entrada é baixo, como no caso da conversão de energia solar. Os resultados também destacam a importância do uso de dispositivos com propriedades melhoradas na camada de contato [39].

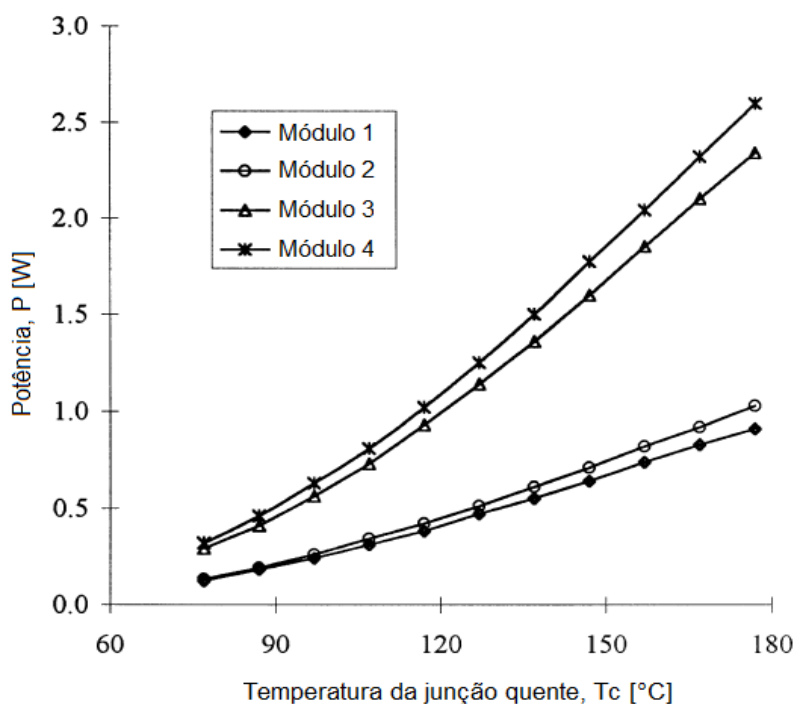


Figura 2.37 – Relação do desempenho dos módulos termoelétricos testados [39].

2.2.5 Estudos Recentes da Utilização da Termoeletricidade

O artigo intitulado *Autonomous Sensor System with RF Link and Thermoelectric Generator for Power Harvesting* apresenta uma proposta para a utilização de termogeradores para alimentação de sensores autônomos com *link* em rádio frequência em substituição das baterias convencionais [40]. A Figura 2.38 apresenta a estrutura de blocos do senso autônomo.

O artigo intitulado *Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy* apresenta uma proposta capaz de gerar eletricidade e água quente, utilizando um coletor solar como fonte de aquecimento solar de água, enquanto para o resfriamento é utilizado o sistema de *heat pipe* que está embutido dentro de um dissipador de calor e imerso em um tanque de água para gerar o gradiente de temperatura para alimentar o termogerador [41]. A Figura 2.39 apresenta a montagem do gerador termoelétrico proposto.

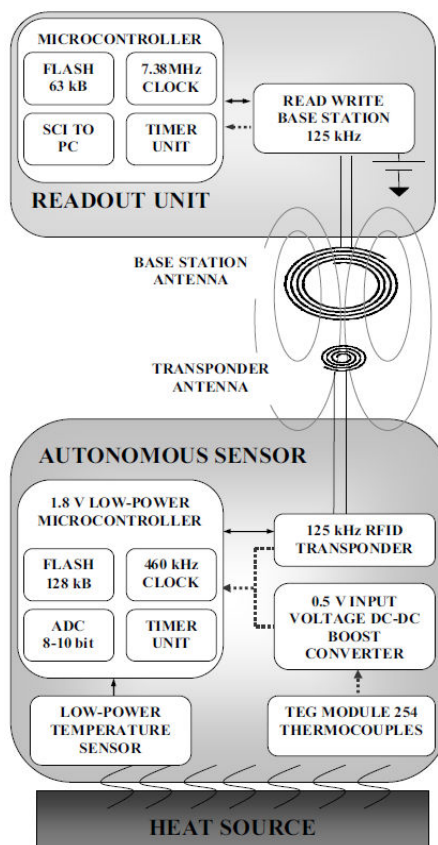


Figura 2.38 – Diagrama de blocos do sensor autônomo [40]

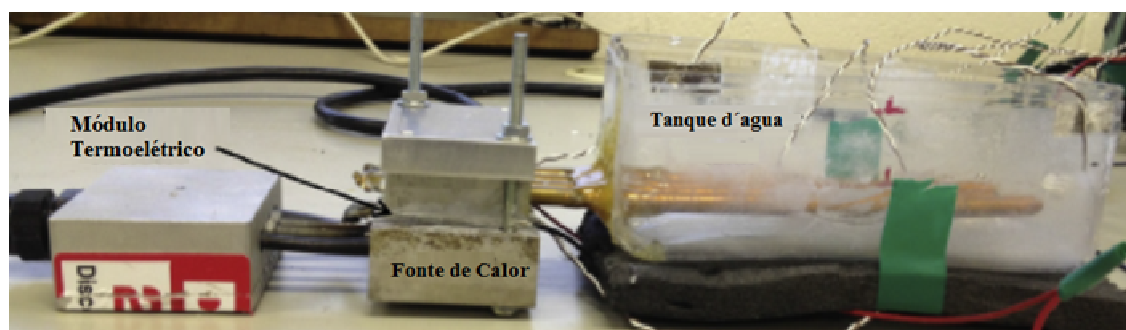


Figura 2.39 – Demonstrativo da montagem experimental do gerador termoelétrico [41]

O artigo intitulado *Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions* apresenta um estudo experimental de módulos termoelétricos utilizados para a geração de energia por meio da recuperação de calor de baixa temperatura em diferentes condições de funcionamento e operação. O estudo apresenta uma breve análise do comportamento dos módulos quando associados em série bem como, uma análise comparativa entre módulos termoelétricos e geradores termoelétricos [42]. A Figura 2.40 apresenta o esquema experimental para análise dos TEG's desenvolvido.

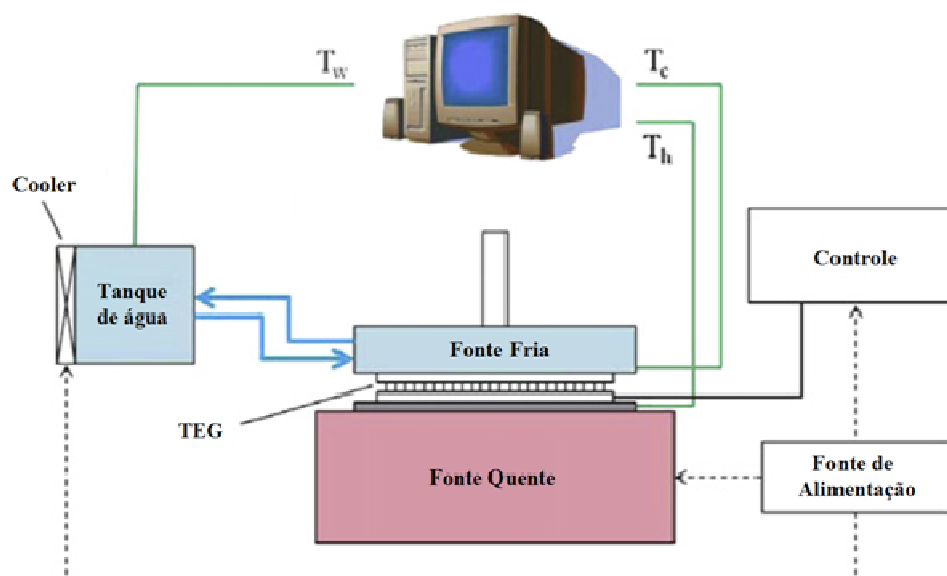


Figura 2.40 – Demonstrativo do esquema experimental para análise dos TEG's [42]

O artigo intitulado *Experimental studies of thermoelectric power generation in dynamic temperature environments* apresenta o projeto e caracterização de um termogerador de baixa potência que consiste de um módulo termoelétrico de telureto de bismuto padrão, alocado entre dois trocadores de calor, com diferentes massas térmicas e examinar os efeitos do tamanho do trocador de calor e seleção de materiais, período de oscilação das flutuações de temperatura e transferência de calor por radiação na produção de energia termoelétrica [43]. A Figura 2.41 apresenta a geometria do dispositivo testado.

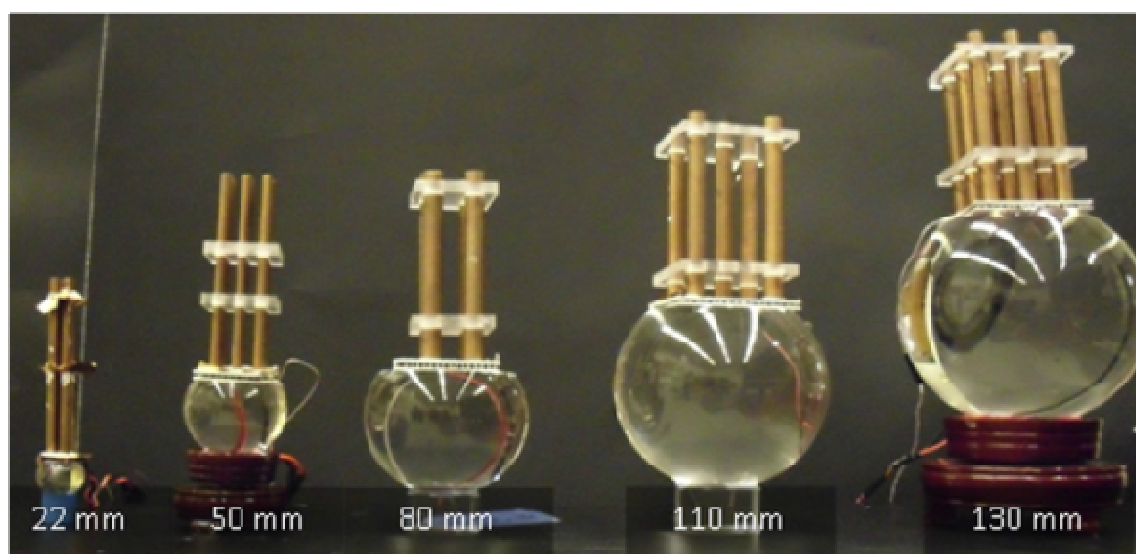


Figura 2.41 – Demonstrativo da geometria do dispositivo testado [43]

O artigo intitulado *Thermoelectric power generation driven by blast furnace slag flushing water* apresenta o projeto de um dispositivo de geração de energia termelétrica para aproveitamento do calor residual de uma siderúrgica, onde são analisados os efeitos de alguns parâmetros, tais como a temperatura de operação, o comprimento do elemento termoeletrico, o fator de empacotamento do módulo termoeletrico e a influência do fluxo de calor sobre o desempenho do dispositivo [44]. A Figura 2.42 apresenta o dispositivo de geração de energia termelétrica desenvolvido.



Figura 2.42 – Dispositivo de geração de energia termelétrica experimental [44]

O artigo intitulado *Liquid metal based thermoelectric generation system for waste heat recovery* apresenta o conceito técnico e a prototipagem de um termogerador com bombeamento de metal líquido para recuperação de calor, que combina módulos comerciais com uma bomba eletromagnética que serve para capturar e transportar o calor para o gerador termoeletrico, obtendo um gradiente de 100°C e uma eficiência global calculada de 2% [45]. A Figura 2.43 apresenta o portótipo desenvolvido.

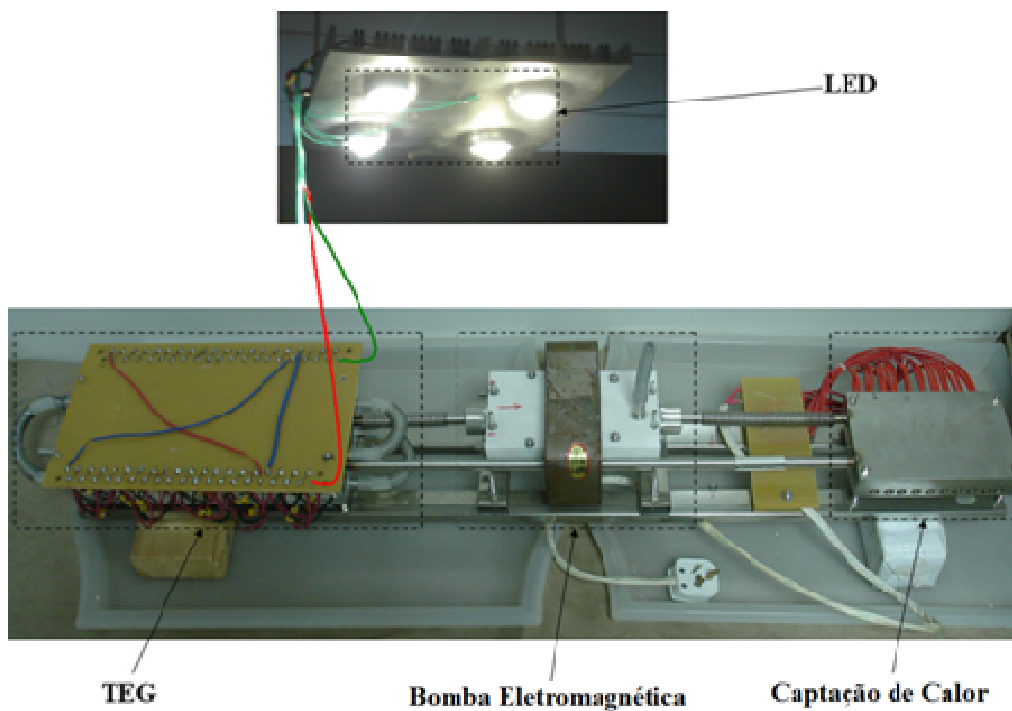


Figura 2.43 – Protótipo do TEG (metal líquido) [45]

O artigo intitulado *A potential candidate for the sustainable and reliable domestic energy generation - Thermoelectric cogeneration system* apresenta um sistema de cogeração termoelétrica para a melhoria da eficiência energética residencial que prima pela sustentabilidade visando recuperar ao máximo o calor disponível por meio da geração de energia elétrica e produção de água quente. Para isso desenvolveu-se um protótipo experimental em escala laboratorial para validação do sistema [46]. A Figura 2.44 apresenta o diagrama e foto da bancada de teste utilizada.

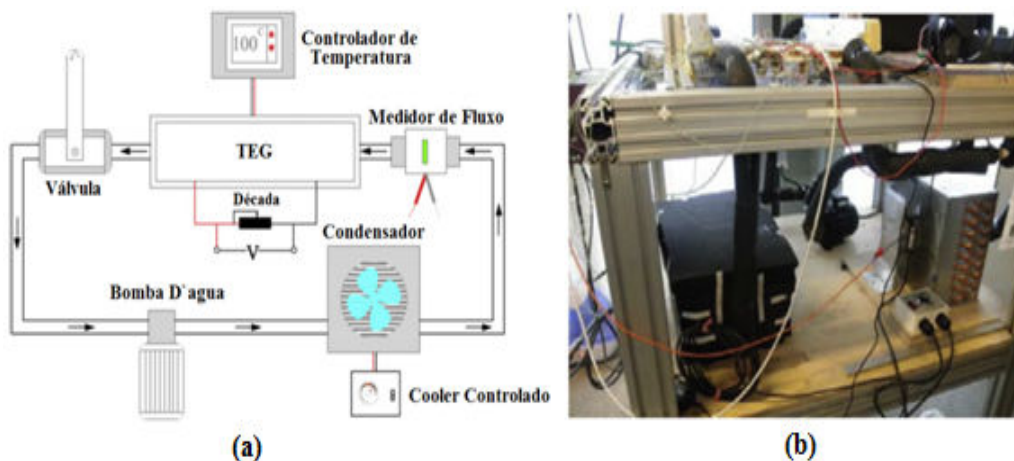


Figura 2.44– Diagrama esquemático (a) e foto da bancada de teste (b) [46]

O artigo intitulado *Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation* apresenta uma revisão sobre os principais progressos no desenvolvimento de sistemas de geração termoelétrica baseado no Efeito *Seebeck* de pequeno e médio porte para conexão à rede elétrica em substituição das fontes convencionais baseadas em combustíveis fósseis [47].

O artigo intitulado *The Study of Thermoelectric Power Generation in The Cooling of Fin and Vibration Heat Pipe* apresenta o projeto e teste de um sistema de resfriamento do tipo *Heat Pipe*. Para uso combinado em um sistema de geração baseado em energia solar e energia termoelétrica, com análise dos dois modos diferentes de resfriamento e sua influência para a eficiência de geração de energia termelétrica solar [48]. A Figura 2.45 apresenta o sistema *Heat Pipe* desenvolvido.



Figura 2.45 – Demonstrativo do Sistema *Heat Pipe* desenvolvido [48]

3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Este capítulo inicia-se apresentando os principais passos que envolvem o dimensionamento de um sistema de cogeração de energia termoelétrica para captação de energias residuais a partir de curvas de desempenho e do gradiente de temperatura predeterminado, seguido pelo detalhamento de cada etapa de projeto. Finaliza-se apresentando a metodologia de cálculo desenvolvida para o dimensionamento elétrico do sistema de cogeração proposto, a especificação do arranjo elétrico dos módulos termoelétricos bem como, do sistema de condicionamento do sinal a partir de curvas de desempenho e de um gradiente de temperatura predeterminado.

3.1 Microgerador Termoelétrico para Captação de Energias Residuais

O sistema para cogeração de energia elétrica não consiste apenas de materiais termoelétricos e sim de diversos fatores de influência direta e indireta no sistema de cogeração. Como por exemplo, pode-se citar o gradiente de temperatura (máximo e mínimo) obtido pelo sistema térmico, pois as temperaturas na qual o sistema está exposto influenciam na conversão termoelétrica do sistema gerando variações na tensão de saída. Conforme testes realizados, percebe-se que a potência fornecida pelos módulos termoelétricos varia proporcionalmente com o gradiente de temperatura.

Consequentemente, devido às variações de tensão, necessita-se de um sistema de condicionamento de sinal para garantir o nível de tensão na carga sem danificar os equipamentos conectados ao sistema de cogeração. No decorrer deste capítulo apresenta-se um procedimento de cálculo para o dimensionamento de dois tipos de conversores: um conversor tipo *boost* (elevador de tensão) e outro tipo *buck* (rebaixador de tensão). Ambos os conversores mantêm estabilizado o sinal de tensão com a finalidade de garantir o bom funcionamento da carga que se deseja alimentar.

É válido destacar que a impedância da carga por sua vez também irá influenciar o rendimento na transferência de potência, uma vez que a máxima transferência de energia é

obtida quando se tem o casamento de impedâncias, ou seja, quando a resistência elétrica interna do sistema proposto é igual à resistência elétrica da carga. Na Figura 3.1 apresenta-se o diagrama de blocos contendo as principais etapas para a montagem e aplicação de um sistema de cogeração termoelétrico genérico para a captação de energias residuais.

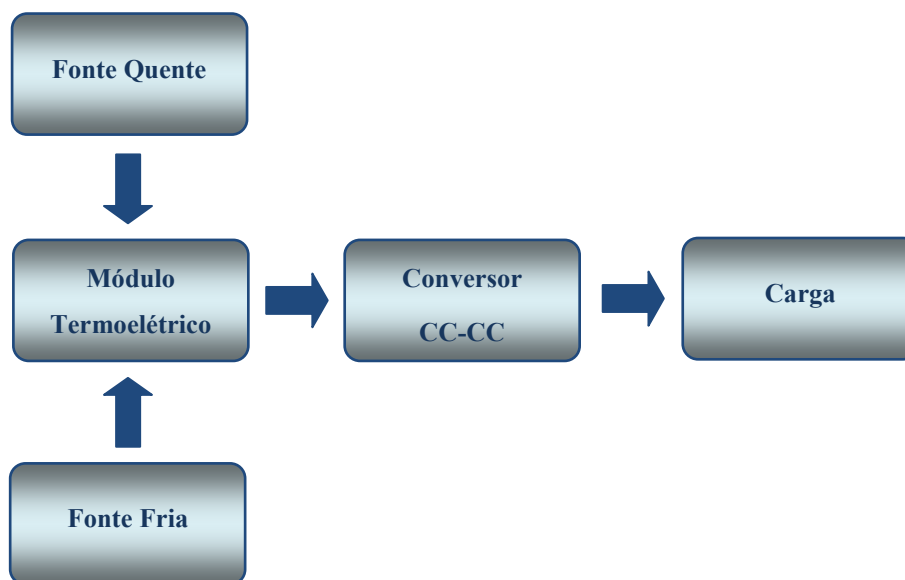


Figura 3.1 - Demonstrativo do diagrama de blocos do sistema de cogeração termoelétrica

As fontes “quente e fria” representam o sistema de transferência térmica do sistema de cogeração proposto, onde se tem como fonte de calor as perdas térmicas oriundas de processos que podem ser captadas por contato superficial, sistemas *heat pipes*. A fonte de frio trata-se de um sistema de transferência de calor composto por dissipadores, serpentinas, blocos de refrigeração e radiadores.

O sistema térmico deve ser definido de acordo com as características do local a ser instalado o sistema proposto, de forma a maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis no local a ser implantado. Com o intuito de melhorar o desempenho térmico deve-se utilizar pasta térmica tanto na face quente, quanto na face fria dos módulos termoelétricos visando reduzir a resistência térmica, assim como, em todos os outros contatos mecânicos presentes no sistema. Deve-se fazer a isolamento térmica entre as duas faces dos módulos termoelétricos para evitar a troca de calor por irradiação. Além disso, devem-se usar matérias que não queimem e tenham alta resistência térmica, como por exemplo, a lã de vidro, que é muito utilizada em fornos cerâmicos.

Enquanto o Sistema Elétrico é composto pelos blocos intitulados por módulo termoelétrico e Conversor CC-CC do Sistema de Cogeração de Energia, o bloco módulo

termoelétrico representa não apenas um módulo e sim todo o sistema de conversão termoelétrica, baseado no efeito *Seebeck*, compostos por uma associação de módulos termoelétricos em série e paralelo a fim de suprir a tensão e corrente necessárias para suprir a potência demandada pela carga.

Para a determinação dos módulos e dos seus respectivos arranjos elétricos deve-se considerar a necessidade da carga ser suprida, e principalmente analisar as curvas de desempenho dos módulos termoelétricos de acordo com o gradiente de temperatura obtido pelo sistema de transferência térmica. Nos *datasheets* dos módulos termoelétricos encontram-se as curvas características, com informações relacionadas à tensão e corrente de saída em função da diferença de temperatura.

O comportamento dos módulos termoelétricos quando submetidos a arranjos elétricos (série e paralelo), foi determinado e validado por meio do desenvolvimento de análise experimental, utilizando-se uma bancada de validação de desempenho de materiais termoelétricos desenvolvida. Observou-se que os módulos termoelétricos podem ser utilizados para realizar arranjos elétricos de forma análoga às fontes de tensão, ou seja, ao realizar a associação de dois módulos em série soma-se à tensão gerada e mantém-se a corrente gerada. Além disso, quando se faz a associação de dois módulos termoelétricos em paralelo a tensão gerada mantém-se e soma-se a corrente.

Destaca-se que somente podem fazer-se arranjos com módulos com a mesma resistência interna, pois do contrário irá gerar-se uma diferença de potencial entre os módulos e, conseqüentemente, uma corrente circulante entre os módulos (perdas).

O conversor CC-CC podendo ser do tipo *booster* (elevador de tensão) ou conversor do tipo *buck* (rebaixador de tensão), é utilizado principalmente para garantir um sinal de tensão fixo nos terminais da carga uma vez que a tensão gerada pelo arranjo de módulos termoelétricos varia proporcionalmente com o gradiente de temperatura. Logo, é necessário um sistema de condicionamento do sinal que tenha um rendimento elevado (superior 90%), que seja robusto e que atenda às necessidades da aplicação.

O último bloco chamado carga representa a potência fornecida pelo sistema de cogeração proposto que pode ser consumida por uma lâmpada ou por diversos dispositivos elétricos. Apesar de representar o consumo da potência gerada, o mesmo é de suma importância para o dimensionamento do sistema de cogeração proposto, uma vez que o dimensionamento do conversor CC-CC depende da potência e da tensão de saída.

3.2 Dimensionamento Elétrico de um Sistema Cogeração Termoelétrica

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de cálculo desenvolvida para realizar o dimensionamento elétrico dos principais componentes que fazem parte do sistema de cogeração termoelétrica de energia que são:

- a) Os módulos termoelétricos;
- b) Os conversores CC-CC; e
- c) As baterias e cabos.

Para a aplicação da metodologia proposta necessita-se conhecer previamente o desempenho térmico do sistema no local onde será implantado e a condição de operação da carga a alimentar. Logo, os dados de entrada são:

- a) Potência e Tensão de Alimentação da Carga;
- b) Gradiente de Temperatura e Temperatura da Fonte Quente e Fria;
- c) Número de horas diárias que o sistema fica em operação; e a
- d) Escolha do módulo termoelétrico e Curva de desempenho.

Com o intuito de facilitar a compreensão da metodologia proposta, desenvolveu-se um fluxograma com a sequência de procedimentos que deve ser seguida no dimensionamento elétrico do sistema de cogeração termoelétrica. A Figura 3.2 apresenta o fluxograma.

Conforme se observa na Figura 3.2, os itens iniciais (em vermelho) de especificação e projeto do sistema proposto, podem ser consideradas variáveis de entrada que são determinadas pelo projetista, inclusive a escolha dos módulos termoelétricos que está diretamente condicionado à área disponível para implantação, e principalmente pela curva de desempenho dos módulos termoelétricos para o gradiente de temperatura do local. Sendo este de suma importância, uma vez que todos os cálculos estão baseados na curva de desempenho do módulo termoelétrico escolhido.

Depois de dimensionados os componentes do sistema elétrico do gerador termoelétrico faz-se necessário utilizar algum meio para validar a metodologia proposta e conseqüentemente o projeto. Isto deve-se ao fato que o método para dimensionamento do arranjo dos módulos termoelétricos baseia-se em um processo de tentativa e erro, na qual, procuram-se os melhores valores para os demais componentes do sistema proposto a partir

da potência gerada pelo arranjo de módulos.

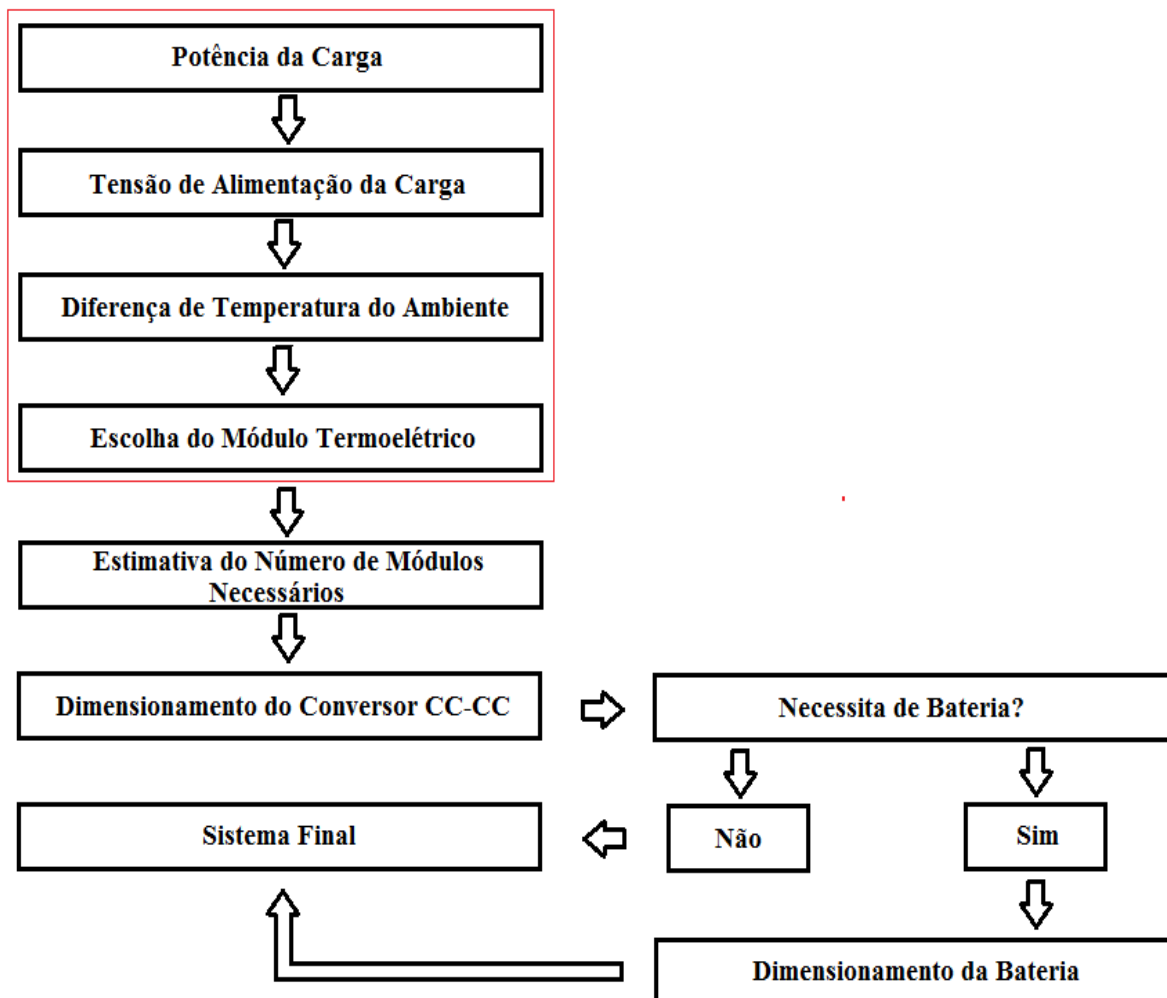


Figura 3.2 – Fluxograma contendo os passos para o dimensionamento do sistema proposto

A fim de garantir o desenvolvimento da melhor configuração do sistema de cogeração termoelétrica para uma aplicação específica, deve-se projetar o sistema com módulos termoelétricos com características diferentes (curvas de desempenho e dimensões) e optar para o sistema projetado que melhor atenda às necessidades do local de implantação. O processo de dimensionamento e validação experimental da metodologia de cálculo será apresentado no capítulo a seguinte.

3.3 Previsão de Demanda de Energia Elétrica do Sistema Cogeração Termoelétrico

A previsão da energia consumida no sistema termoelétrico é o ponto de partida para o dimensionamento de todo o sistema proposto. Esta estimativa do consumo é por dia em

Wh, pois nem todos os sistemas ficam ligados o dia inteiro. A fim de calcular a energia consumida pela carga deve-se fazer uma listagem com a potência nominal de cada carga que vai ser utilizada bem como, o número de horas que a carga irá estar em funcionamento. Esse cálculo obedece a:

$$E_{Consumida} = P_{Carga} \cdot N_{horas} \text{ [Wh]} \quad (11)$$

Onde:

- $E_{Consumida}$: Consumo total de energia [Wh];
- P_{Carga} : Potência da carga [W]; e
- N_{horas} : Número de horas de funcionamento do sistema [h].

3.4 Estimativa da Corrente na Carga

Com o valor da potência da carga e com a tensão eficaz necessária para alimentação, é possível calcular a corrente na carga (I_{Carga}), que pode ser obtida por meio da equação 12. Destaca-se que esta estimativa da corrente na carga (I_{Carga}) também será utilizada para dimensionar o conversor CC-CC que mantém a tensão constantemente no valor desejado.

$$I_{Carga} = \frac{P_{Carga}}{V_{Carga}} \text{ [A]} \quad (12)$$

Onde:

- P_{Carga} : Potência da carga [W]; e
- V_{Carga} : Tensão de alimentação da carga [V].

3.5 Estimativa da Quantidade de Módulos Termoelétricos

A quantidade de módulos necessários para o sistema de cogeração depende diretamente da potência e da tensão da carga. bem como, do gradiente de temperatura do sistema térmico, uma vez que a potência gerada é diretamente proporcional ao gradiente de

temperatura. A definição do módulo termoelétrico também entra nesta etapa, pois cada modelo de módulo termoelétrico possui dimensões diferentes e curvas características de tensão, corrente e potências específicas para cada modelo.

Após determinada a corrente na carga (I_{Carga}), deve-se escolher o módulo termoelétrico a ser utilizado no projeto e então analisar o seu *datasheet* para verificar qual o arranjo de módulos termoelétricos necessários para suprir a tensão e a corrente da carga. Para realizar esta análise utiliza-se como referência o gradiente de temperatura do sistema térmico e as curvas de desempenho dos módulos escolhidos. Na Figura 3.3 apresentam-se as curvas de desempenho de tensão, corrente e potência em função do gradiente de temperatura retiradas do *datasheet* do módulo termoelétrico inbC1-127.08HTS.

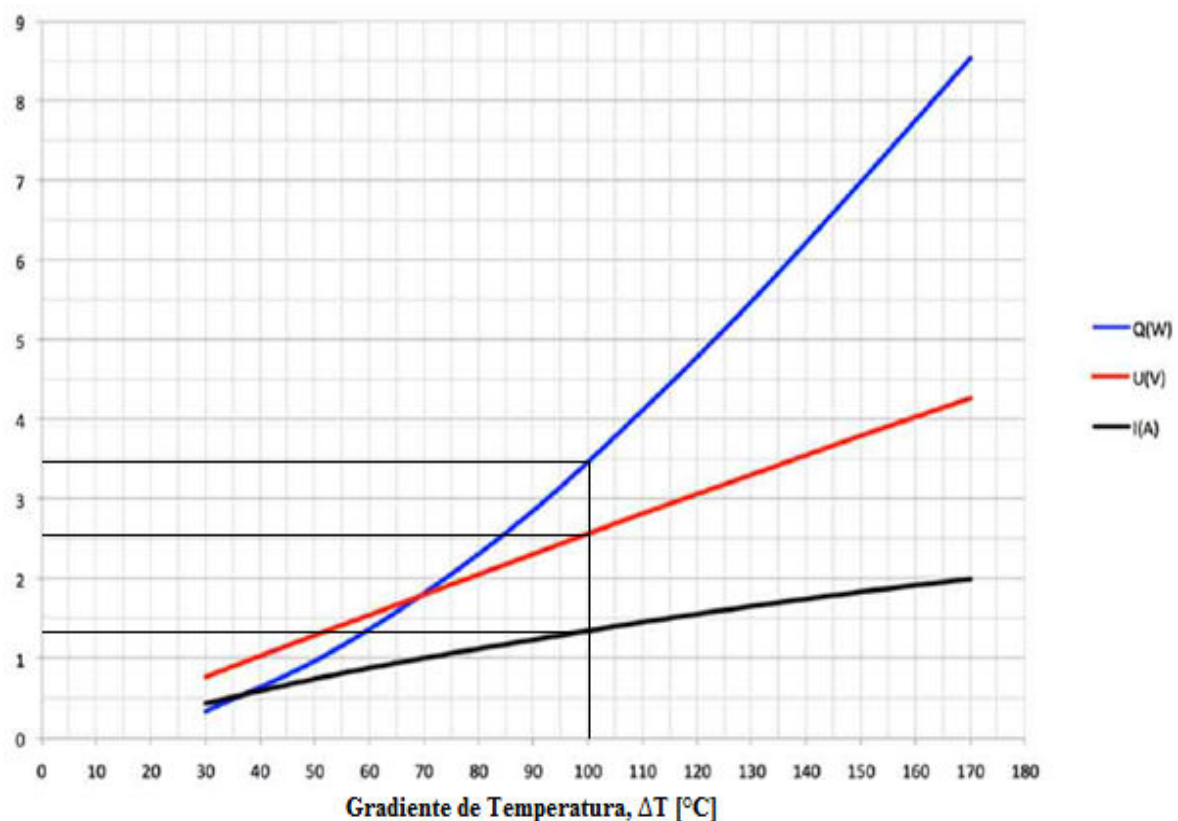


Figura 3.3 – Tensão, corrente e potência em função do gradiente de temperatura [49].

Conforme pode ser visto na Figura 3.3, para uma diferença de temperatura de 100°C a potência fornecida por cada módulo será de aproximadamente 3,4W, com uma tensão próxima a 2,6V e uma corrente de 1,3A.

Porém, existem *datasheets* que ao invés de fornecerem a diferença de temperatura, apresentam as temperaturas do lado quente (T_h) e do lado frio (T_c), conforme pode ser visto na Figura 3.4.

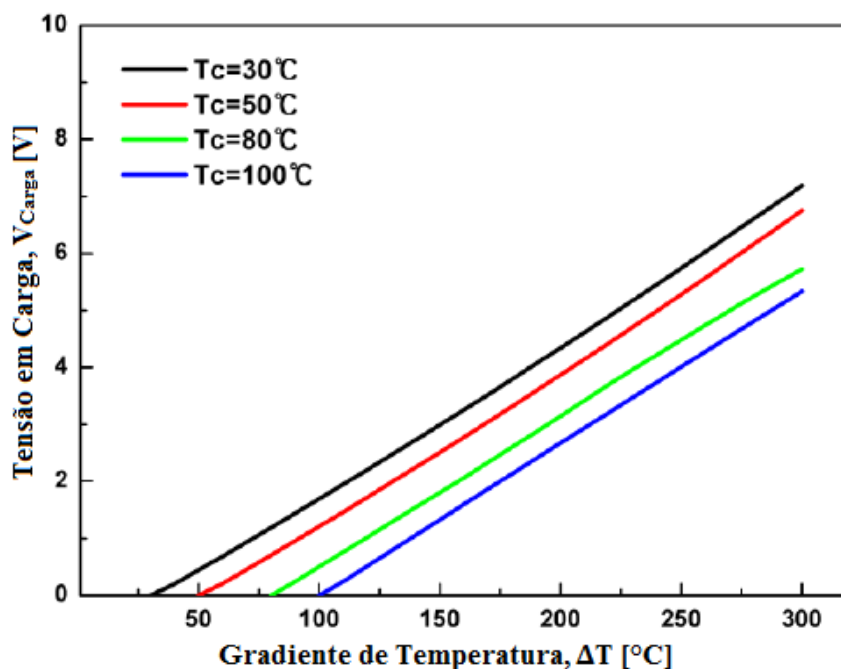


Figura 3.4 – Curva de desempenho da tensão gerada em função do gradiente de temperatura [21]

Na Figura 3.4 apresenta-se a curva de desempenho da tensão gerada para apenas quatro temperaturas do lado frio. Caso a temperatura (Fonte Fria) de operação do sistema seja diferente das temperaturas utilizadas para obter as curvas, deve-se fazer uma aproximação dos valores gerados por meio da interpolação seguinte:

$$\frac{Tf_{Sup} - Tf_{Inf}}{V_{Sup} - V_{Inf}} = \frac{Tf_{Sup} - Tf_{mod}}{V_{Sup} - V_{mod}} \quad (13)$$

Onde:

- $Tf_{Superior}$: Temperatura da Fonte Fria Superior contida na curva de desempenho [°C];
- $Tf_{Inferior}$: Temperatura da Fonte Fria Inferior contida na curva de desempenho [°C];
- Tf_{mod} : Temperatura da Fonte Fria presente no módulo termoeétrico [°C];
- $V_{Superior}$: Tensão gerada para $Tf_{Superior}$ [V];
- $V_{Inferior}$: Tensão gerada para $Tf_{Inferior}$ [V]; e
- V_{mod} : Tensão gerada para Tf_{mod} [V].

Preferencialmente, deve-se escolher $Tf_{Superior}$ e $Tf_{Inferior}$ na condição em que Tf_{mod} fique entre estes valores escolhidos. No caso de Tf_{mod} ser 70°C, logo se tem que $Tf_{Superior}$

será 80°C e $T_{f_{inferior}}$ 50°C. Considerando que $T_{f_{mod}}$ é equivalente a 120°C utiliza-se $T_{f_{superior}}=100°C$ e $T_{f_{inferior}}=80°C$. O método de interpolação da equação 13 também é indicado para determinar a corrente ou a potência gerada baseado em curvas de desempenho desde que sejam feitas as devidas alterações.

Uma vez determinado o modelo do módulo termoelétrico a ser utilizado e os seus dados de desempenho para o gradiente de temperatura do sistema térmico, pode-se iniciar o procedimento de cálculo para dimensionar o arranjo elétrico dos módulos.

3.5.1 Associação em Série do Arranjo de Módulos Termoelétricos

Uma vez obtido o valor da tensão gerada por módulo termoelétrico e o valor da tensão média de alimentação do conversor CC-CC do sistema, é possível estimar a quantidade de módulos que devem ser conectados em série ($N_{Série}$), sabendo que a tensão de cada um será somada. Portanto, o número de módulos em função da tensão é:

$$N_{Série} = \frac{\Delta V_{Conv}}{V_{mod}} \Rightarrow \Delta V_{Conv} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad (14)$$

Onde:

- ΔV_{Conv} : Tensão média no conversor CC-CC [V]; e
- V_{mod} : Tensão gerada por módulo [V].

Ressalta-se que a tensão para alimentar o conversor deve ser encontrada por meio da média entre o valor máximo e o mínimo de entrada $\Delta V_{Conv} = (V_{max} + V_{min})/2$. Assim, se a tensão de entrada do conversor CC-CC for de 10V a 20V o valor de ΔV_{Conv} será igual a 15V. Isto deve ser feito por motivos de segurança, já que a tensão de saída dos módulos varia constantemente com o gradiente de temperatura, podendo esta ultrapassar o valor mínimo ou o máximo da tensão de alimentação do conversor CC-CC. O valor encontrado nem sempre será inteiro e caso esse número seja fracionário deve-se sempre arredondar para cima ou para baixo, de forma a garantir uma maior faixa de operação da tensão de trabalho do conversor CC-CC.

3.5.2 Associação em Paralelo do Arranjo de Módulos Termoelétricos

Utilizando-se a corrente da carga obtém-se a quantidade de blocos em série que serão necessários associar em paralelo (N_{Paralelo}) para suprir a corrente da carga. Portanto, o número de módulos que devem ser associados em paralelo para suprir a corrente máxima solicitada pelo conversor CC-CC ($I_{\text{Crítica}}$) é obtida através de:

$$N_{\text{Paralelo}} = \frac{I_{\text{Crítica}}}{I_{\text{mod}}} \Rightarrow I_{\text{Crítica}} = I_{\text{Carga}} \cdot \left(\frac{V_{\text{Carga}}}{V_{\text{min}}} \right) \quad (15)$$

Onde:

- $I_{\text{Crítica}}$: Corrente máxima do circuito [A]; e
- I_{mod} : Corrente fornecida por um módulo [A].

Assim como no cálculo em função da tensão o valor encontrado nem sempre será inteiro. Neste caso é necessário arredondar para cima o número encontrado, porque o valor da corrente que os módulos suportam deve ser maior que a corrente do sistema para garantir o bom funcionamento. Caso o número de módulos encontrados for de 3,9, então sugere-se utilizar 4 módulos para uma total garantia, já que a temperatura do sistema varia, alterando o valor da corrente máxima dos módulos. Se forem colocados blocos de módulos em paralelo a mais, não haverá problemas, já que o número não altera a tensão e sim a capacidade de corrente fornecida. Será uma segurança caso queime algum módulo, mas irá onerar os custos do projeto.

3.5.3 Arranjo Elétrico do Sistema de Conversão Termoelétrico

Com o número de associações série e paralelo dos módulos termoelétricos devidamente predeterminados, pode-se estimar o número total de módulos necessários para realizar o arranjo elétrico do sistema de conversão termoelétrico (N_{mod}) utilizando a seguinte equação:

$$N_{\text{mod}} = N_{\text{Série}} \cdot N_{\text{Paralelo}} \quad (16)$$

Onde:

- $N_{\text{Série}}$: Número de módulos termoeletricos em série; e
- N_{Paralelo} : Número de módulos termoeletricos em paralelo.

3.6 Estimativa da Área Mínima Ocupada

A área mínima (*Área*) ocupada pelo sistema termoeletrico pode ser obtida em função das dimensões do módulo termoeletrico e do número de módulos necessários para confecção do arranjo elétrico do conversor termoeletrico. Sendo assim, a área pode ser calculada da seguinte forma:

$$\textit{Área} = L_{\text{arg}} \cdot \textit{Comp} \cdot N_{\text{mod}} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (17)$$

Onde:

- *Larg*: Largura do módulo utilizado; [mm];
- *Comp*: Comprimento do módulo utilizado [mm]; e
- N_{mod} : Número de módulos do arranjo elétrico do sistema de conversão termoeletrico.

3.7 Demonstrativo do Procedimento de Cálculo

Com o intuito de demonstrar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida, neste capítulo irá aplicar-se para dimensionar um sistema de cogeração termoeletrica por meio da captação de energias residuais para alimentar uma carga de 35W com uma tensão de 15V. O conversor CC-CC precisa de uma tensão de entrada entre 10 a 32V para se obter em sua saída os 15V solicitados. Sabe-se que as temperaturas no local de aplicação dos módulos termoeletricos do tipo TEHP1-24156-1.2 da fonte fria e da fonte quente são, respectivamente, de 60°C e 200°C.

Aplicando a equação 12 pode-se obter a corrente na carga:

$$I_{Carga} = \frac{P_{Carga}}{V_{Carga}} = \frac{35}{15} = 2,33A$$

Com base na curva de desempenho da tensão (Figura 3.5) presente no *datasheet* do módulo TEHP1-24156-1.2.

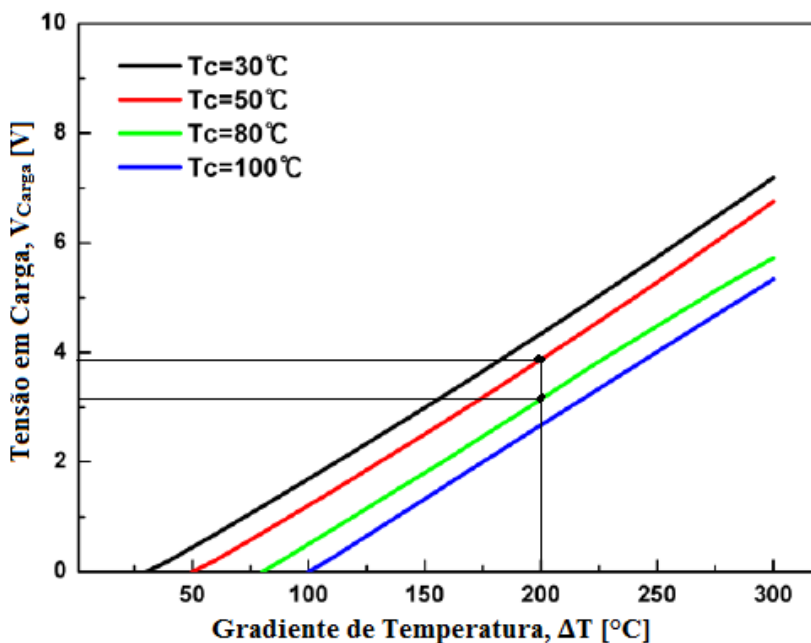


Figura 3.5 - Curva de desempenho da tensão sob carga do módulo [21]

Ao analisar a Figura 3.5, verifica-se que não existe um valor exato para a temperatura da fonte fria de 60°C, logo, será necessário fazer a interpolação. As curvas mais próximas são de 50°C e 80°C, então serão as escolhidas. Os valores de tensão referente a cada curva são de 3,1V e 3,9V, respectivamente. Com isso, todos os valores necessários para a interpolação já são conhecidos e para a realização da interpolação utiliza-se a equação 13, isto é:

$$\frac{Tf_{Sup} - Tf_{Inf}}{V_{Sup} - V_{Inf}} = \frac{Tf_{Sup} - Tf_{mod}}{V_{Sup} - V_{mod}} \Rightarrow \frac{80 - 50}{3,9 - 3,1} = \frac{80 - 60}{3,9 - V_{mod}} \Rightarrow V_{mod} = 3,37V$$

Com o cálculo, encontra-se o valor da tensão de saída de cada módulo que é de 3,37V. Este valor será aplicado para encontrar o número necessário de módulos em série. O conversor CC-CC pode ser alimentado com uma tensão de 10 a 32V. Logo, para os cálculos será utilizado o valor médio da tensão do conversor CC-CC e a equação 14 para

determinar o número de módulos associados em série:

$$\Delta V_{Conv} = \frac{V_{\max} + \Delta V_{\min}}{2} = \frac{32 + 10}{2} = 21V \Rightarrow N_{Série} = \frac{\Delta V_{Conv}}{V_{\text{mod}}} = \frac{21}{3,366} = 6,23 \text{módulos}$$

Como o número de módulos foi fracionário, será feito o arredondamento e a verificação. Neste caso, será arredondado para 6 módulos. A tensão de saída será o produto entre o número de módulos (6) e a tensão de saída dos mesmos (3,37V), totalizando 20,20V. Conclui-se então, que este número de módulos se adequa ao valor desejado.

No gráfico de corrente (Figura 3.6) é visto que com apenas um módulo são obtidos 1,25A, e aplicando a equação 15 pode-se determinar o número de módulos associados em paralelo. Esse número é:

$$I_{Crítica} = I_{Carga} \cdot \left(\frac{V_{Carga}}{V_{\min}} \right) = 2,33 \cdot \left(\frac{15}{10} \right) = 3,5A \Rightarrow N_{Paralelo} = \frac{3,5}{1,25} = 2,8 \text{módulos}$$

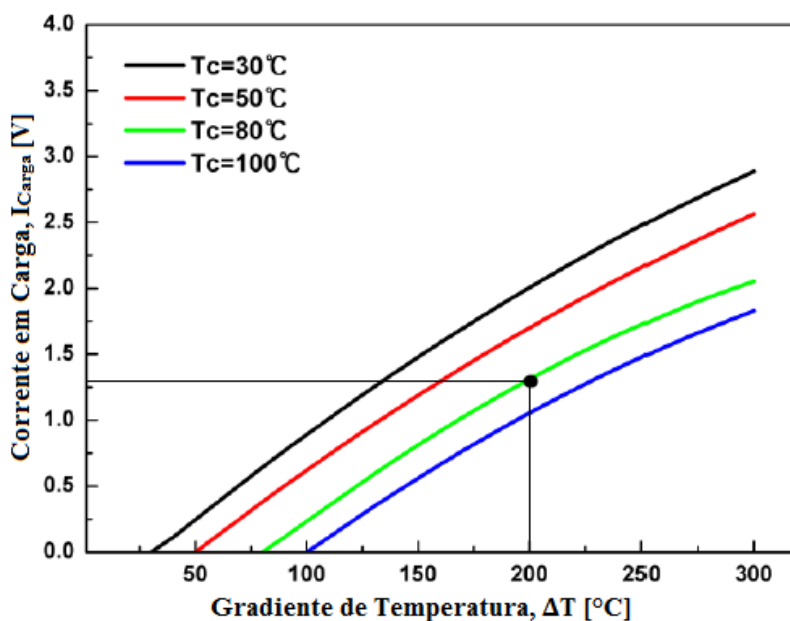


Figura 3.6 - Curva de desempenho da corrente sob carga do módulo [21].

Sendo assim, deve-se utilizar 3 módulos em paralelo para a corrente ser superior à corrente crítica do sistema 3,5A, que é o valor mínimo exigido. Porém, com os 3 módulos a corrente máxima será de 3,75A operando no gradiente de temperatura de projeto. Caso queira ter uma margem de segurança pode-se optar que o sistema utilize 4 módulos termoelétricos em paralelo. O número total de módulos do sistema é encontrado aplicando

a equação 16, isto é:

$$N_{\text{mod}} = N_{\text{Série}} \cdot N_{\text{Paralelo}} = 3 \cdot 3 = 9 \text{módulos}$$

A área mínima ocupada pelo sistema termoelétrico pode ser calculada pela equação 17, valendo:

$$\text{Área} = \text{Larg} \cdot \text{Comp} \cdot N_{\text{mod}} = 56,5 \cdot 56,5 \cdot 9 = 28730,25 \text{mm}^2$$

A Figura 3.7 mostra como ficará o arranjo elétrico do conversor termoelétrico contendo as ligações dos módulos termoeletricos associados em série e paralelo.

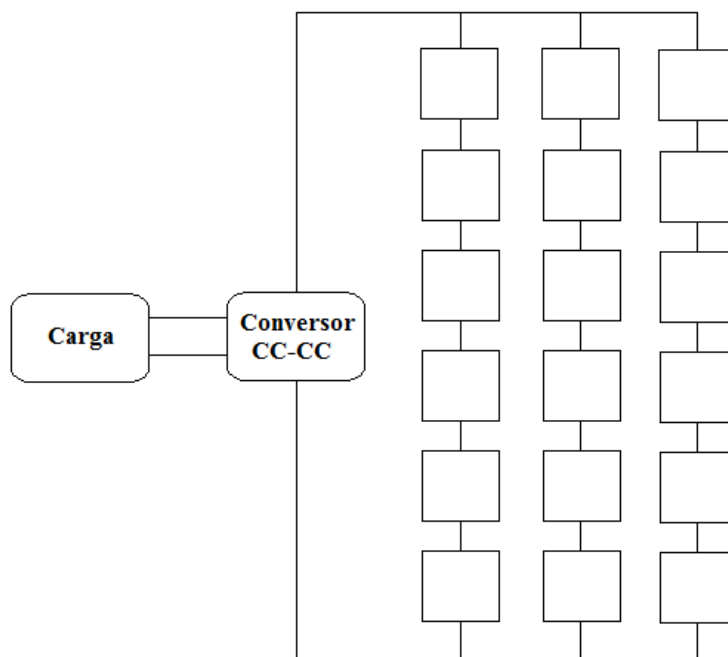


Figura 3.7 – Demonstrativo do arranjo elétrico do conversor termoeletrico

3.8 Dimensionamento do Conversor CC-CC

Para o dimensionamento do conversor CC-CC são necessários alguns valores em função das características do sistema, como: [50]

- a) A tensão de alimentação da carga;
- b) A potência máxima da carga ligada ao conversor;

- c) A tensão mínima de entrada do conversor CC-CC; e
- d) A tensão máxima de entrada do conversor CC-CC.

Para o dimensionamento do conversor devem-se definir os valores de: [50]

- a) Frequência de chaveamento do transistor;
- b) Ondulação de corrente no indutor (%); e
- c) Ondulação da tensão de saída (%).

No processo de definição do tipo de conversor CC-CC mais adequado ao sistema de cogeração proposto deve-se considerar a tensão de saída dos módulos termoeletrônicos que irão alimentar a entrada do conversor CC-CC bem como, a tensão de saída do conversor CC-CC que irá alimentar a carga.

Basicamente, se a tensão de entrada for menor que a tensão de saída do conversor, o conversor a ser usado deve ser do tipo *boost*, já que o mesmo eleva a tensão de saída. Então, para uma tensão de entrada maior que a de saída, o conversor deve ser do tipo *Buck*, que tem a função de rebaixar a tensão de saída [51].

O módulo escolhido descrito anteriormente pode ser considerado válido, porém não é conclusivo. Para uma melhor análise, deve ser feita uma relação entre a potência de saída do conversor (P_O) e a potência consumida pelos elementos de comutação (P_T), desprezando a ondulação de corrente (o conversor trabalhará no modo de condução contínua) e a ondulação da tensão e assumindo que a tensão de entrada pode variar assim como o ciclo de trabalho deve ser controlado para manter a tensão de saída constante [51].

A Figura 3.8 mostra a relação entre a potência de saída do conversor (P_O) e a potência consumida pelos elementos de comutação (P_T) que é o índice de utilização dos elementos de comutação com o ciclo de trabalho (D).

Observa-se que para tensões da mesma grandeza o conversor *Buck* é o que apresenta melhor eficiência quanto à utilização dos elementos de comutação, pois o valor referente ao ciclo de trabalho (D) será próximo ao valor unitário (1). Já o conversor *Buck-Boost* apresenta um baixo índice de utilização, sendo que o valor máximo será 25% caso o ciclo de trabalho seja 0,5.

A grande vantagem do conversor *Buck-Boost* é operar com tensões menores e maiores à de saída, assim ele se ajusta conforme as necessidades do sistema, uma vez que os módulos termoeletrônicos variam conforme a diferença de temperatura.

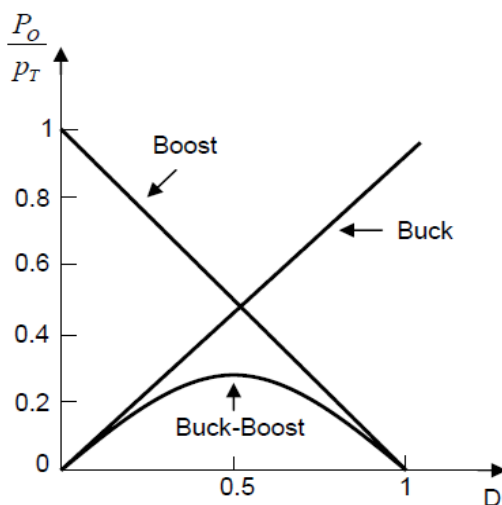


Figura 3.8 – Utilização da energia nos conversores CC-CC [51]

No Anexo A apresenta-se a metodologia para dimensionamento de conversores CC-CC para cada um dos três tipos de conversores, ou seja, conversor *Boost*, conversor *Buck* e conversor *Buck-Boost*, no modo de condução contínua de acordo com [50, 51, 52, 53, 54].

3.9 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento

O sistema de armazenamento proposto para este trabalho trata-se da bateria, visto que as mesmas servem como opção para sistemas intermitentes. Destaca-se que o mesmo pode funcionar sem sistemas de armazenamento, alimentando diretamente o conversor CC-CC. A bateria deve ser dimensionada para armazenar a energia consumida diária e mais alguns dias de reserva, funcionando como um sistema de emergência na ausência da geração. A capacidade da bateria pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q_{bat} = \frac{P_{Consumida} \cdot N_{dias}}{V_{Carga} \cdot t_{max}} \quad [Ah] \quad (18)$$

Onde:

- $P_{Consumida}$: Consumo total de energia diária [Wh];
- N_{dias} : Número de dias de autonomia;
- V_{Carga} : Tensão na carga [V]; e
- t_{max} : Limite máximo permitido da profundidade de carga da bateria (0,3 a 0,9).

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se a análise experimental desenvolvida para a validação da metodologia.

O procedimento metodológico adotado para as definições preliminares utiliza-se do método hipotético-dedutivo devido à escassez de informações sobre o desempenho e comportamento real dos módulos termoelétricos aplicados à geração de energia.

Posteriormente, para validação dos dados predefinidos e os dados contidos em *datasheets* abordou-se na temática da pesquisa o Método Empírico-Analítico para comprovação dos resultados de forma experimental. Iniciando-se pela análise comparativa de desempenho real dos módulos quando submetidos ao um determinado gradiente de temperatura bem como, verificação do comportamento dos módulos termoelétricos mediante associação elétrica e térmica, culminando na prototipagem de um microgerador termoelétrico para captação das energias residuais.

Inicia-se com o dimensionamento do sistema utilizando a metodologia descrita no capítulo 3, seguido pela prototipagem do termogerador e da metodologia de ensaio para validação do protótipo. Finaliza-se apresentando os resultados e as principais contribuições do modelo experimental para o desenvolvimento e utilização da termoelectricidade para conversão de energia.

4.1 Análise de Desempenho de Módulos Termoelétricos

Os módulos termoelétricos utilizados para realização das análises experimentais são: o Modelo INBC1-127.0HTS do fabricante *WAttronix Inc* e o Modelo TEHP1-24156-1.2 do fabricante *Thermonamic Module* que serão detalhados a seguir.

A Figura 4.1 apresenta o modelo INBC1-127.0HTS do fabricante *WAttronix Inc.*, cuja dimensões são 40X40X3,5mm, apresentando temperatura máxima de 200°C. [49]

A Figura 4.2 apresenta o comportamento do módulo termoelétrico, sendo possível

verificar quais os valores de potência, tensão e corrente em relação ao gradiente de temperatura.

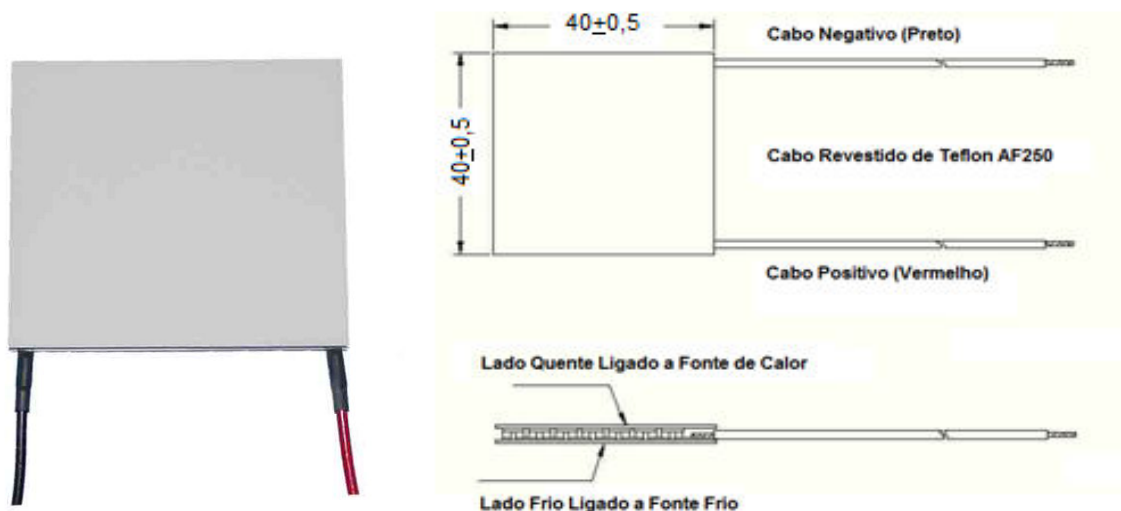


Figura 4.1 - Módulo Termoelétrico INBC1-127.0HTS [49]

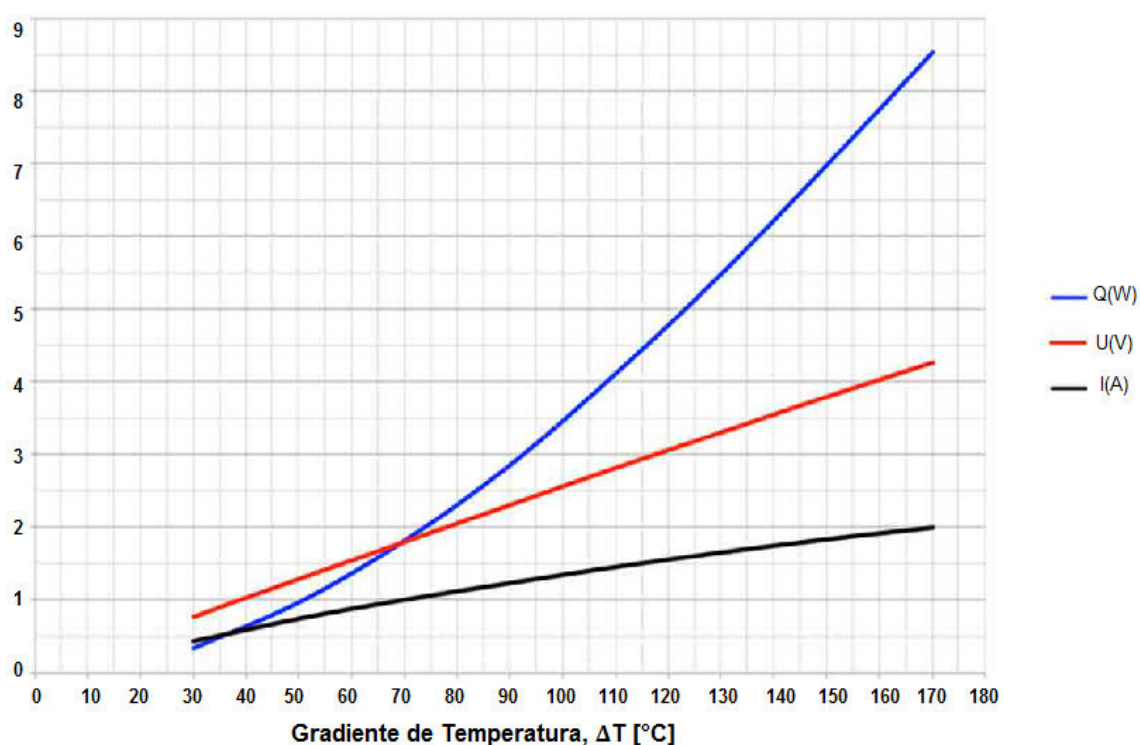


Figura 4.2 – Curvas de Desempenho do Módulo INBC1-127.0HTS [49]

Além do modelo verificado anteriormente, utilizou-se também para a realização da análise experimental o módulo termoelétrico modelo TEHP1-24156-1.2 do fabricante *Thermonamic Module*. Este modelo é fabricado principalmente para a geração de energia, e é composto por bismuto e telúrio (Bi-Te), podendo trabalhar a temperaturas elevadas de

até 330°C. Destaca-se que este módulo é revestido com folha de grafite de alta condutividade térmica, não necessitando aplicação de pastas térmicas. [21]. A Tabela 4.1 apresenta as especificações técnicas do módulo.

Tabela 4.1- Especificação Técnica do Módulo TEHP1-24156-1.2 [21]

| | |
|--|----------|
| Temperatura do Lado Quente (°C) | 300 |
| Temperatura do Lado Frio (°C) | 30 |
| Tensão do Circuito Aberto (V) | 14,4 |
| Resistência de Carga Correspondente (Ω) | 2,5 |
| Tensão de Saída da Carga (V) | 7,2 |
| Corrente de Saída da Carga (A) | 2,9 |
| Potência de Saída da Carga (W) | 20,9 |
| Fluxo de Calor Através do Módulo (W) | ~418 |
| Densidade de Fluxo de Calor (Wcm^2) | ~13,3 |
| Resistência Medida com menos de 27°C a 1000Hz (Ω) | 1,1~1,35 |

Na Figura 4.3, apresenta-se as dimensões (mm) e geometria do módulo termoelétrico.

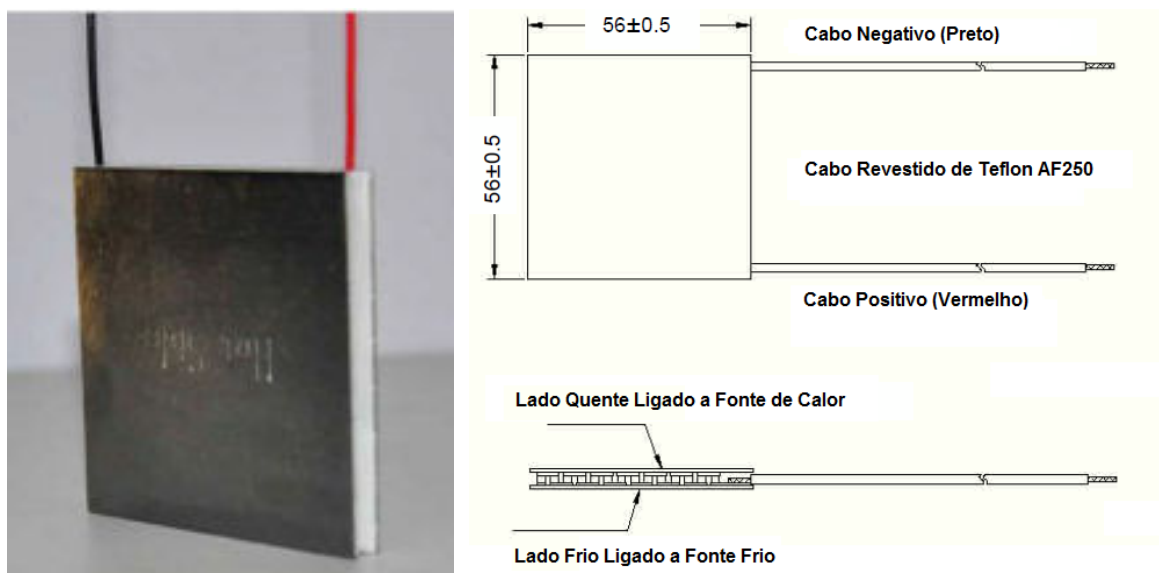


Figura 4.3 - Módulo Termoelétrico Modelo TEHP1-24156-1.2 [21]

As curvas de desempenho do módulo termoelétrico modelo TEHP1-24156-1.2 são apresentadas na Figura 4.4, onde se pode visualizar os valores de potência, tensão e corrente para um determinado gradiente de temperatura.

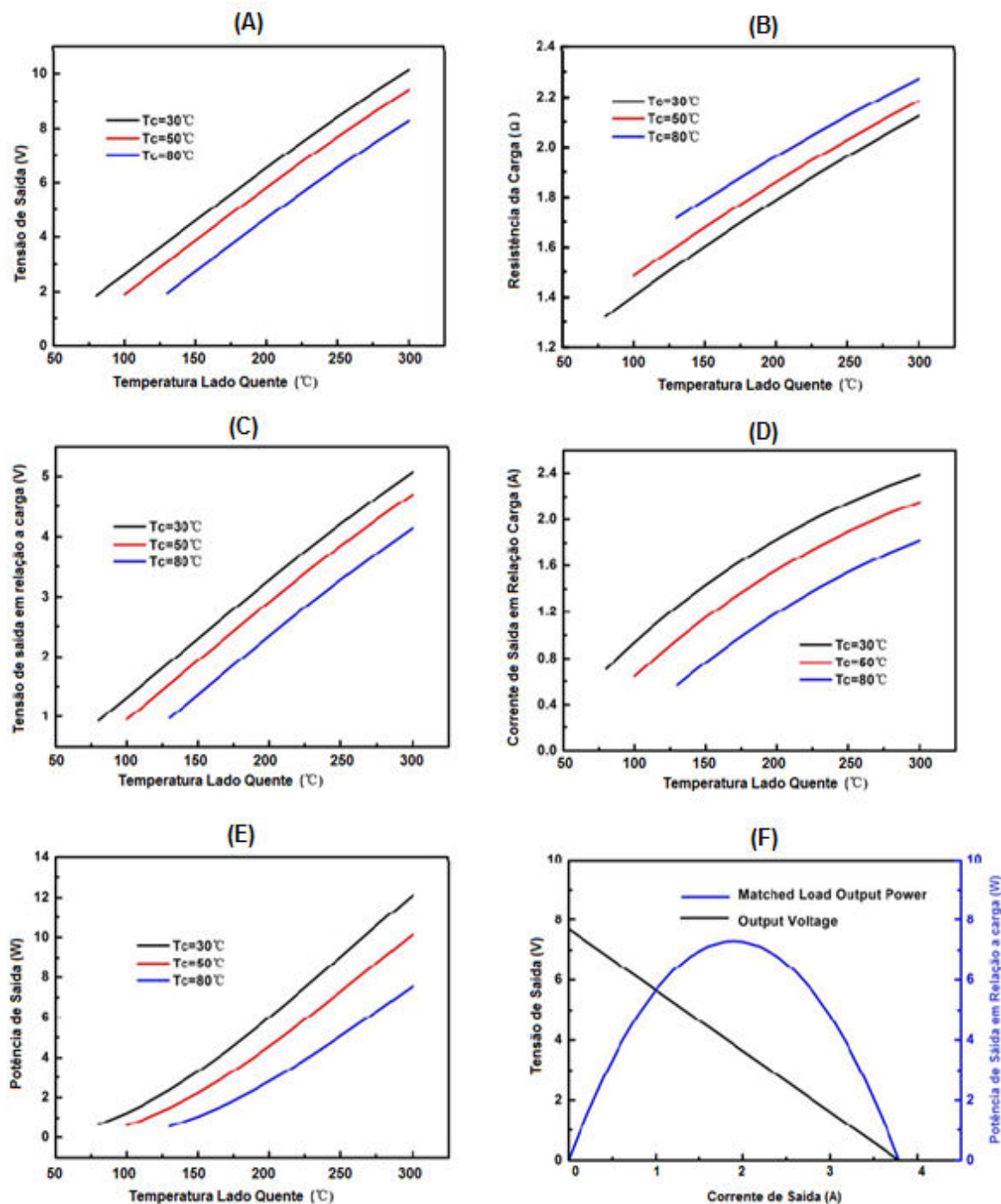


Figura 4.4 - Curvas de Desempenho do Módulo Termoelétrico Modelo TEHP1-24156-1.2 [21]

Para a realização deste experimento desenvolveu-se um pequeno *kit* experimental constituído de uma fonte quente para captação de calor residual e uma fonte fria para resfriamento, para se obter um gradiente de temperatura entre as superfícies do módulo termoelétrico sendo que os módulos termoelétricos utilizados foram os modelos INBC1-127.0HTS e TEHP1-24156-1.2. Os materiais utilizados neste experimento foram:

- a) 01 Unid - Caixa de Metal;
- b) 02 Unid - Dissipador (250X172mm);
- c) 01 Unid - Fogareiro Elétrico;
- d) 04 Unid - Pastilha Termoelétrica;
- e) 04 Unid - Placa de Alumínio (56X56mm);
- f) 04 Unid - Termopar tipo K;
- g) 01 Unid - Termovisor;
- h) 01 Unid - Medidor de Temperatura com aquisição para 8 termopares;
- i) 01 Unid - Multímetro digital; e
- j) 01 Unid - Pasta térmica.

A Figura 4.5 apresenta um diagrama de blocos que representa a montagem efetuada do pequeno *kit* experimental desenvolvido.

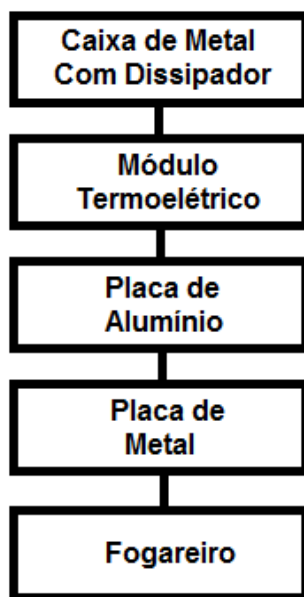


Figura 4.5 - Diagrama de Blocos da Montagem Experimental

Primeiramente foi colocado sobre um fogareiro elétrico uma chapa metálica de aproximadamente 20mm de espessura, e em cima desta um dos dissipadores. Este dissipador fica com a parte plana voltada para cima, com a finalidade de colocar os 4 módulos termoelétricos distribuídos lado a lado sobre o mesmo.

Nos dois lados do módulo foi colocada pasta térmica para aumentar a dissipação de calor. Sobre o outro lado dos módulos, colocou-se outro dissipador igual ao que fica por

baixo. Este dissipador estará acoplado a uma caixa de metal, sendo que as suas aletas de dissipação fiquem dentro desta caixa. A caixa provém de uma abertura em sua parte superior para que dentro desta possa ser colocada água gelada, a fim de se obter o maior gradiente de temperatura entre os dissipadores. A Figura 4.6 apresenta uma imagem do *setup* experimental conforme demonstrado na Figura 4.5.

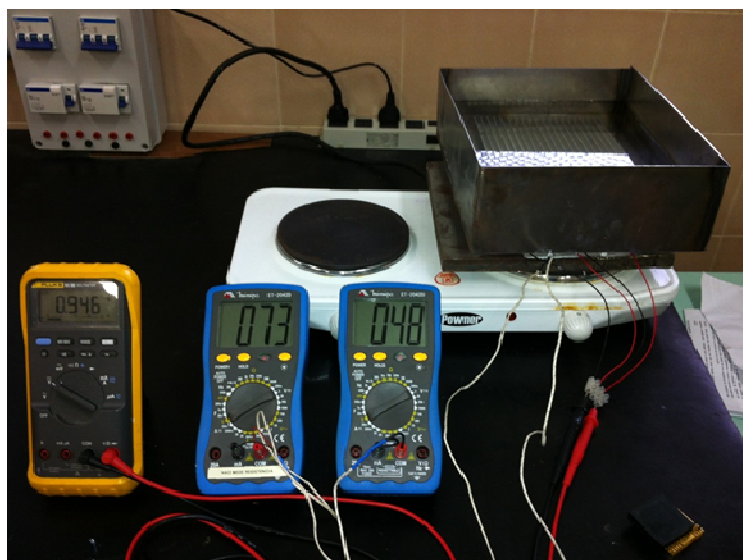


Figura 4.6 - Foto do *Setup* do Experimento

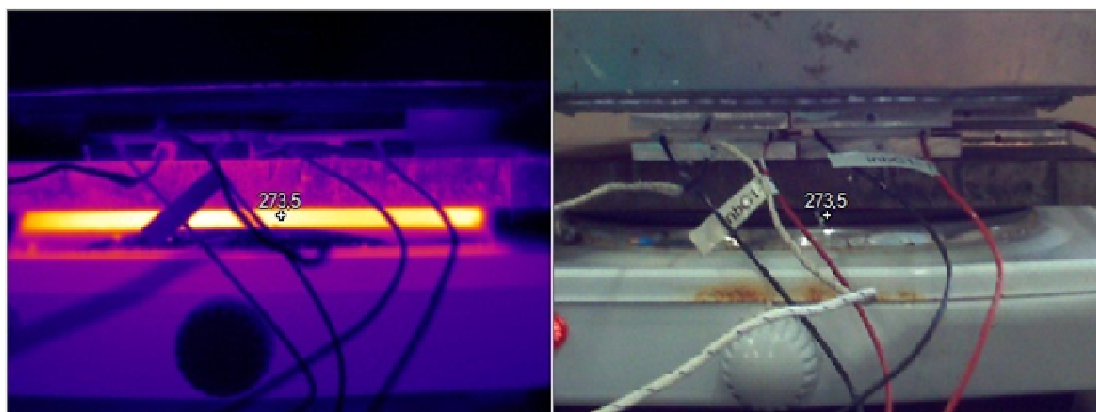


Figura 4.7 - Imagem Termográfica do Experimento Realizado

Para a realização das medições de temperatura, tensão e corrente do sistema optou-se por desenvolver uma bancada de medição das grandezas que permitirá monitorar os efeitos termoelétricos. A Figura 4.8, mostra a estrutura física do sistema de aquisição desenvolvido.

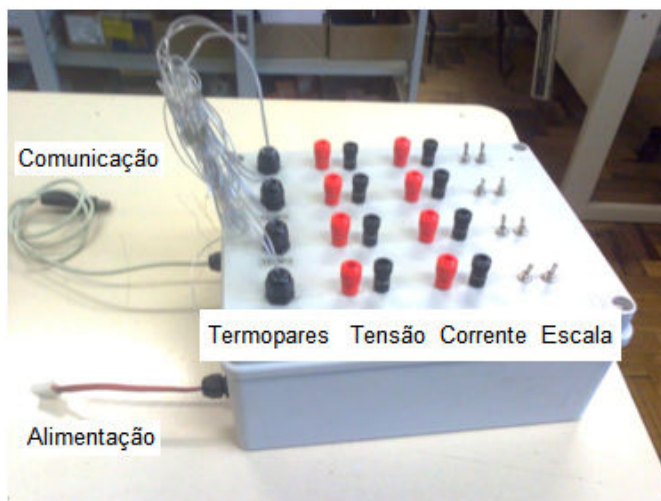


Figura 4.8 – Demonstrativo da Bancada para Monitoração

As principais funcionalidades da bancada são a medição de até 4 canais de temperatura composto por 8 termopares (um para a temperatura do lado frio e outro do lado quente), mais 4 canais de tensão e outros 4 canais de corrente. Os dados adquiridos pela bancada são processados por um *software* desenvolvido em Linguagem *Delphi* com a finalidade de facilitar a visualização e interpretação dos dados de ensaio. A Figura 4.9 mostra a tela de abertura do *software*.

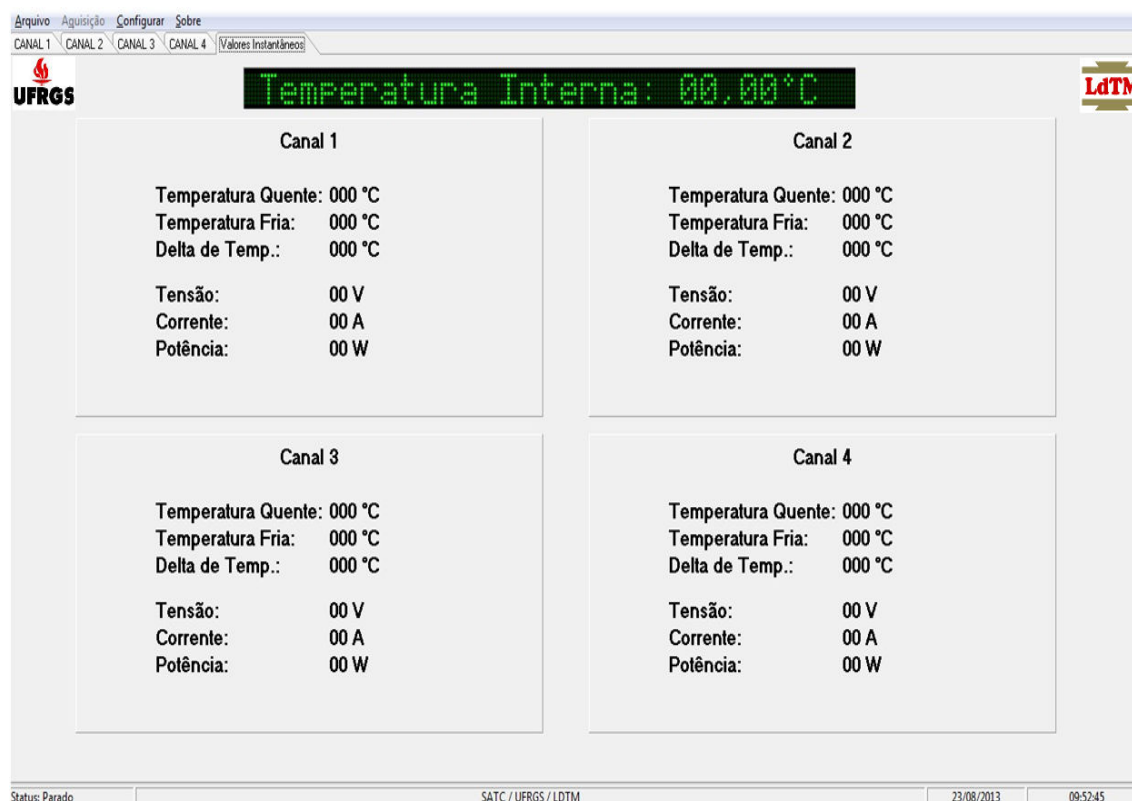


Figura 4.9 - Demonstrativo da tela de abertura do *software*

A Figura 4.9 mostra os dados na forma de valores absolutos de tensão, corrente, potência e temperatura, enquanto a Figura 4.10 mostra a tela dos gráficos gerados a partir dos dados adquiridos pelo sistema de aquisição com intervalo de integração de 1 segundo.

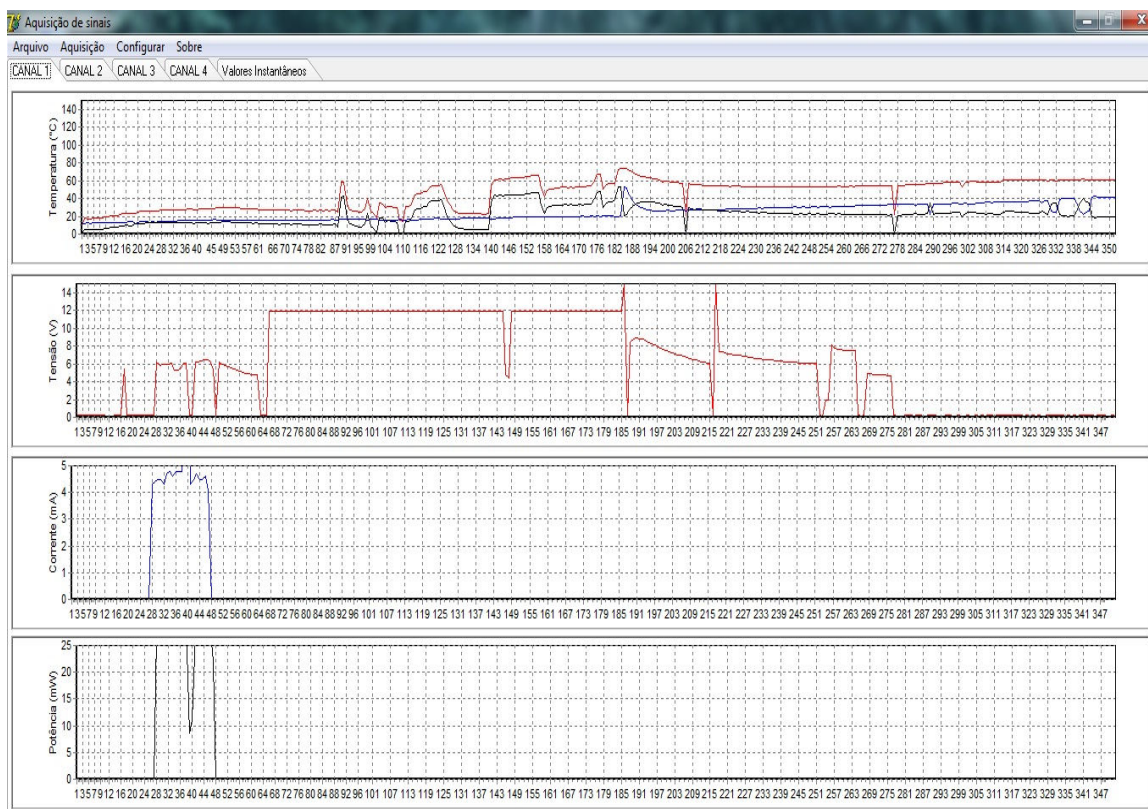


Figura 4.10 - Demonstrativo da tela de gráficos gerados pelo *software*

Ao visualizar a Figura 4.10 os primeiros gráficos apresentam a temperatura quente e a fria, bem como, a diferença entre elas (gradiente), o segundo gráfico apresenta o valor de tensão gerado, enquanto o terceiro a corrente, e finalmente, o último gráfico apresenta a potência elétrica resultante do microgerador. Destaca-se que por meio de um sistema computacional, os gráficos serão gerados conforme a aquisição é realizada sendo estes dados armazenados para posterior leitura.

Portanto, para a realização dos ensaios no protótipo desenvolvido efetua-se a medição de tensão nos módulos termoeletrônicos. Tendo em vista que o experimento está operando em vazio, os valores de corrente e potência de saída são desprezados. Os valores coletados na análise de comportamento dos módulos termoeletrônicos são apresentados na Tabela 4.2 para o módulo INBC1-127.0HTS e na Tabela 4.3 para o módulo TEHP1-24156-1.2 em comparativo com os dados obtidos do *Datasheet* (Tensão Teórica).

Tabela 4.2 - Valores Experimentais Obtidos para o Módulo INBC1-127.0HTS

| Temperatura Lado Quente (°C) | Temperatura Lado Frio (°C) | Tensão Medida (V) | Tensão Teórica (V) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 84 | 34 | 0,9 | 1,3 |
| 100 | 36 | 1,15 | 1,7 |
| 121 | 40 | 1,53 | 2,1 |
| 150 | 45 | 2,1 | 2,6 |
| 181 | 51 | 2,6 | 3,4 |
| 210 | 57 | 3,18 | 3,9 |
| 231 | 62 | 3,61 | 4,3 |
| 250 | 68 | 4,05 | 4,7 |
| 262 | 72 | 4,35 | 5,0 |

Tabela 4.3 - Valores Experimentais Obtidos para o Módulo TEHP1-24156-1.2

| Temperatura Lado Quente (°C) | Temperatura Lado Frio (°C) | Tensão Medida (V) | Tensão Teórica (V) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 73 | 23 | 0,51 | 2,6 |
| 94 | 30 | 0,68 | 3,0 |
| 116 | 35 | 0,89 | 4,2 |
| 146 | 41 | 1,12 | 5,2 |
| 180 | 50 | 1,38 | 6,9 |
| 211 | 58 | 1,72 | 7,9 |
| 236 | 67 | 1,89 | 8,4 |
| 254 | 72 | 2,1 | 9,0 |
| 265 | 75 | 2,21 | 10 |

Os dados apresentados na Tabela 4.2 para o módulo INBC1-127.0HTS também podem ser visualizados na forma gráfica na Figura 4.11, gerado por meio dos resultados obtidos. Percebe-se, facilmente, que ao ocorrer o aumento do gradiente de temperatura, tem-se por consequência uma maior tensão de saída na carga.

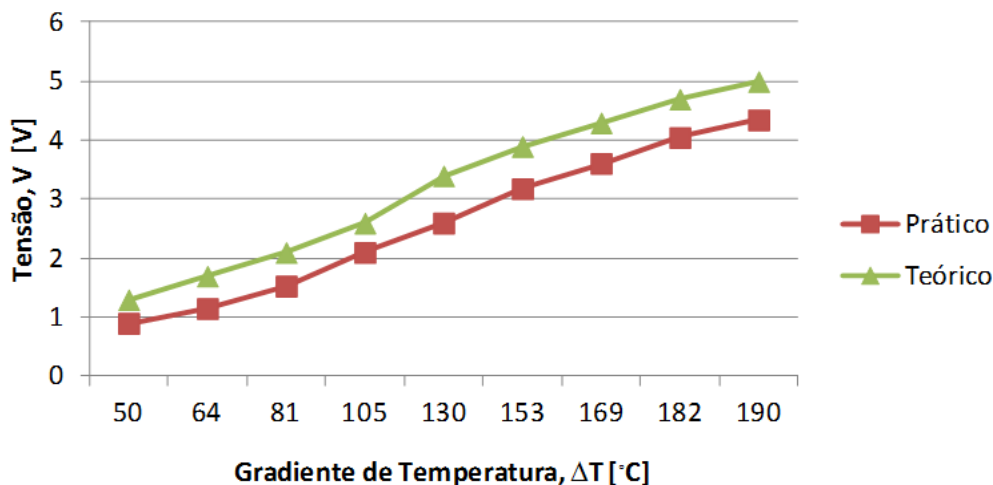


Figura 4.11 - Gráfico de Tensão versus ΔT para o módulo INBC1-127.0HTS.

De forma análoga, os dados apresentados na Tabela 4.3 para o módulo TEHP1-24156-1.2 também podem ser visualizados na forma de gráfico na Figura 4.12, gerado por meio dos resultados obtidos. Percebe-se que o efeito se repete, ou seja, ocorrendo o aumento do gradiente de temperatura tem-se por consequência uma maior tensão de saída na carga.

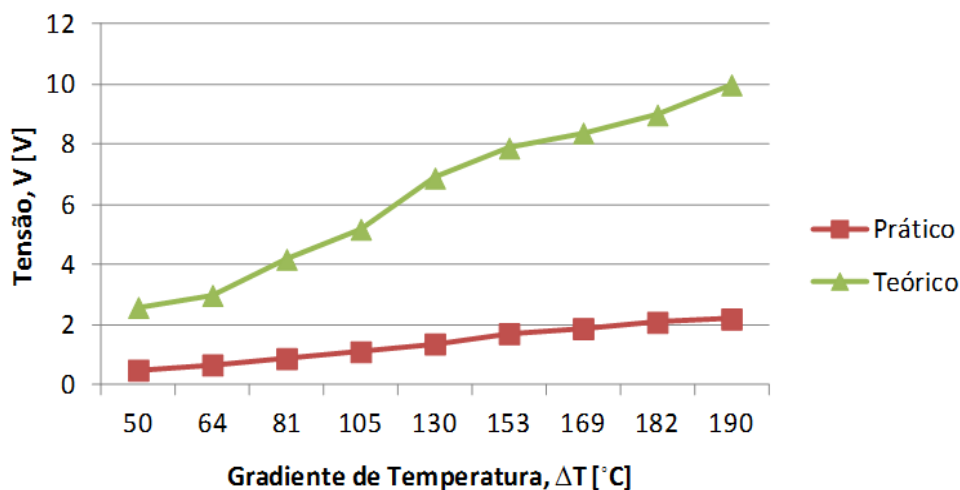


Figura 4.12 - Gráfico de Tensão versus ΔT para o módulo TEHP1-24156-1.2.

Após analisar o comportamento dos módulos termoelétricos em função do gradiente de temperatura (ΔT), efetuou-se a aplicação de carga, sendo utilizada para este fim uma resistência de 6Ω . A Tabela 4.4 e Tabela 4.5 apresentam, respectivamente, os principais valores obtidos experimentalmente da potência gerada pelos módulos termoelétricos INBC1-127.0HTS e TEHP1-24156-1.2 em comparativo com os dados obtidos do *Datasheet* (Potência Teórica) quando alimentam uma carga fixa puramente

resistiva.

Tabela 4.4 - Valores de Potência Coletados no Experimento para o Módulo INBC1-127.0HTS.

| Temperatura Lado Quente (°C) | Temperatura Lado Frio (°C) | Potência Medida (W) | Potência Teórica (W) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 27 | 22 | 0,05 | 0,07 |
| 48 | 28 | 0,42 | 0,45 |
| 73 | 39 | 1,07 | 0,55 |
| 100 | 51 | 1,99 | 1,00 |
| 110 | 54 | 2,40 | 1,35 |
| 153 | 71 | 3,26 | 2,35 |
| 175 | 79 | 4,59 | 3,40 |
| 198 | 85 | 5,10 | 4,20 |
| 210 | 92 | 5,49 | 4,80 |

Tabela 4.5 - Valores de Potência Coletados no Experimento para o Módulo TEHP1-24156-1.2.

| Temperatura Lado Quente (°C) | Temperatura Lado Frio (°C) | Potência Medida (W) | Potência Teórica (W) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 29 | 13 | 0,005 | 0,35 |
| 40 | 09 | 0,195 | 0,47 |
| 59 | 12 | 0,430 | 0,70 |
| 73 | 15 | 0,670 | 0,85 |
| 85 | 18 | 0,880 | 1,10 |
| 94 | 20 | 1,050 | 1,25 |
| 104 | 23 | 1,320 | 1,60 |
| 109 | 23 | 1,480 | 1,80 |
| 112 | 25 | 1,486 | 1,85 |

Os dados apresentados na Tabela 4.4 para o módulo INBC1-127.0HTS também podem ser visualizados na forma de gráfico na Figura 4.13, gerado por meio dos resultados obtidos. Percebe-se que ao ocorrer o aumento do gradiente de temperatura (ΔT), tem-se por consequência uma maior potência consumida pela carga.

Os dados apresentados na Tabela 4.5 para o módulo TEHP1-24156-1.2 podem ser visualizados na forma de gráfico na Figura 4.14, gerado por meio dos resultados obtidos. Percebe-se que o mesmo fenômeno observado anteriormente ocorre, ou seja, o aumento do

gradiente de temperatura tem como consequência uma maior potência consumida pela carga.

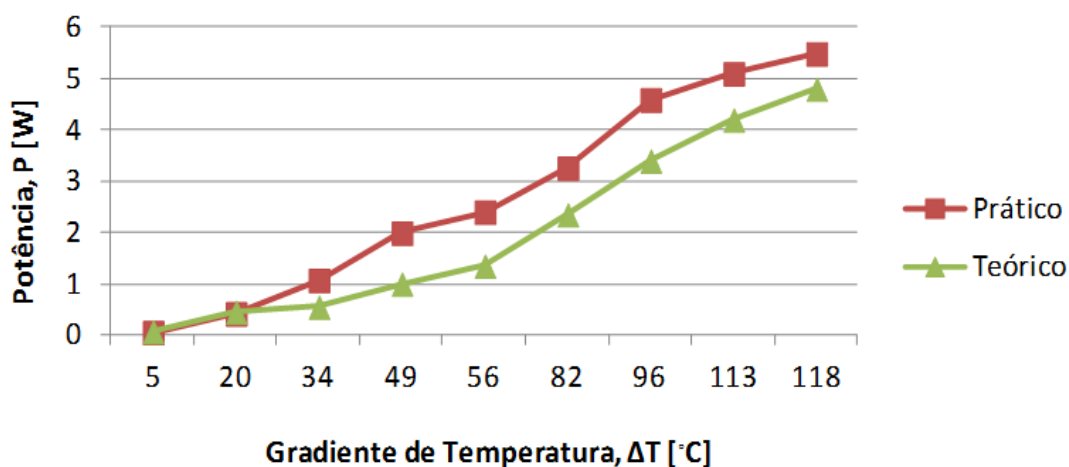


Figura 4.13 - Gráfico da Potência para o módulo INBC1-127.0HTS

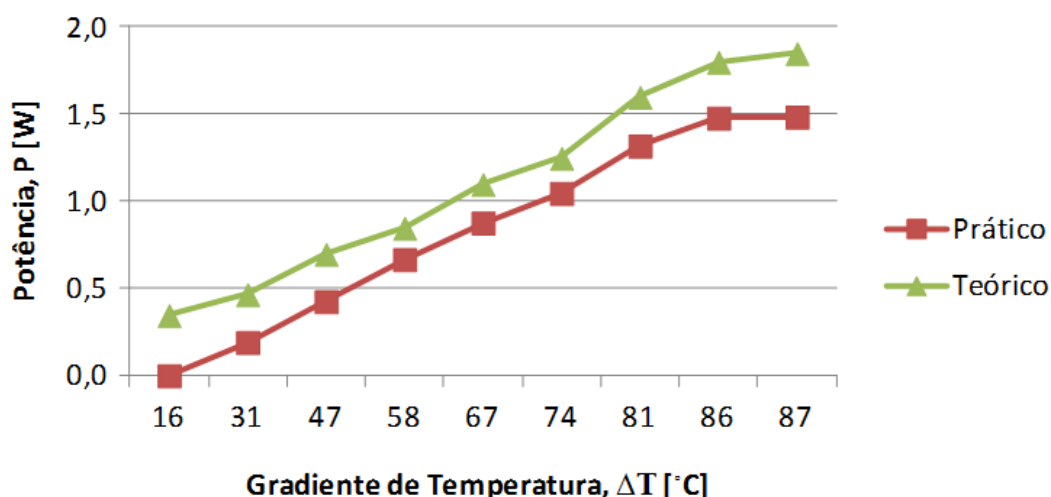


Figura 4.14 - Gráfico da Potência para o módulo TEHP1-24156-1.2

Destacam-se os resultados experimentais do módulo termoeétrico modelo INBC1-127.0HTS, o qual apresenta uma tensão de 4,34Volt perante um gradiente de 190°C e uma potência gerada de 5,5W, valores estes que superam os valores contidos no *datasheet's*.

De forma geral os resultados apresentados em ambos os módulos termoeétricos, a tensão e a potência variavam proporcionalmente com o gradiente de temperatura (ΔT), sendo que este dificilmente será estável pois, na superfície de contato a temperatura é heterogênea. Através dos ensaios nota-se que os TEG's obtiveram um bom desempenho para geração de energia apesar de não alcançarem o desempenho contido no *datasheet* devido a variação de temperatura na superfície.

4.2 Desempenho dos Módulos Termoelétricos em Associações Elétricas

Com o intuito de verificar o comportamento dos módulos termoelétrico quando submetidos a diferentes associações elétricas, partiu-se do princípio básico de análise de circuitos elétricos, onde a associação de fontes de tensão em série faz com que a diferença de potencial total do circuito seja igual à soma das tensões gerada por cada fonte e que a associação de fontes em paralelo faz com que a corrente resultante do circuito seja a soma das correntes fornecidas por cada fonte. Apesar de ser uma afirmação dedutiva, já que os módulos termoelétricos comportam-se como fontes de tensão, porém não se encontram referências com estas comprovações práticas destas associações. Logo, optou-se por comprovar o comportamento dos módulos por meio de análise experimental visando validar parte da metodologia apresentada no capítulo 3.

4.2.1 Associação em Série de Módulos Termoelétricos

O procedimento inicial tem a finalidade de mostrar que os módulos termoelétricos se comportam como fontes de tensão quando estão associados em série, fazendo com que a tensão total resultante seja igual à soma das tensões geradas por cada módulo individualmente.

De acordo com a lei de *Kirchoff* uma associação em série de fontes de tensão permite aumentar a diferença de potencial disponibilizada para efeitos de alimentação de um circuito. Logo, a tensão disponível aos terminais de saída de uma associação em série de fontes de tensão é dada pela soma das tensões parciais e suas respectivas resistências internas. Conforme pode ser visualizado na Figura 4.15, V_1 e V_2 representam a tensão gerada enquanto R_1 e R_2 representam as resistências internas de cada módulo termoelétrico, respectivamente.

Ao analisar a Figura 4.15 percebe-se que a adição dos valores nominais das tensões deve levar em consideração a polaridade da ligação, ou seja, polaridades iguais adicionam-se e polaridades opostas subtraem-se. A resistência interna resultante é a soma das resistências internas de cada uma das fontes.

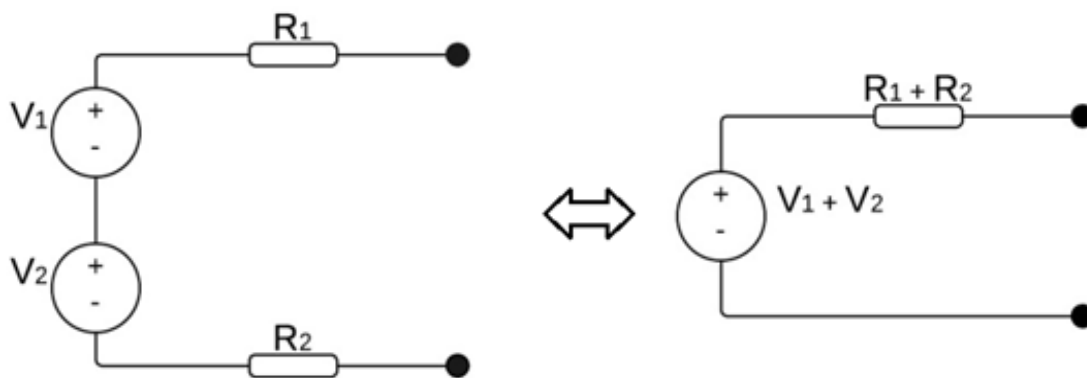


Figura 4.15 - Associação em série de fontes de tensão

Para comprovar que a tensão com os módulos em série é a soma das tensões geradas por cada um, de forma análoga a uma fonte de tensão, foram medidas com apenas um módulo e depois respectivamente com dois, três e quatro conectados. O resultado da análise experimental é apresentado na Figura 4.16.

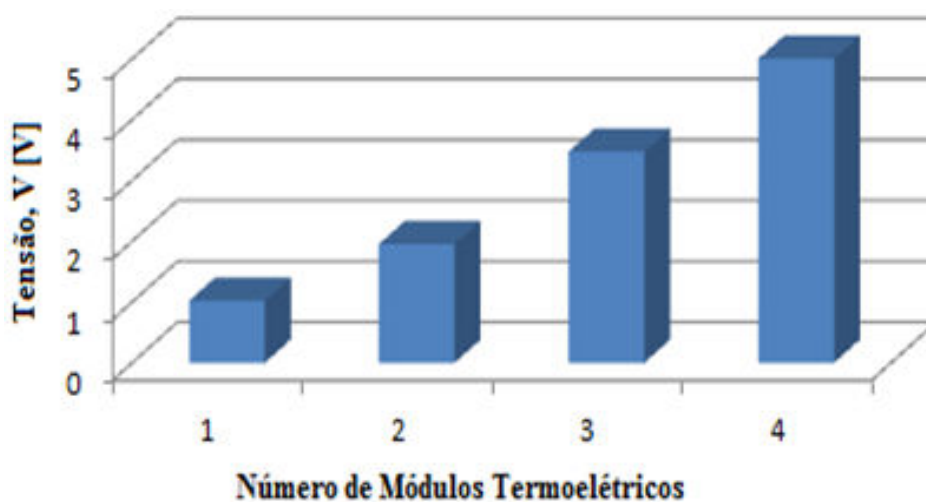


Figura 4.16 - Demonstrativo da tensão de saída dos módulos conectados em série

Na Figura 4.16, percebe-se que cada módulo contribui com aproximadamente 1,2V na tensão total (4,8V), sendo que não foi exatamente a mesma, pois as temperaturas oscilam continuamente durante cada medição.

Destaca-se que submetendo quatro módulos termoelétricos do modelo (TEP1-1264-1.5) às mesmas temperaturas em seus lados quente e frio, pode-se perceber que cada um gerava aproximadamente a mesma tensão e neste caso os módulos operam como fontes de tensão conectadas em série.

4.2.2 Associação em Paralelo de Módulos Termoelétricos

O procedimento visa demonstrar que os módulos termoelétricos se comportam como fontes de tensão quando estão associados em paralelo, fazendo com que a tensão se mantenha e a corrente total resultante seja igual ao somatório das correntes geradas por cada módulo individualmente.

Para comprovar a segunda dedução sobre a divisão da corrente suprida entre os módulos termoelétricos, foi alimentada uma carga (resistor) com apenas um módulo termoelétrico e medida a corrente elétrica. Posteriormente, foi colocado outro módulo com as mesmas especificações em paralelo ao módulo que já alimentava a carga, a fim de verificar se a corrente se dividia igualmente entre os módulos termoelétricos comportando-se como fontes de correntes em paralelo.

Para validar o resultado, foi colocado outro módulo em paralelo com o que já estava alimentando o resistor. Com isso, a corrente do módulo que já estava no local se reduziu para a metade, provando que a corrente fornecida se divide entre os módulos termoelétricos, operando como fontes de correntes em paralelo. O resultado encontrado está ilustrado na Figura 4.17.

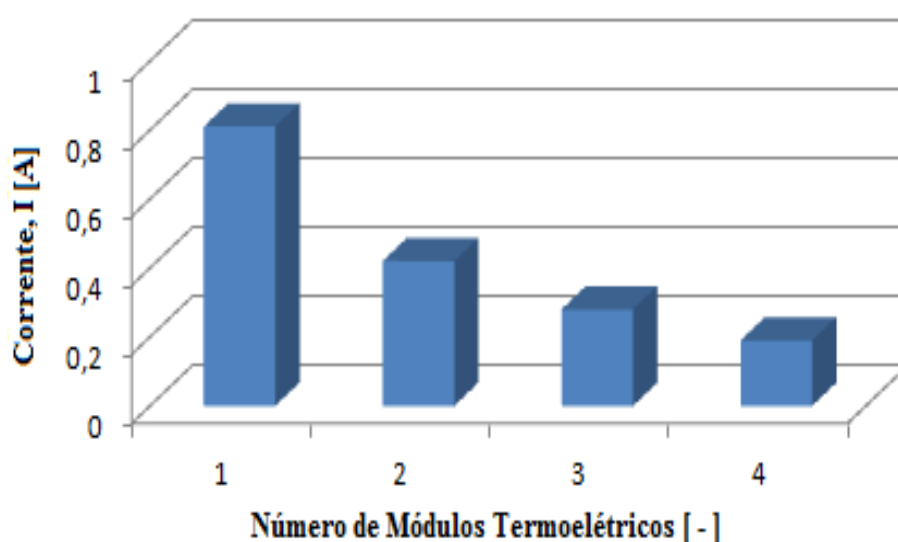


Figura 4.17 - Demonstrativo da corrente de saída dos módulos conectados em paralelo

Na Figura 4.17, percebe-se que cada módulo contribui com aproximadamente 0,19A da corrente total (0,78A), sendo que não foi exatamente a mesma, pois as temperaturas oscilam continuamente durante cada medição.

Destaca-se que submetendo quatro módulos termoeétricos do modelo (TEP1-1264-1.5) às mesmas temperaturas em seus lados quente e frio, foi possível perceber que cada um gerava aproximadamente a mesma corrente quando expostos ao mesmo gradiente de temperatura, neste caso os módulos operam como fontes de correntes conectadas em paralelo.

Porém, nesta operação quando se associam os módulos termoeétricos submetidos a gradientes de temperatura diferentes necessita-se tomar alguns cuidados, pois resulta na circulação de corrente entre os módulos termoeétricos. Conforme pode ser visualizado na Figura 4.18 onde V_1 e V_2 representam a tensão gerada enquanto R_1 e R_2 representam as resistências ôhmicas de cada módulo termoeétrico associado em paralelo respectivamente.

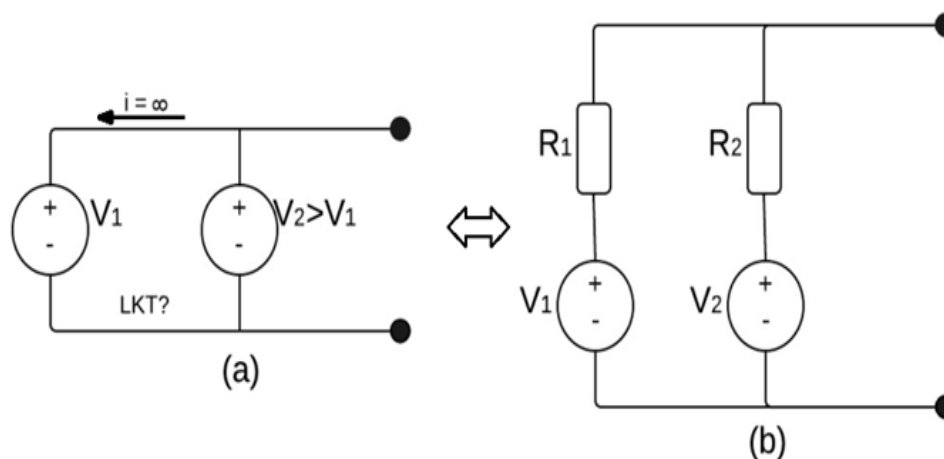


Figura 4.18 - Associação em paralelo de fontes de tensão

Este fenômeno ocorre, pois os módulos termoeétricos quando submetidos a gradientes de temperaturas diferentes comportam-se como fontes de tensão que apresentam valores nominais bastante diferenciados e resistências internas reduzidas, que ao serem associadas em paralelo (Figura 4.18.a), criam uma malha cuja solução é apenas compatível com a circulação de uma corrente. Portanto, a corrente entre as fontes é sempre limitada pelas respectivas resistências internas (Figura 4.18.b), valor que pode ser bastante elevado se estas não dispuserem de mecanismos de proteção.

Logo, com o intuito de eliminar a circulação de corrente entre os módulos opta-se por utilizar diodos conectados em série em cada ramo. Desta forma, não permitirá a circulação de corrente entre módulos e permitirá somente a circulação de corrente no

sentido da carga. A Figura 4.19 apresenta o circuito com os diodos conectados em série.

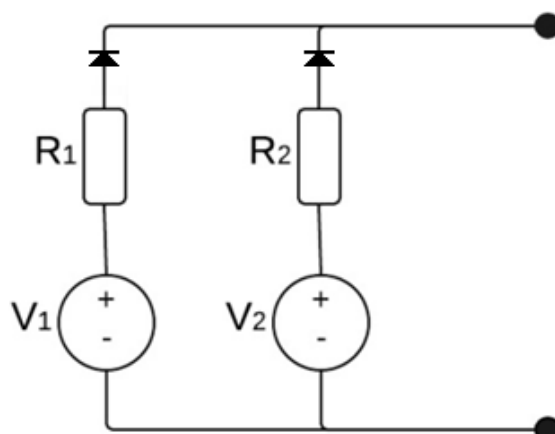


Figura 4.19 - Demonstrativo da associação em paralelo com proteção

Com a inclusão dos diodos evita-se a circulação de corrente reversa entre os módulos, porém resulta numa queda de tensão do diodo que pode variar de 0,3 a 0,7V dependendo do material utilizado para fabricação do diodo. Para facilitar a realização dos experimentos desenvolveu-se uma placa de interconexão cujo esquema elétrico é apresentado na Figura 4.20.

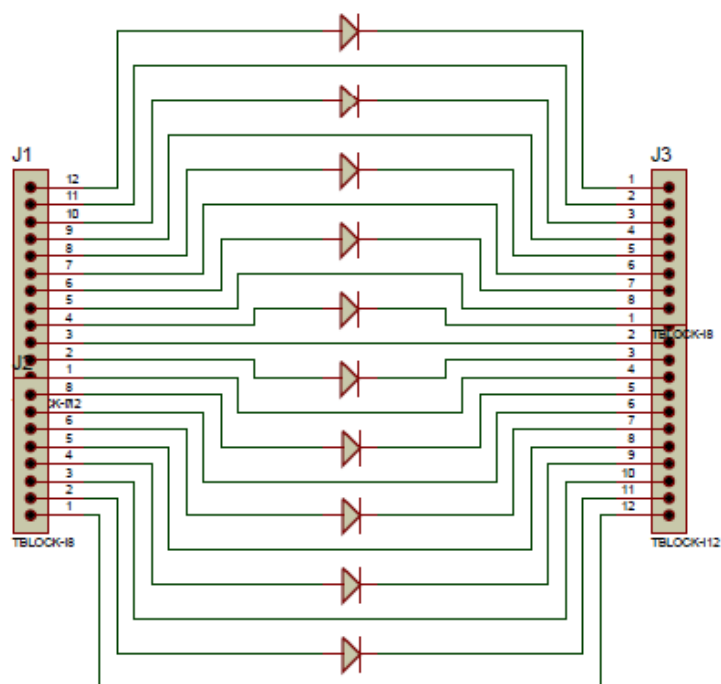


Figura 4.20 - Esquema elétrico da placa de interconexão

A placa de interconexão é composta por 10 diodos que podem ser conectados conforme a necessidade do experimento. A Figura 4.21 apresenta a placa de interconexão desenvolvida.

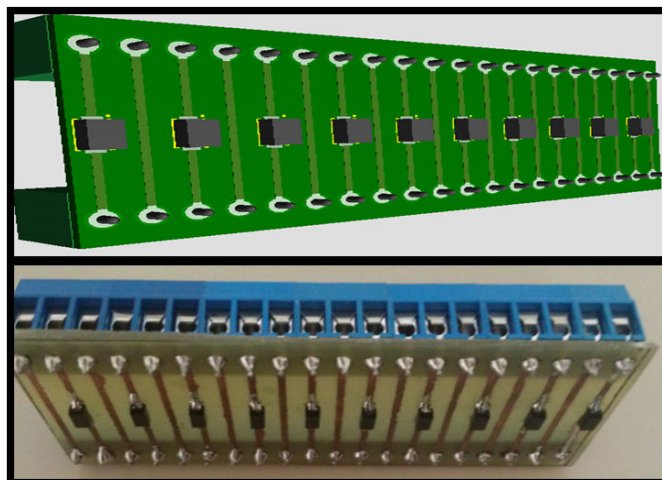


Figura 4.21 - Demonstrativo do bloco de interconexão desenvolvido

A utilização do bloco de interconexão apresentado na Figura 4.21 permitiu realizar diversos experimentos utilizando o mesmo bloco para realizar diferentes arranjos elétricos com os módulos termoeletricos, e principalmente, não permitiu a circulação de corrente entre módulos e somente a circulação de corrente no sentido da carga.

4.3 Desenvolvimento Preliminar de um Microgerador Termoeletrico

Esta etapa descreve a análise experimental desenvolvida que visa comprovar a viabilidade de se alimentar uma carga a partir de um sistema de cogeração termoeletrica. Para isto, utilizou-se o seguinte *setup* de montagem ilustrado na Figura 4.22.

Posteriormente, aplicou-se a metodologia desenvolvida no capítulo 3 para dimensionamento de um microgerador termoeletrico fazendo-se uso dos seguintes dados de projeto:

- a) Potência na carga;
- b) Tensão de alimentação;
- c) Temperatura da parede quente;
- d) Temperatura da parede fria;
- e) Quantidade de horas que o sistema fica ligado;

- f) Escolha do módulo termoelétrico; e
- g) Curva de desempenho.



Figura 4.22 - Diagrama de Blocos da *Setup* da Montagem Experimental

A carga escolhida foi uma lâmpada composta por 5 LEDs de 1Watt, totalizando uma potência de 5W. Na Figura 4.23 apresenta-se a imagem da lâmpada utilizada.



Figura 4.23 - Demonstrativo da Lâmpada LED

Com a potência da carga definida, o próximo passo foi encontrar a tensão de alimentação da lâmpada. Com o auxílio de uma fonte chaveada, pode verificar-se que com 15V a luminária já acendia, mas o valor que a deixou com uma luminosidade intensa foi de

17V. Portanto, definiu-se 17V como sendo a tensão ideal para alimentar o sistema.

Sabe-se que a geração de um sistema termoelétrico tem a sua tensão em função da diferença de temperatura, e esta varia constantemente nos sistemas térmicos. Baseando-se nessa informação, foi possível notar que para manter os 17V seria necessário a aplicação de um conversor CC-CC, que consiste em um equipamento que apesar de ter sua tensão de entrada variando ele mantém o valor de tensão na saída sempre constante.

Então, o conversor escolhido foi um Conversor *Buck-Boost* para que a variação da tensão de entrada pudesse ser maior ou menor que a diferença de potencial necessária para alimentar a carga. As características deste conversor são:

- a) Potência máxima: 100W;
- b) Tensão de entrada: 3,5 a 30V; e
- c) Tensão de saída: 4 a 30V.

Para testar o funcionamento do conversor CC-CC do tipo *Buck-Boost* utilizou-se uma fonte chaveada, o conversor foi alimentado com uma tensão de 10V e sem carga conectada em sua saída, apresentando uma tensão na saída de 35V. Esta tensão foi ajustada conforme a necessidade, que no caso era 17V. Variando a tensão de entrada até 32V que é a máxima aceitável pelo conversor, pôde perceber-se que a tensão de saída não se alterava. Finalmente, definiu-se a tensão de alimentação necessária para a carga que é igual à tensão de saída do sistema de geração termoelétrico como sendo de 10 a 32V, havendo assim uma grande faixa para a aplicação do sistema.

As variáveis a determinar foram as temperaturas do lado quente e frio. Para simular uma parede quente, utilizou-se um fogão elétrico que facilmente alcança os 300°C. Já para a temperatura do lado frio, foi montado um sistema para circulação de água, composto por uma bomba que faz a sucção da água de um tanque fazendo com que ela circule através de um bloco de refrigeração e que foi confeccionado em alumínio por causa da alta condutividade térmica e por ser um material de fácil acesso no mercado. O bloco de refrigeração desenvolvido pode ser visto na Figura 4.24.

Conforme se pode verificar na Figura 4.22, o fogão fica na zona inferior, enquanto o bloco de refrigeração fica na zona superior, sendo colocados entre eles os módulos termoelétricos. Como a troca de calor entre a parte quente e a parte fria, tanto por condução quanto por radiação, é muito grande, foi colocada lã de rocha entre o fogão e o bloco refrigerador, para diminuir esta troca de calor.

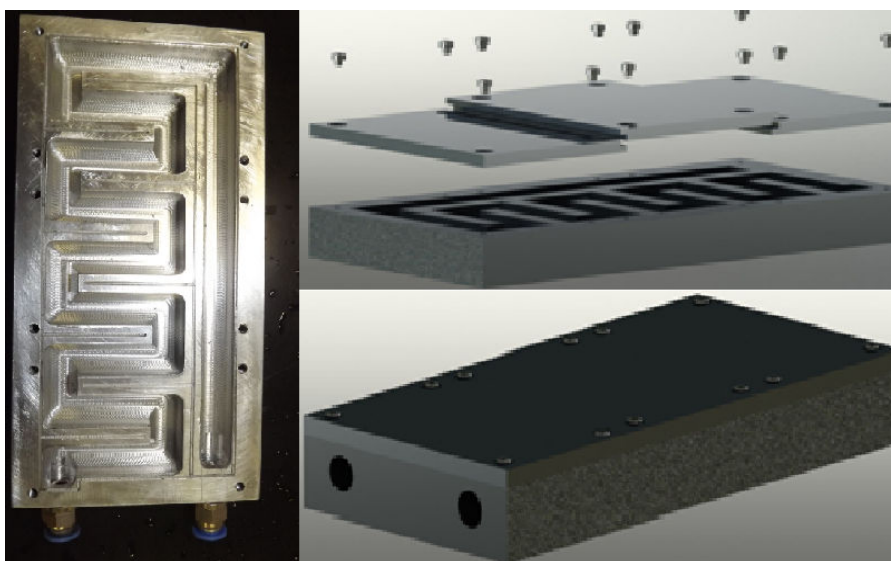


Figura 4.24 - Demonstrativo do Bloco de Refrigeração Desenvolvido

Tendo como objetivo de facilitar a medição de temperatura da Face Fria e da Face Quente do arranjo de módulos termoelétricos, foram fabricadas peças de alumínio com as mesmas dimensões dos módulos termoelétricos. Nestas peças foram feitos furos nas zonas laterais para colocação dos termopares. Assim, havia uma peça de alumínio entre cada módulo e a parede quente.

Com todos os dados encontrados, restou os módulos termoelétricos. Para esta etapa foram analisados os *datasheets* de alguns modelos e foi escolhido o módulo termoelétrico modelo 1261G-7L31-24CX1 da *Custom Thermoelectric*, que resiste a uma temperatura máxima de 300°C em sua Face Quente [55].

Foram adquiridos 6 módulos termoelétricos do modelo 1261G-7L31-24CX1 da *Custom Thermoelectric*. A temperatura da Face Quente foi colocada a 250°C para evitar o risco de danificar o módulo.

Analisando o gráfico da curva de tensão em relação ao gradiente de temperatura (ΔT), verificou-se que com 250°C na face quente do módulo e 30°C no lado frio pôde-se obter-se uma tensão de 3,2V na saída de cada módulo termoelétrico. Portanto, com 6 módulos a tensão resultante é igual a 19,2V e caso a temperatura da face quente baixe para 150°C ainda é possível obter os 10V necessários na saída. A Figura 4.25 apresenta o gráfico da curva de tensão presente no *datasheet* do módulo escolhido.

Como carga utilizou-se uma lâmpada LED com potência de 5W (Figura 4.23). Assim, a corrente que irá circular por ela é igual a 294mA, pois a sua tensão será de 17V. Esta corrente encontrada é a que irá atravessar a saída do conversor, porém a corrente

máxima na entrada será obtida quando a tensão for mínima, ou seja, igual a 10V.

Portanto, sabendo que a potência de saída é igual à potência de entrada, a corrente de entrada que é a corrente que irá circular nos módulos termoelétricos equivale a aproximadamente 500mA. Analisando o gráfico da corrente do módulo termoelétrico aplicado, nota-se que com as mesmas temperaturas para a tensão a corrente máxima que o módulo irá suportar é maior que 2A, suprimindo facilmente a necessidade da carga.

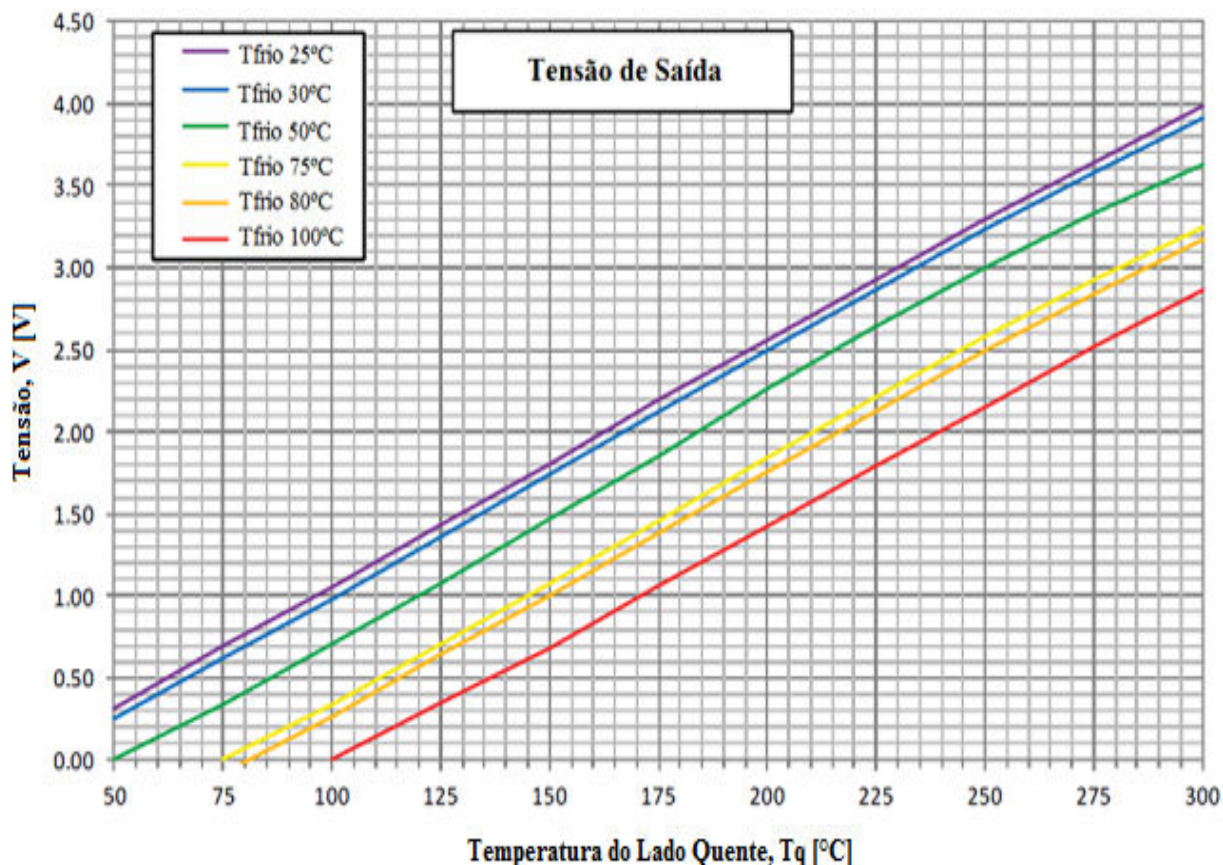


Figura 4.25 - Demonstrativo da tensão no módulo 1261G-7L31-24CX1 [55].

Após obter todo o material necessário para a realização do experimento, iniciou-se a montagem do sistema. Primeiramente, o fogão elétrico (fonte quente): em cima foi colocada uma chapa de ferro para conseguir uma maior área de aplicação, tendo sido colocadas 6 peças de alumínio, disponibilizado como uma matriz 2 por 3, com os furos para colocação do termopar. Esta etapa do processo pode ser vista na Figura 4.26.

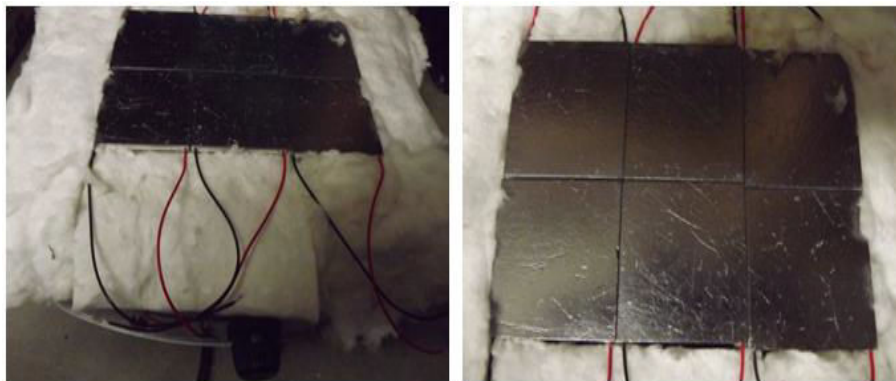


Figura 4.26 - Demonstrativo da disposição dos módulos termoeletrico sobre a fonte quente

Nas duas faces das peças de alumínio foi colocada a pasta térmica para uma melhor condução do calor. O termopar então foi colocado em uma das peças de alumínio para verificar a temperatura e ler a mesma com o *software*. A Figura 4.27 apresenta o gráfico referente a esta medição.

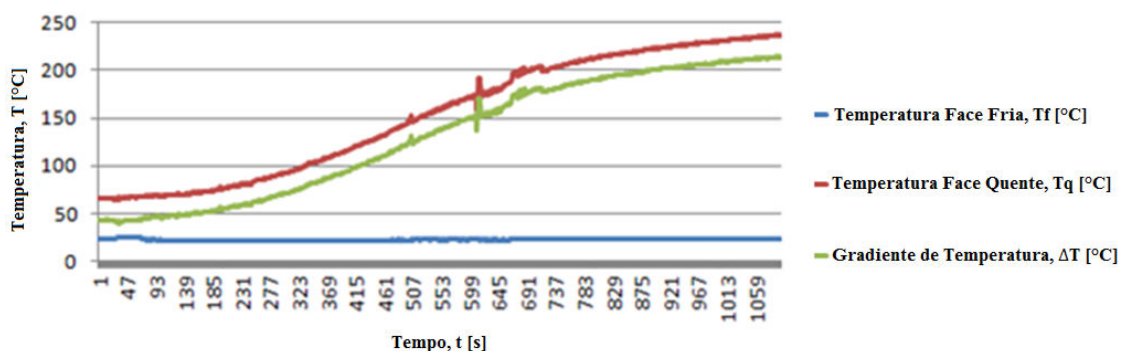


Figura 4.27 - Demonstrativo das temperaturas nas faces quente e fria do sistema cogeração.

Destaca-se que a curva a vermelho é referente à temperatura da face quente lida pelo *software*, ou seja, é a temperatura lida pelo termopar que está na chapa de alumínio sobre o fogão elétrico. A curva a azul representa a temperatura da face fria lida pelo termopar que está na chapa de alumínio sob o bloco de refrigeração. Sendo que este termopar no momento estava desconectado do sistema, medindo apenas a temperatura ambiente. Já, a curva a verde mostra o gradiente de temperatura resultado da diferença entre temperatura da face quente e a temperatura da face fria.

No momento em que a temperatura alcançou valores próximos de 230°C, ela se estabilizou. Com isso, os 6 módulos termoeletricos que já estavam conectados em série, foram colocados sobre cada uma das peças de alumínio. Em cada face dos módulos também foi aplicada pasta térmica para aumentar a condução do calor.

Em seguida o bloco de refrigeração, no qual era bombeada água de um tanque com o auxílio de uma bomba, foi acionado sobre a face fria dos módulos termoeétricos. Instantaneamente, a temperatura do lado quente diminuiu e estabilizou próximo de 170°C, devido à transferência térmica. Por outro lado, a temperatura da face fria sofreu um pequeno acréscimo. A Figura 4.28 mostra a curva de descida desta temperatura quando o sistema de arrefecimento começou a operar.

Na Figura 4.28, nota-se também, que a temperatura do lado frio ficou estabilizada com valores próximos de 30°C. Afirma-se então, que as temperaturas de equilíbrio do sistema foram 170°C e 30°C. Na Figura 4.29 pode-se observar a foto térmica do processo em equilíbrio.

Enfim, os módulos termoeétricos com o sistema completo começaram a gerar eletricidade, porém os resultados não foram os esperados pois a tensão de saída total dos módulos foi de apenas 5V. Utilizando o conversor CC-CC foi possível obter a diferença de potencial necessária na saída, então a carga foi conectada ao sistema.

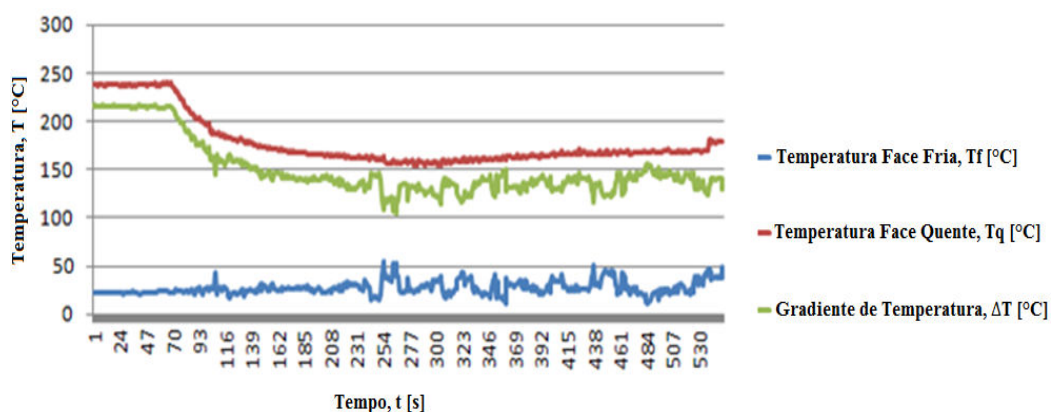


Figura 4.28 - Temperaturas no sistema cogeração após inserção do bloco de refrigeração.

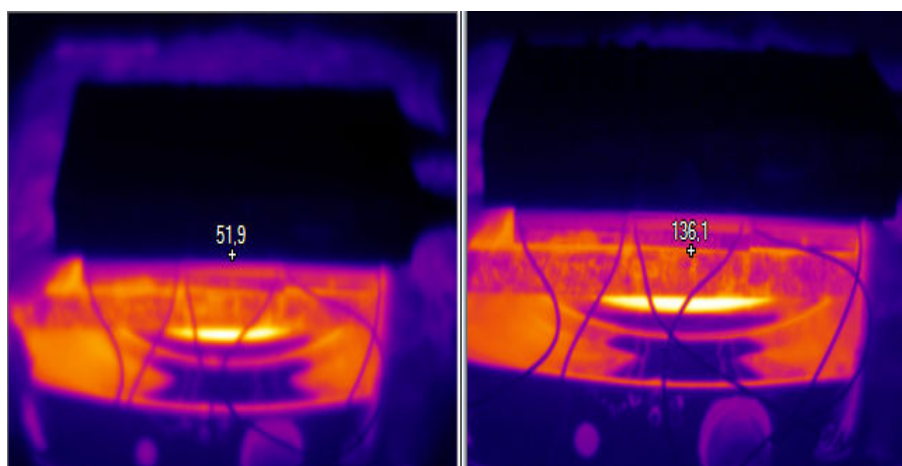


Figura 4.29 - Imagem Térmica do Experimento.

Ao energizar a lâmpada, a mesma operou (acesa) durante todo o ensaio sem apresentar oscilações de luminosidade. Quando o sistema termoeletrico entrou em equilíbrio térmico, a lâmpada continuou acesa por cerca de 30 minutos, conforme esperado. Na Figura 4.30 visualiza-se a foto com a lâmpada acesa alimentada pelo conversor CC-CC tipo *Buck-Boost*.

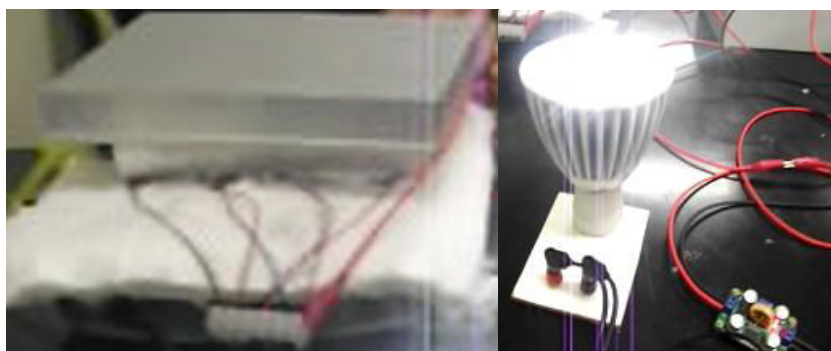


Figura 4.30 - Demonstrativo da validação do experimento.

Ao analisar o comportamento do sistema percebe-se que a temperatura do sistema demorou a estabilizar. No início, o gradiente de temperatura foi maior, consequentemente a tensão também era mais elevada. Esta, por sua vez, foi diminuindo gradativamente conforme a diferença de temperatura se reduzia. Quando a tensão medida estava próxima de 4V, a carga (lâmpada) entrou no sistema. Instantaneamente, a tensão foi reduzida para valores em torno de 2,8V, fazendo com que a corrente fosse elevada.

Com as temperaturas do sistema já estabilizadas, a tensão ficou variando próximo a 2,8V e a lâmpada continuou em funcionamento. As Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 apresentam uma análise referente à tensão, corrente e potência do sistema de microgeração, sendo que os dados foram obtidos por meio de uma bancada composta por sistema de aquisição e *software* para aquisição e validação de módulos termoeletricos.

Na Figura 4.31 referente à variação de tensão, visualiza-se como o valor da tensão foi reduzindo conforme a diferença de temperatura diminuía, validando a informação de que a tensão gerada por um módulo termoeletrico está diretamente ligada ao gradiente de temperatura. Neste mesmo gráfico percebe-se uma variação de aproximadamente 1V da tensão no momento em que a lâmpada é acesa e logo após a estabilização do sistema, conforme citado anteriormente.

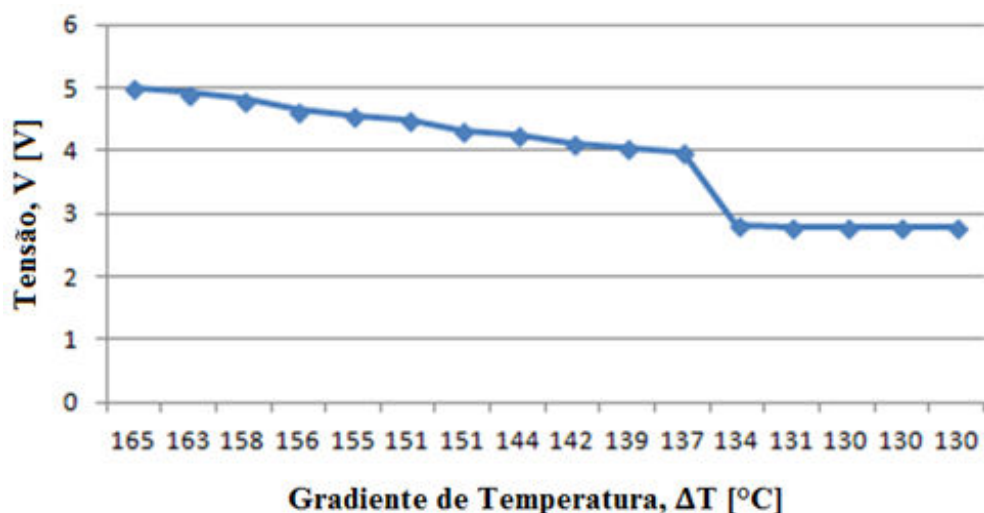


Figura 4.31 - Demonstrativo da Tensão Gerada pelo Microgerador

No gráfico da corrente, presente na Figura 4.32, é visto o oposto do que ocorreu com a tensão. Nesta, vê-se uma elevação da corrente no instante de ligação da carga. Esta elevação é proporcional ao decréscimo da tensão, já que a potência na saída do conversor é igual à potência de entrada, logo com uma menor diferença de potencial na entrada a corrente será maior. Após a entrada da carga, nota-se também que a corrente permanece constante com o sistema térmico em equilíbrio.

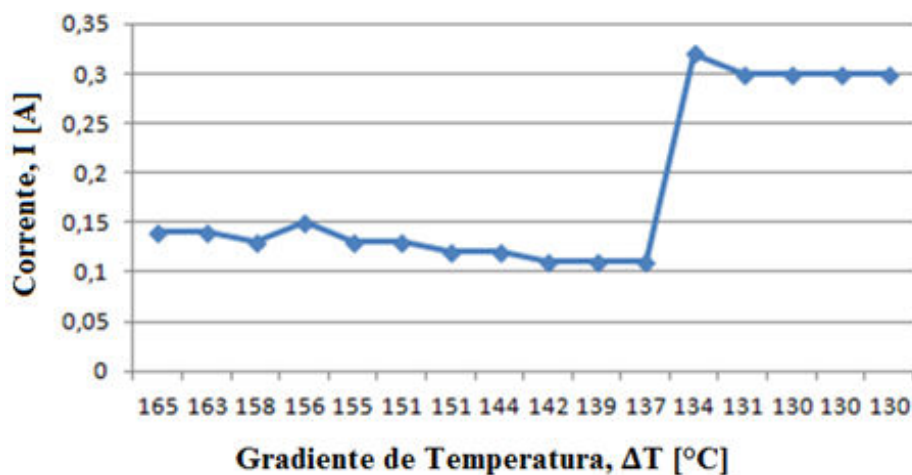


Figura 4.32 - Demonstrativo da Corrente Fornecida pelo Microgerador

O gráfico da potência, apresentado na Figura 4.33, mostra que antes da ligação da carga ao sistema havia um certo consumo, isto é, a potência consumida era resultante da corrente consumida pelo conversor CC-CC que já estava sendo alimentado. No instante em que a lâmpada foi conectada à saída do conversor CC-CC, verificou-se um aumento na

potência, e assim como a tensão e a corrente, esta obviamente também permaneceu inalterada durante o restante do procedimento.

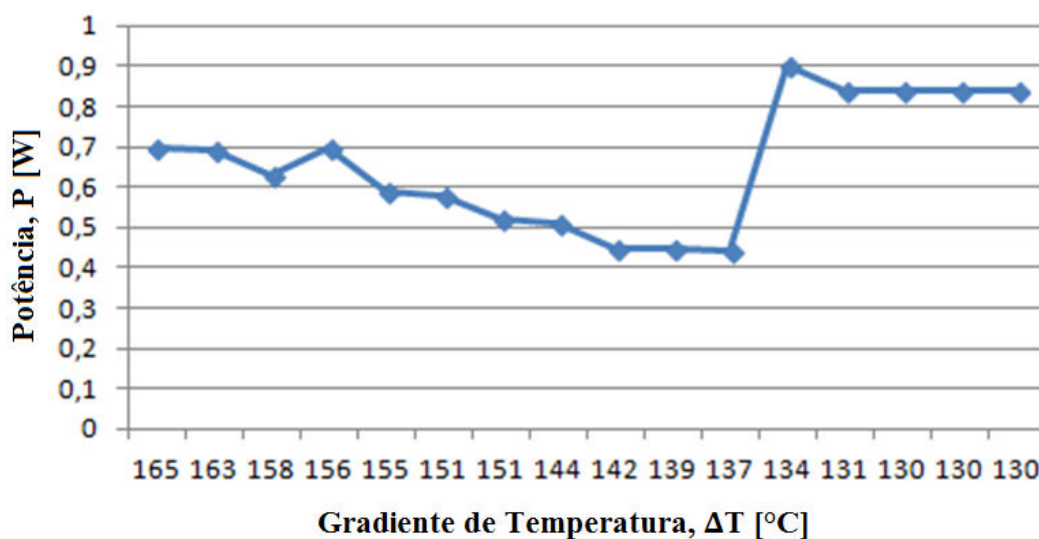


Figura 4.33 - Demonstrativo da Potência Gerada pelo Microgerador

Após as medições da tensão, da corrente e da potência, o sistema ficou operando por cerca de 30 minutos, e a lâmpada continuou acesa. Vale reforçar que em sistemas reais as variações da temperatura são constantes, por isso utilizou-se um conversor CC-CC para manter fixa a tensão na saída.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo, abrange-se o desenvolvimento experimental desta Tese, iniciando-se com dimensionamento numérico utilizando a metodologia proposta, seguido pela desenvolvimento experimental e seus respectivos resultados. Logo, no Capítulo 5, apresenta-se o protótipo do microgerador em escalar seguidos dos principais resultados obtidos por meio de ensaios de validação do sistema de cogeração de energia elétrica através da captação de energias residuais.

5 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MICROGERADOR TERMOELÉTRICO

Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento em escala reduzida do protótipo do microgerador termoelétrico proposto, visando comprovar a sua aplicação e funcionalidade por meio de testes de bancada realizados ao longo deste projeto de pesquisa para caracterização elétrica do microgerador termoelétrico de estado sólido. Com o intuito de facilitar a compreensão das partes que compõem o microgerador proposto, desenvolveu-se um diagrama de blocos apresentado na 5.1.

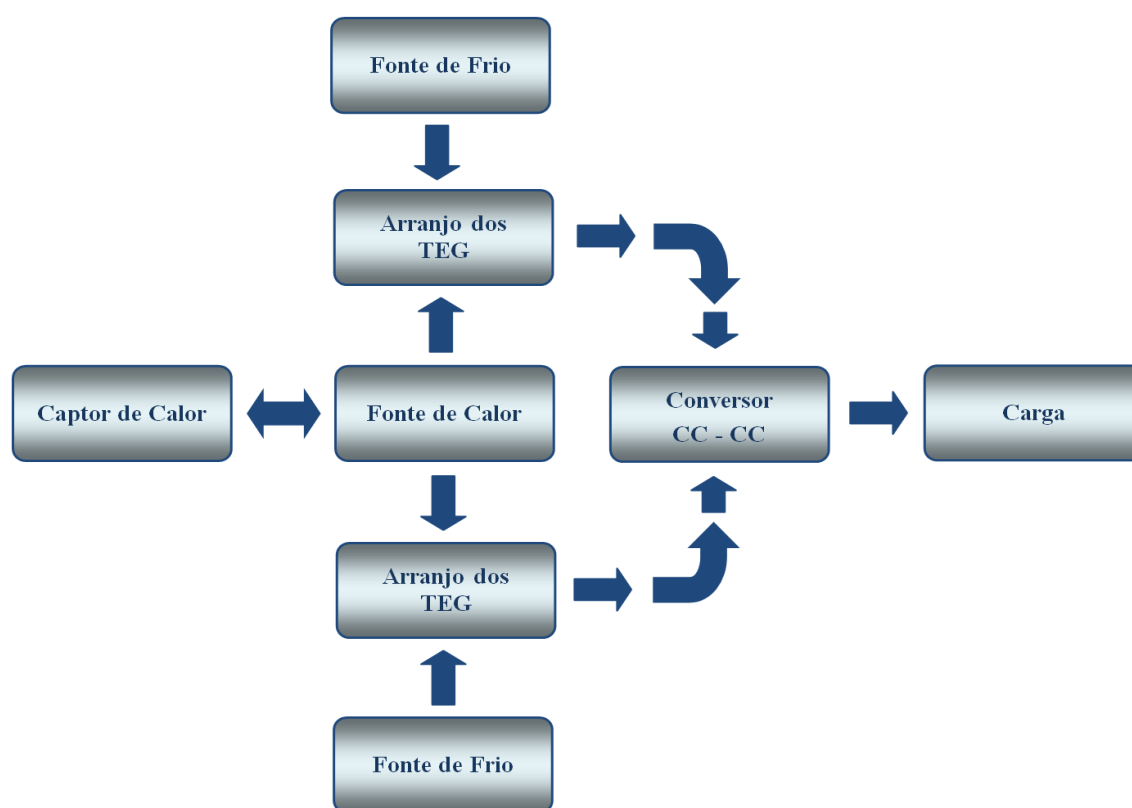


Figura 5.1 - Demonstrativo das partes constituintes do protótipo do microgerador

Conforme pode ser visto na Figura 5.2, o protótipo do microgerador é composto por:

- a) Sistema de transferência de calor: responsável por transferir as perdas térmicas

- do processo para o interior do microgerador;
- b) Sistema híbrido de refrigeração: responsável por manter o gradiente de temperatura entre as faces do módulo termoelétrico;
 - c) Arranjo dos módulos termoeletricos: parte constituída pela associação elétrica e térmica dos módulos termoeletricos de forma a suprir a potência necessária para alimentar a carga; e
 - d) Condicionamento da potência elétrica: constitui-se do conversor CC-CC cuja principal finalidade consiste em manter constante o nível de tensão de saída do sistema, garantindo a integridade da carga.

Na Figura 5.2 apresenta-se o desenho esquemático do protótipo do microgerador idealizado que se caracteriza por ser um Sistema Regenerativo Completo visando a Cogeração de Energia Elétrica por meio da captação do calor dissipado (energias residuais) de processos industriais, transformando energia térmica diretamente em energia elétrica por meio do efeito Termoeletrico.

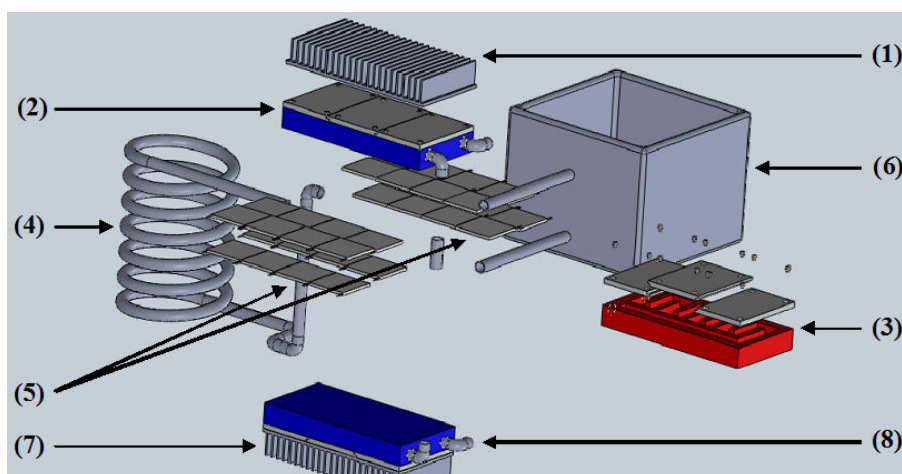


Figura 5.2 - Desenho do protótipo do microgerador proposto

Conforme pode ser visto na Figura 5.2, o protótipo do microgerador termoeletrico é composto por dois sistemas de transferência térmica, sendo um para captação do calor residual (3, 4) de processos industriais, constituído de um módulo de transferência de calor (3) e do captor de calor intercambiável (4), sendo este responsável por fazer a transferência de calor (4) por convecção do processo até ao bloco de transferência de calor (3), onde se encontra o arranjo dos módulos termoeletricos (5).

Adicionalmente, o segundo sistema trata-se de um sistema híbrido de refrigeração (1, 2, 7, 8), composto por aletas (1, 7) e por um bloco de refrigeração plano (2, 8) para

melhorar a área de contato com os módulos termoelétricos, obtendo como subproduto o aquecimento da água quente (6) projeto que pode ser reutilizado no próprio processo industrial. Destaca-se que o sistema térmico desenvolvido permite a sua adaptação ao processo por meio da troca do captor de calor (4), otimizando a transferência térmica para o microgerador.

Posteriormente, o sistema elétrico é preconcebido por meio de uma metodologia de cálculo para o projeto e dimensionamento elétrico de microfones de geração de energia baseado no efeito *Seebeck*, a partir de curvas de desempenho teóricas dos módulos termoelétricos e gradientes de temperatura predeterminados de processos industriais, permitindo dimensionar e determinar o melhor arranjo dos módulos termoelétricos (5) e do condicionamento do sinal (Potência e Tensão) que melhor se adequa à condição de operação da carga suprida bem como, as condições de operação de qualquer processo industrial (gradiente de temperatura), otimizando a geração de energia do microgerador termoelétrico.

Como produto tem-se o projeto e o dimensionamento de um sistema de transferência de calor intercambiável (4) que juntamente com a metodologia de cálculo elétrico resulta no protótipo de um microgerador para captação de energias residuais. Destaca-se que o microgerador termoelétrico trata-se de um desenvolvimento inovador quanto à concepção modular e topologia reconfigurável relativa à aplicação em cogeração.

Finaliza-se apresentando uma foto do protótipo desenvolvido para validação da proposta do termogerador termoelétrico, conforme pode ser visto na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Demonstrativo do protótipo do microgerador desenvolvido.

5.1 Ensaio de Caracterização e Validação do Microgerador Termoelétrico

Esta etapa consiste em comprovar por meio de teste de bancada, o funcionamento do Microgerador Termoelétrico para Captação de Energias Residuais baseado no Efeito *Seebeck* com Sistema de Transferência de Calor Intercambiável.

O *layout* para a realização dos ensaios em bancada é apresentado na Figura 5.3 sendo que para realização dos mesmos utilizou-se os seguintes itens:

- Fonte quente ou Fonte primária para simular a fonte quente do sistema: utilizou-se uma fogão elétrico de 2000W com seletor de temperatura capaz de gerar e manter temperaturas superiores à 500°C em superfície de 490cm²;
- Fonte fria ou Fonte secundária: utilizou-se água à temperatura ambiente (aproximadamente 23°C), armazenada em um reservatório de 20 litros e uma bomba elétrica de 12W alimentada em 220V que consome uma corrente de 0,11A em 60Hz para forçar a recirculação da água pelo bloco de refrigeração;
- Aquisição de dados: utilizou-se o sistema de aquisição e monitoramento de dados desenvolvido, composto por 8 canais de temperatura, 4 canais de corrente (I_{cc}) e 4 canais de tensão (V_{cc}) apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9;
- Carga de teste para realização dos ensaios em carga para determinação da máxima potência fornecida pelo sistema: utilizou-se resistores de potência como carga fixa. A placa desenvolvida com os resistores de potência pode ser vista na Figura 5.4.

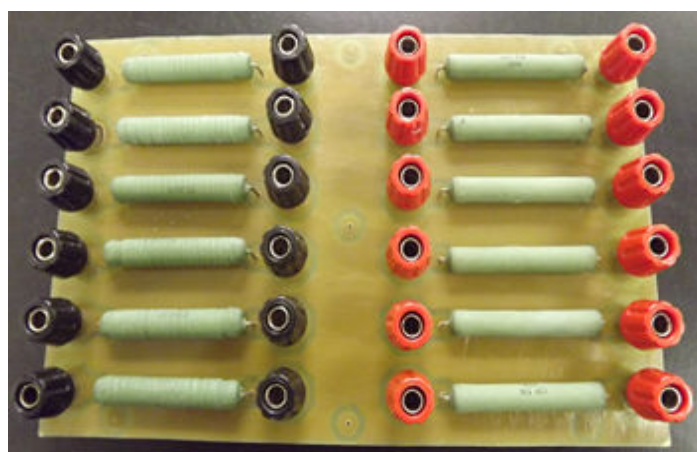


Figura 5.4 - Demonstrativo das cargas de teste utilizadas

Destaca-se que os ensaios em bancada foram realizados com gradientes de temperatura inferiores ao limite máximo de operação do sistema (170⁰C) do microgerador

desenvolvido por questões de atendimento as normas de segurança do laboratório.

Logo, o protótipo do microgerador termoelétrico de estado sólido foi dimensionado para ser capaz de suprir uma carga de aproximadamente 40W, com a tensão de saída de 15Vcc para um gradiente de temperatura máximo de 80⁰C. Na Figura 5.5 apresenta-se o esquemático de ligação dos módulos termoelétricos do microgerador proposto.

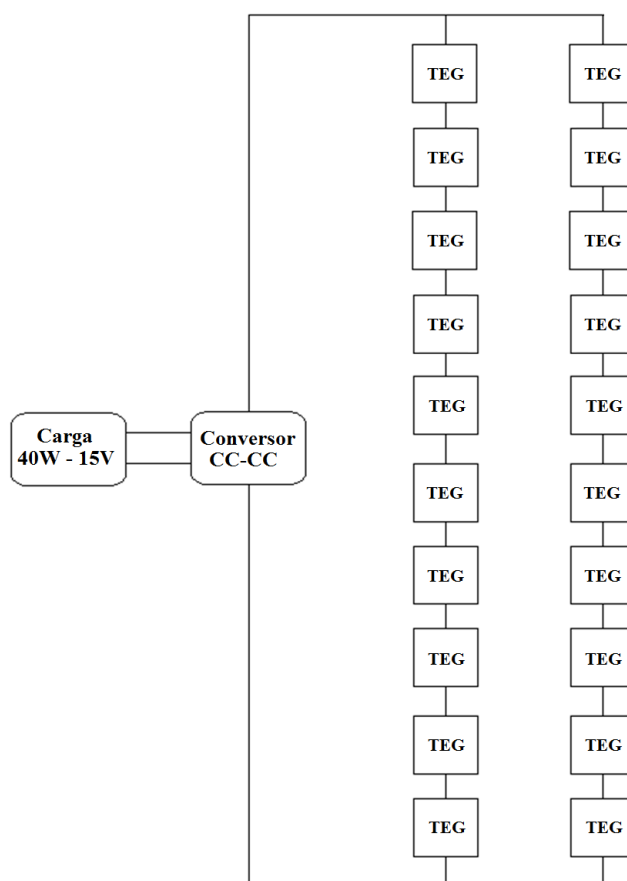


Figura 5.5 - Demonstrativo do arranjo elétrico do microgerador desenvolvido.

Conforme pode ser visto na Figura 5.5, para suprir a potência necessária utilizou-se de 20 módulos termoelétricos, modelo inbC1-127.08HTS, da marca *WATRONIX*, no arranjo elétrico constituído por 10 módulos em série com dois conjuntos série associados em paralelos, sendo que os 20 módulos estão dispostos nas duas faces da fonte quente (Figura 5.2. no item 3) sendo cada uma delas compostas por dez módulos por camada (Figura 5.2. no item 5) [46].

No decorrer deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de bancada para caracterização e validação do microgerador termoelétrico de estado sólido desenvolvido para captação de perdas térmicas.

5.1.1 Ensaio da tensão de circuito aberto ou a vazio

O ensaio de circuito aberto consiste em aplicar um determinado gradiente de temperatura e medir as grandezas térmicas (temperatura, fonte quente e fria) e a tensão elétrica gerada nos terminais de saída (V_{out}) em aberto, ou seja sem a conexão de carga nos terminais de saída do microgerador, sendo que o *layout* do *setup* para realização dos testes é apresentado na Figura 5.3 e a lista de equipamentos descritos no capítulo 5.1. Na Figura 5.6 apresenta-se o gráfico obtido a partir dos resultados do ensaio em circuito aberto que demonstra o incremento da tensão de saída (V_{out}) para diferentes gradientes de temperatura (ΔT).

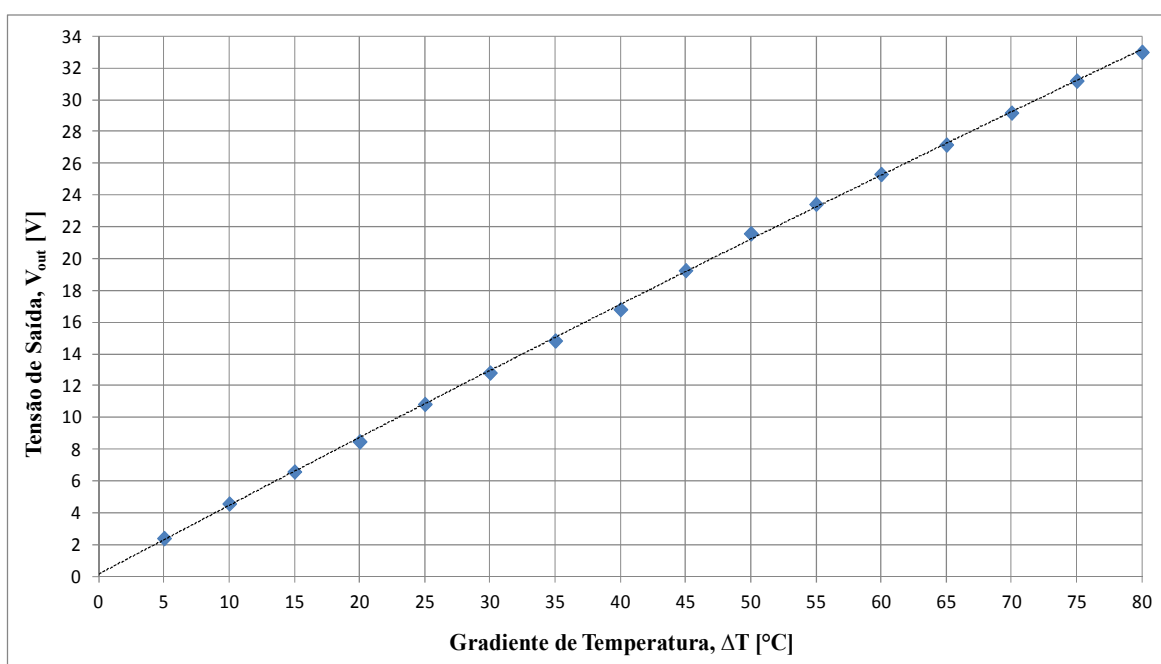


Figura 5.6 - Demonstrativo dos resultados obtidos no ensaio a vazio (inbC1-127.08HTS).

Com base nos dados contidos na Figura 5.6, percebe-se que a tensão gerada varia constantemente com o gradiente da temperatura gerada pelo microgerador. Aplicando-se o método dos mínimos quadráticos para todas as amostras da tensão de saída (V_{out}), se obtém a seguinte equação para a tensão de circuito aberto: ($V_{out}=0,4306 \times \Delta T$ [V]) do microgerador proposto. Caso haja necessidade de manter tensão na saída fixa, faz-se necessário a utilização de um conversor CC-CC.

5.1.2 Determinação da Curva de Caracterização da Tensão *versus* Corrente

Para determinação da curva da tensão *versus* corrente (V/I) do microgerador termoeletrico, utilizou-se de resistores de potência como carga fixa para medir a tensão de saída (V_{out}) em [V], em comparação à corrente de saída (I_{out}) em [A] para diferentes gradientes de temperatura (ΔT), variando de 5°C em 5°C até o limite de operação predeterminado de 80°C .

Na Figura 5.7 apresenta-se a curva da tensão *versus* a corrente (V/I) do microgerador termoeletrico obtida a partir dos resultados do ensaio medindo a tensão de saída (V_{out}) em [V] em comparação à corrente de saída (I_{out}) em [A] diferentes gradientes de temperatura (ΔT). As retas tracejadas da Figura 5.7 foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados (regressão linear), onde cada uma se refere a um gradiente de temperatura desde os 5°C até aos 80°C em intervalos de 5°C .

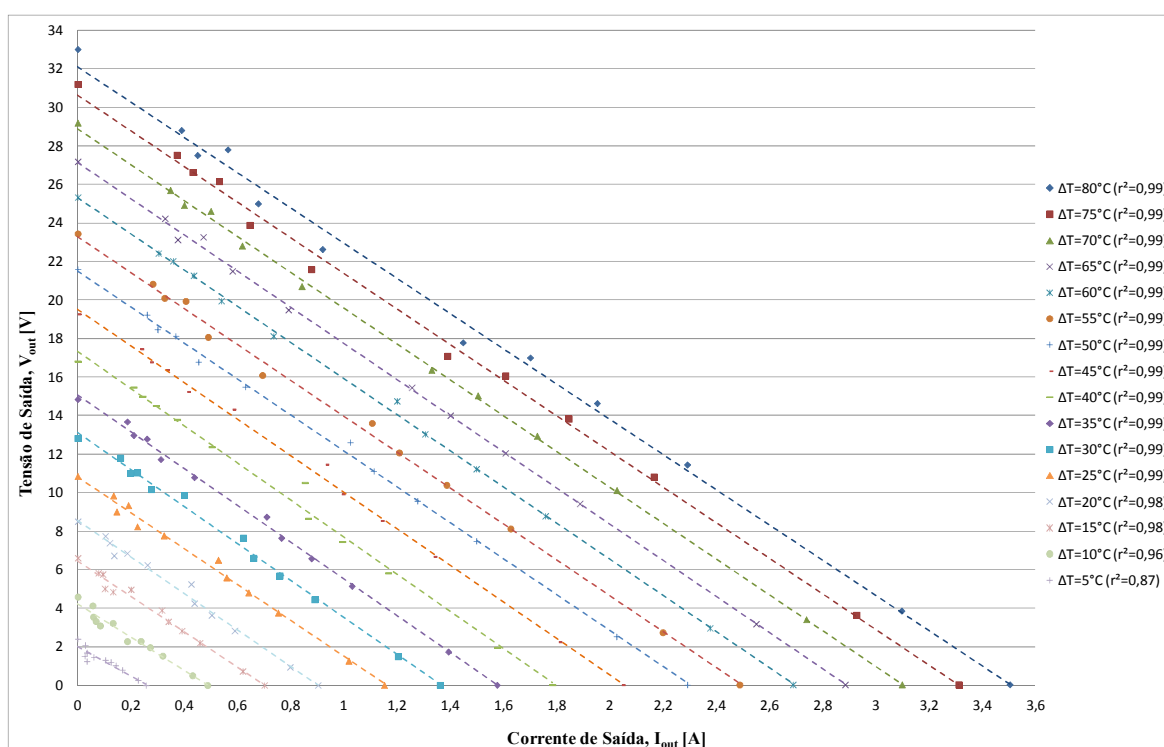


Figura 5.7 - Curva tensão de saída *versus* corrente de saída (inbC1-127.08HTS)

Ao Analisar a curva tensão de saída (V_{out}) em [V] *versus* a corrente de saída (I_{out}) em [A] apresentada na Figura 5.7 para diferentes gradientes de temperatura ($\Delta T=T_H-T_C$ [$^{\circ}\text{C}$]), percebe-se que, de forma análoga ao ocorrido no ensaio a vazio o mesmo ocorre no ensaio com carga. Ou seja, há tensão de saída (V_{out}) bem como, a corrente de saída (I_{out})

aumenta diretamente proporcional ao incremento do gradiente de temperatura (ΔT), conseqüentemente um aumento da Potência de saída (P_{out}). Ainda pode-se observar na Figura 5.7 certa linearidade entre as curvas para diferentes gradientes de temperatura ($\Delta T = T_H - T_C$ [°C]). Isto se deve ao fato que a resistência interna (R_{int}) do módulo possui um comportamento linear em função do gradiente de temperatura de ensaio.

5.1.3 Determinação da Resistência Interna do Microgerador

Para determinação da resistência interna do microgerador termoelétrico de estado sólido, utilizaram-se dos dados obtidos no ensaio de circuito aberto apresentados na Figura 5.6 e dos dados obtidos no ensaio para determinação da curva da tensão de saída (V_{out}) em [V] *versus* a corrente de saída (I_{out}) em [A] apresentada na Figura 5.7. Em posse dos dados e aplicando a teoria geral de análise de circuitos é possível obter facilmente os valores das amostras da resistência interna (R_{int}) medida em [Ω] do microgerador proposto para diferentes gradientes de temperatura (ΔT).

Na Figura 5.8 apresenta-se o gráfico contendo os valores das amostras da resistência interna (R_{int}) medida em [Ω] do microgerador proposto para diferentes gradientes de temperatura (ΔT). Ao analisar a linha de tendência da amostras da resistência interna (R_{int}) possui um aumento da resistências proporcional ao gradiente de temperatura.

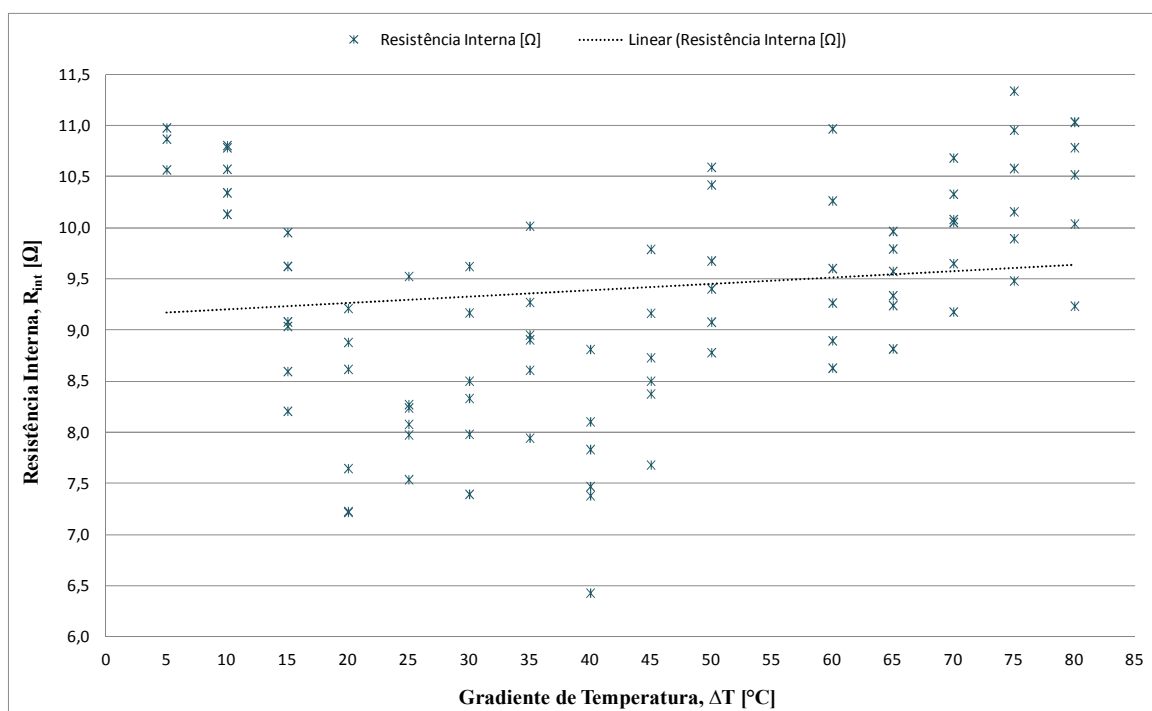


Figura 5.8 - Demonstrativo das amostras da resistência interna (R_{int}) medida no ensaio.

Com o intuito de realizar um tratamento estatístico das amostras da resistência interna (R_{int}) medida no ensaio em $[\Omega]$, calcula-se a média da resistência interna (R_{int}) para diferentes gradientes de temperatura (ΔT) e seus respectivos desvios padrões (σ_n). Posteriormente calculou-se a média geral em função das médias obtidas para cada gradiente de temperatura da resistência interna média ($R_{int_m\acute{e}dia}$) de todo o universo amostral e obteve-se o seu respectivo desvio padrão do conjunto amostral ($\sigma_{m\acute{e}dio}$) dado pela média desvios padrões (σ_n). A Figura 5.9 apresenta os valores médios da resistência interna (R_{int}) para diferentes gradientes de temperatura (ΔT) e seus respectivos desvios padrões (σ_n).

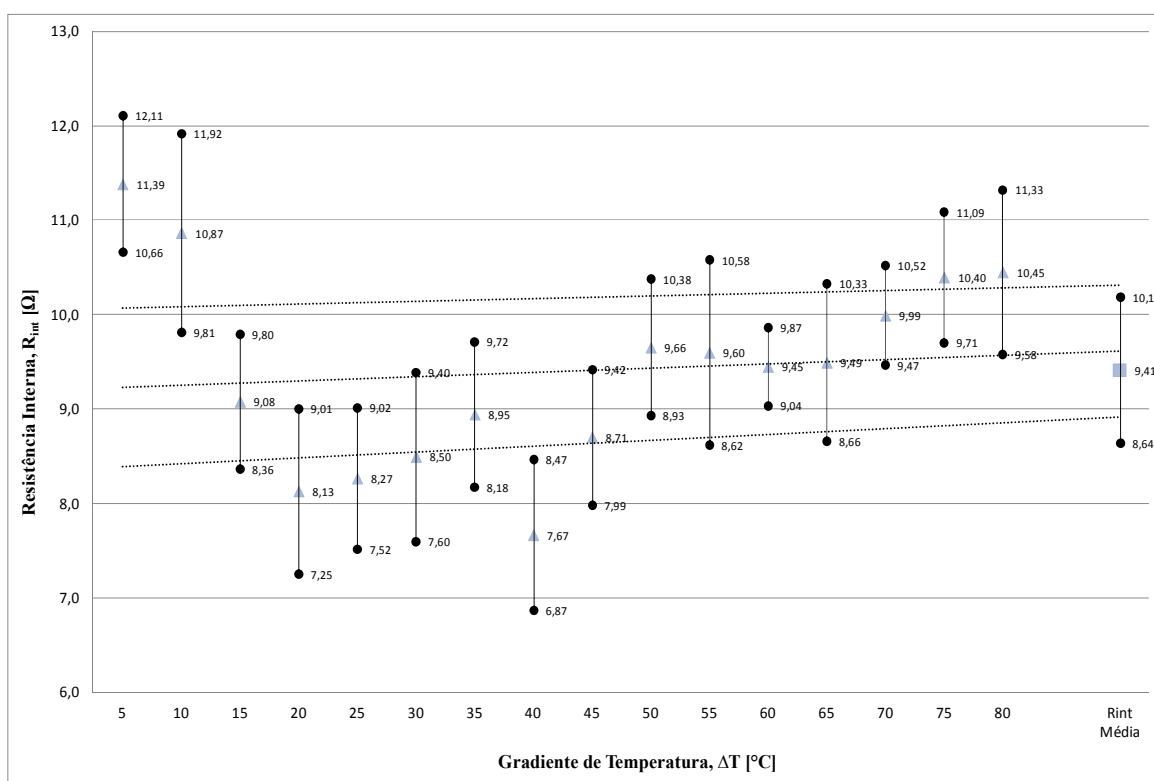


Figura 5.9 - Demonstrativo dos resultados das médias da resistência interna (R_{int}) para diferentes gradientes de temperatura (ΔT) e seus respectivos desvios padrões (σ_n).

Destaca-se que na Figura 5.9 a linha pontilhada representa a linha de tendência da média da resistência interna e seus respectivos desvios padrões ($\pm \sigma$), demonstrando que a resistência interna (R_{int}) apresenta uma variação linear com o acréscimo do gradiente de temperatura (ΔT). Enquanto a última barra a direita do gráfico identificada como "R_{int} Média" representa a média dos valores da resistência.

O triângulo central representa a resistência interna média ($R_{int_m\acute{e}dia}$) de todo o

universo amostral ($R_{int_m\u00e9dia}=[\mu_1+\mu_2+\mu_3+\mu_4+\mu_5+\mu_6+\mu_7+\mu_8+\mu_9+\mu_{10}+\mu_{11}+\mu_{12}+\mu_{13}+\mu_{14}+\mu_{15}+\mu_{16}]/16 \approx 9,41\Omega$), enquanto as extremidades demarcadas com s\u00edmbolo de um c\u00edrculo no v\u00e9rtice da linha superior e inferior \u00e9 o desvio padr\u00e3o do conjunto amostral ($\sigma_{m\u00e9dio}$), que representa o desvio padr\u00e3o do conjunto ($\sigma_{m\u00e9dio}=\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7, \sigma_8, \sigma_9, \sigma_{10}, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14}, \sigma_{15}, \sigma_{16} \approx 0,77\Omega$) e que est\u00e3o equidistantes do centro demarcado pelo tri\u00e2ngulo que representa a m\u00e9dia da resist\u00eancia ($R_{int_m\u00e9dia}$).

Conseq\u00fcentemente \u00e9 poss\u00edvel afirmar que a resist\u00eancia interna ($R_{int_m\u00e9dia}$) do microgerador termoel\u00e9trico de estado s\u00f3lido analisado \u00e9 igual \u00e0 $R_{int_m\u00e9dia}=9,41\Omega$, com uma toler\u00e2ncia igual a $\Delta R_{int_m\u00e9dia} = 0,77\Omega$, ou seja, $R_{int}=R_{int_m\u00e9dia}\pm R_{int_m\u00e9dia}=9,41 \pm 0,77\Omega$.

5.1.4 Determina\u00e7\u00e3o da Curva de Pot\u00eancia do Microgerador

Para a determina\u00e7\u00e3o da curva de m\u00e1xima pot\u00eancia transferida pelo microgerador de estado s\u00f3lido utilizou-se dos dados obtidos no ensaio de circuito aberto apresentados na Figura 5.6 e dos dados obtidos no ensaio para determina\u00e7\u00e3o da curva da tens\u00e3o de sa\u00edda (V_{out}) em [V] *versus* a corrente de sa\u00edda (I_{out}) em [A] apresentada na Figura 5.7 e ciente dos valores da $R_{int}=R_{int_m\u00e9dia}\pm R_{int_m\u00e9dia}=9,41\pm 0,77\Omega$. Em posse dos dados \u00e9 poss\u00edvel observar que conforme h\u00e1 um aumento do gradiente de temperatura (ΔT) proporcionalmente ocorrer\u00e1 um acr\u00e9scimo da pot\u00eancia fornecida (P_{out}) em [W] para uma determinada carga fixa, R_L em [Ω]. Portanto, com base na teoria geral da an\u00e1lise de circuito el\u00e9tricos tem-se que a pot\u00eancia dissipada na carga externa ser\u00e1 $P_{out}=R_L \cdot I_{out}^2$ [W]. Com base nesta constata\u00e7\u00e3o e utilizando diferentes valores de resist\u00eancia, como carga fixa R_L em [Ω], \u00e9 poss\u00edvel obter o gr\u00e1fico da curva da m\u00e1xima pot\u00eancia fornecida (P_{out}) em [W], em fun\u00e7\u00e3o da corrente de sa\u00edda (I_{out}) em [A] apresentada na Figura 5.10, para diferentes gradientes de temperatura (ΔT) e respectivamente o gr\u00e1fico da curva da m\u00e1xima pot\u00eancia fornecida (P_{out}) em [W] em fun\u00e7\u00e3o da tens\u00e3o de sa\u00edda (V_{out}) em [V] apresentado na Figura 5.11 para diferentes gradientes de temperatura (ΔT). As curvas a tracejado das Figuras 5.10 e 5.11 foram obtidas com a ajuda das retas de regress\u00e3o linear da Figura 5.7, isto \u00e9, multiplicando os valores destas pela corrente que o m\u00f3dulo injetou na carga.

Analisando a curva da pot\u00eancia fornecida (P_{out}) em [W], em fun\u00e7\u00e3o da corrente de sa\u00edda (I_{out}) em [A], apresentada na Figura 5.10, \u00e9 poss\u00edvel determinar a m\u00e1xima corrente e pot\u00eancia fornecida pelo microgerador termoel\u00e9trico para diferentes gradientes de temperatura (ΔT). De forma an\u00e1loga, se pode facilmente determinar a m\u00e1xima pot\u00eancia fornecida (P_{out}) e a tens\u00e3o (V_{out}) nos terminais de sa\u00edda do microgerador termoel\u00e9trico de

estado analisando os dados fornecidos pela curva da máxima potência fornecida (P_{out}) em [W] em função da tensão de saída (V_{out}) em [V], apresentado na Figura 5.11 para diferentes gradientes de temperatura (ΔT).

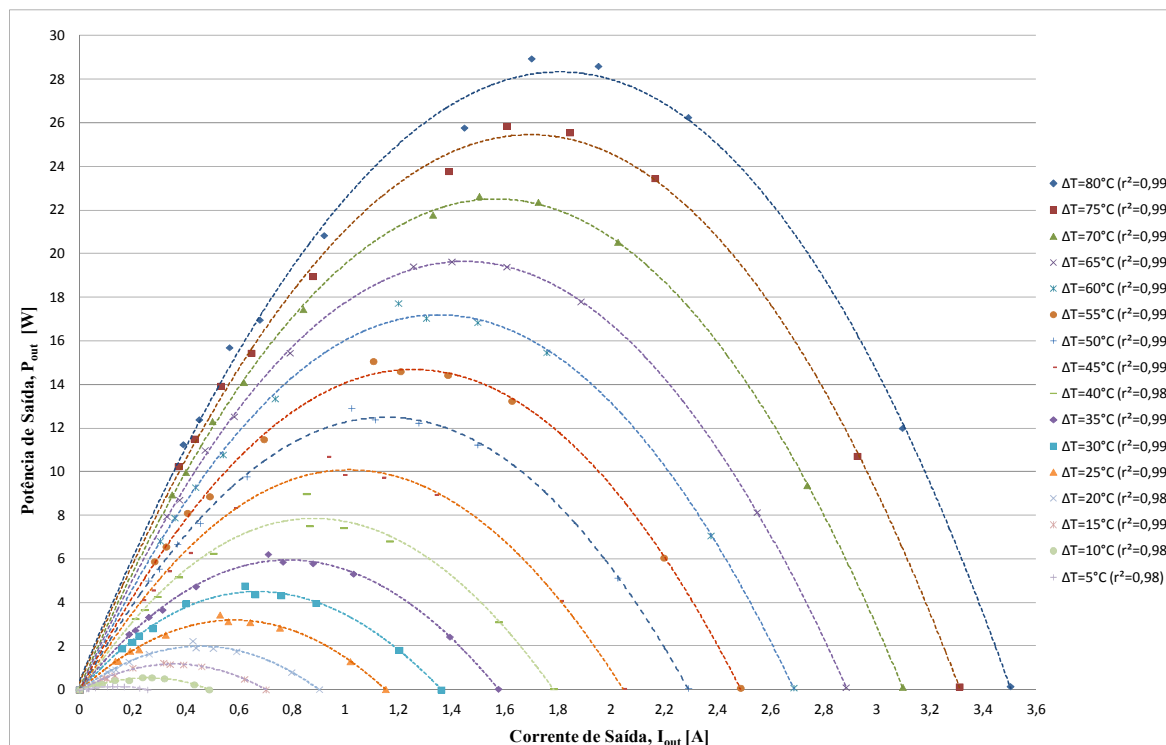


Figura 5.10 - Curva da potência de saída (P_{out}) versus corrente de saída (I_{out}).

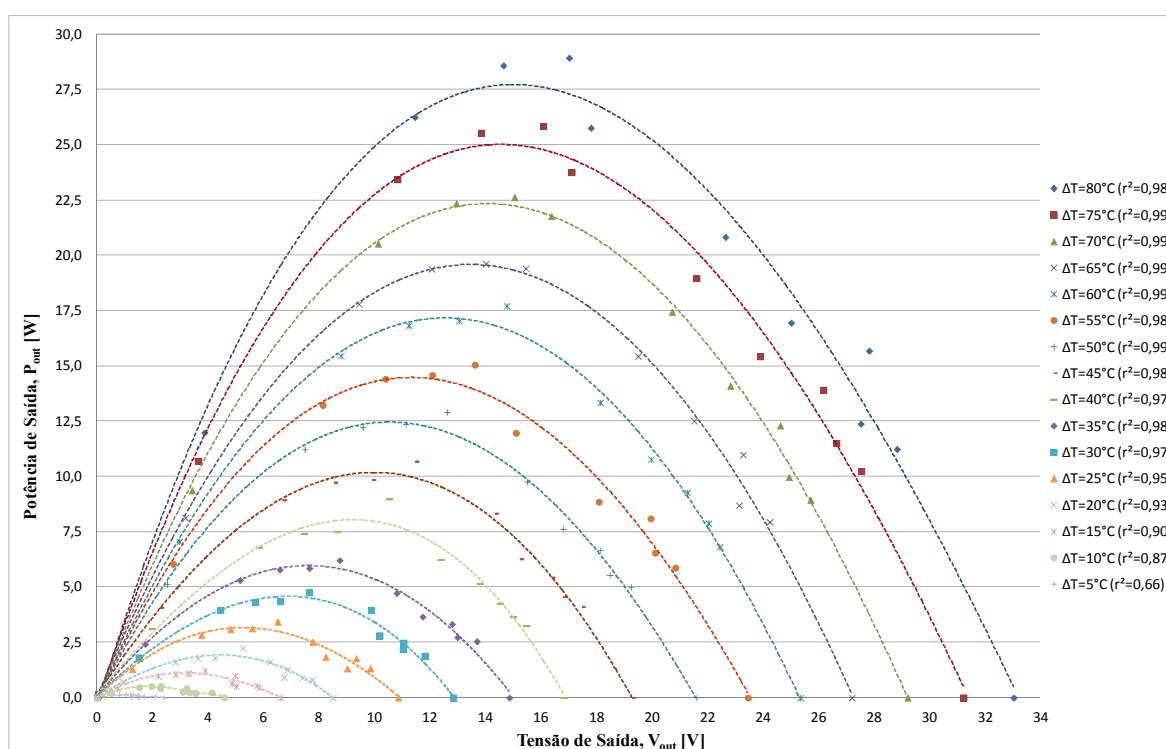


Figura 5.11 - Curva da potência de saída (P_{out}) versus tensão de saída (V_{out}).

5.1.5 Ensaio de validação do microgerador termoelétrico

O ensaio de validação do microgerador termoelétrico consiste em aplicar um determinado gradiente de temperatura e medir as grandezas térmicas (ΔT) e as grandezas elétricas nos terminais de saída que alimentam a carga. O intuito deste ensaio foi medir a máxima carga que o sistema poderia suprir sem variar a tensão nos terminais de saída (15V).

Logo, utilizaram-se resistores de potência na gama de $10\ \Omega$ a $60\ \Omega$ como carga variável que, conforme havia um acréscimo no gradiente de temperatura do sistema, reduzia-se a resistência da carga (R_L) e assim aumentando a potência consumida na carga que causava alteração no sinal de tensão de saída obtendo, desta forma, a potência fornecida pelo microgerador em função do gradiente de temperatura. Os resultados obtidos desde a rampa de subida do gradiente de temperatura até à estabilidade do sistema e apresentada na Figura 5.12 para o microgerador proposto.

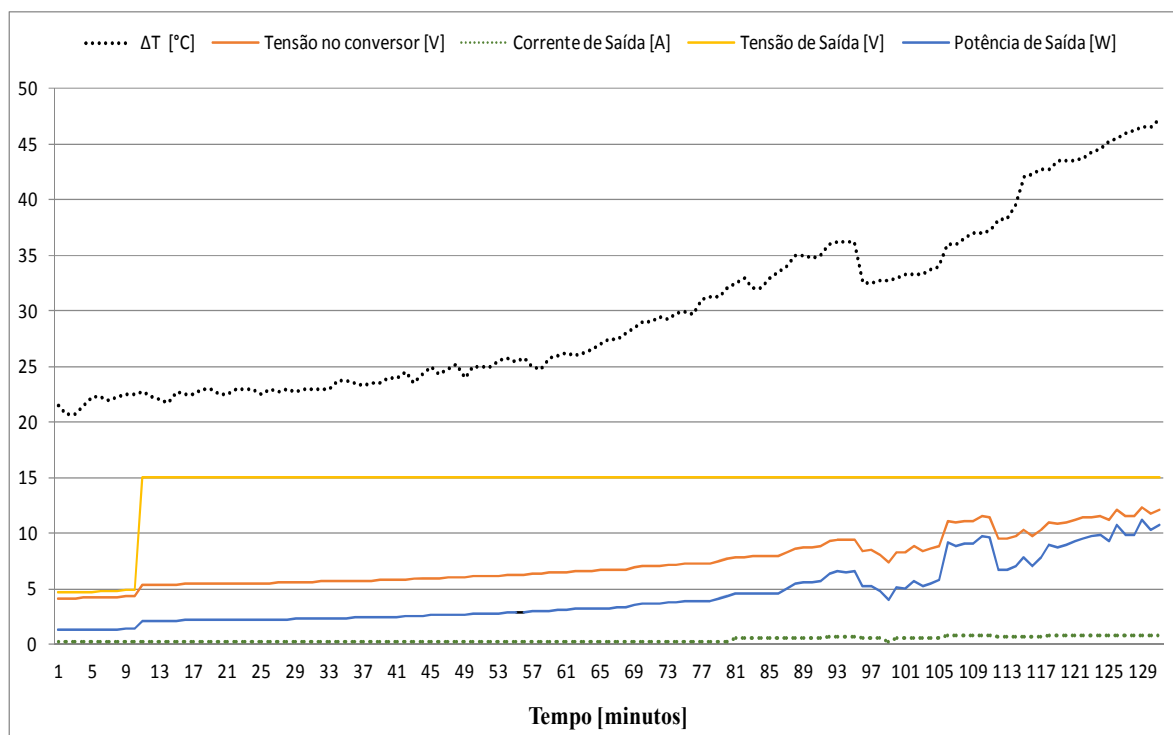


Figura 5.12 - Demonstrativo dos resultados de validação do microgerador

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 5.12, percebe-se que a tensão de saída (V_{out}) do conversor CC-CC mantém-se estável e fixa em 15V, que é representada pela linha amarela durante toda a operação do sistema diferentemente da tensão no

conversor que é representada pela linha laranja e que pelo arranjo dos módulos termoelétricos varia constantemente e proporcionalmente com o gradiente de temperatura do (ΔT). O único momento em que a tensão de saída (V_{out}) (linha amarela) não se mantém fixa em 15V é quando a tensão gerada (linha laranja) é inferior a 5V pois, o conversor CC-CC foi projetado para operar com tensões de entrada de 5V à 35V.

Pode-se concluir por meio da Figura 5.12, que com o incremento da potência gerada (linha azul), o gradiente da temperatura aumenta (linha preta pontilhada), ou seja, quanto maior for a diferença de temperatura entre as fontes quente e fria maior será a potência útil disponibilizada pelo microgerador termoelétrico de estado sólido.

Logo, percebe-se que o microgerador desenvolvido com 20 módulos termoelétricos modelo inbC1-127.08HTS no ensaio de validação de operação em regime permanente fornece uma potência de cerca de 11W com um gradiente de temperatura de 46,33°C.

5.1.6 Desempenho do microgerador termoelétrico

Para determinar a eficiência do microgerador termoelétrico proposto deve-se estimar o rendimento do mesmo, isto é, quantificar a proporção entre a potência da fonte primária necessária incluindo os seus acessórios para realização da conversão termoelétrica pelo microgerador em uma determinada quantidade de potência elétrica de saída de acordo com a Lei de *Lavoisier*. Logo, pode-se obter o rendimento de uma forma macro através do balanço energético do microgerador:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (19)$$

Onde:

- P_{out} : Potência entregue nos terminais da carga [W].

Como se trata de um protótipo de bancada (Figura 5.3), utilizou-se como fonte quente ou fonte primária um fogão elétrico de 2000W, com seletor de temperatura capaz de gerar e manter temperaturas superiores à 500°C em superfície de 490cm². Segundo dados de [53], tem-se que a potência térmica disponível para ser utilizada pelo microgerador, desprezando outros tipos de perda, é de cerca de 1W, ou seja, o rendimento da conversão elétrica em energia térmica foi próximo de 60%.

Relativamente à fonte fria ou fonte secundária, utilizou-se água à temperatura ambiente (aproximadamente 23°C), armazenada em um reservatório de 20 litros e uma bomba elétrica de 12W alimentada em 220V que consome uma corrente de 0,11A em 60Hz para forçar a circulação da água pelo bloco de refrigeração.

Para se obter a máxima potência gerada pelo microgerador proposto, utilizou-se os dados contidos na curva da potência fornecida (P_{out}) em [W] em função da corrente de saída (I_{out}) em [A] apresentado na Figura 4.9, sendo possível determinar a máxima potência gerada pelo microgerador termoelétrico de cerca de 28,94W esta foi a máxima potência elétrica gerada pelo Microgerador obtida com um gradiente de temperatura (ΔT) de 80°C. Logo, a máxima potência entregue equivale à diferença entre a potência gerada e a potência consumida pelos seus acessórios (bomba elétrica), resultando numa potência elétrica disponível de 16,94W. Então, aplicando-se a equação 19 tem-se que:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{16,94W}{1195,92W} \cdot 100 = 1,41\%$$

5.1.7 Viabilidade Técnica e Econômica do Microgerador

Para a estimativa econômica do microgerador realizou-se um *payback* simples a partir dos custos estimados da confecção do protótipo do microgerador e da sua máxima potência elétrica entregue a carga pelo Microgerador para um gradiente de temperatura (ΔT) de 80°C. Na Tabela 5.1 apresenta-se a lista de partes e peças bem como, os custos inerentes ao desenvolvimento e prototipagem do microgerador.

De acordo com [37], tem-se que a estimativa de vida útil do TEG modelo inbC1-127.08HTS da marca *WATRONIX* é de 100.000 horas e considerando que o custo de geração é nulo por estar aproveitando perdas térmicas (captação de energias) bem como, o valor a receber pela potência elétrica fornecida como sendo 0,47/kWh que é o preço de mercado em baixa tensão.

Logo, considerando o microgerador operando à plena carga durante toda a sua vida útil, o mesmo seria capaz de gerar 1.694kWh. Caso toda a potência despachada pelo mesmo fosse liquidada ao preço médio do mercado de energia em baixa tensão de R\$0,47/kWh, resultaria num retorno financeiro de R\$796,18, desprezando juros e correções monetárias.

Tabela 5.1 - Demonstrativos dos custos para montagem do termogerador

| Quantidade | Descritivo | Preço Global |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------|
| 03 unidades | P.E barra R 45x100x300mm | R\$250,00 |
| 03 unidades | P.E barra R 28x100x250mm | R\$132,00 |
| 12 unidades | Conexões para interligação dos blocos | R\$60,00 |
| 1 kilo | Cano de cobre | R\$90,00 |
| 3 metros | Mangueira pneumática Pu (poliuretano) | R\$13,50 |
| 02 unidades | Dissipadores de Alumínio | R\$245,00 |
| 20 unidades | TEG modelo inbC1-127.08HTS | R\$2.300,00 |
| 01 unidade | Projeto CAD e CNC | R\$750,00 |
| 01 unidade | Bomba d"água | R\$50,00 |
| - | Materiais Diversos | R\$70,00 |
| Custo total | | R\$3.960,50 |

Considerando que o microgerador opere 24 horas por dia durante toda sua vida útil de 100.000 horas, seriam necessários cerca de 56 anos e 10 meses de geração a plena carga para recuperar o investimento com o protótipo de cogeração termoelétrica proposto. Números estes que eram esperados visto que se trata de um protótipo experimental que, conseqüentemente, tem um custo muito superior ao custo de produto seriado. Trata-se de uma tecnologia emergente que ainda não é muito difundida no mercado e sem fabricantes nacionais, o que por sua vez acaba onerando os custos finais do projeto.

6 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos durante todo o projeto serão analisados e discutidos neste capítulo, de forma a facilitar o entendimento do leitor e fornecer as informações referentes à validação e aplicação do microgerador proposto em outros locais.

No capítulo 4 realizou-se a análise experimental. Alterando-se apenas uma grandeza por vez pôde comprovar-se que os valores de tensão e corrente no microgerador termoelétrico composto por arranjo de módulos termoelétricos, comportam-se de forma análoga à associação de fontes de tensão em corrente contínua, associadas em série e paralelo. Amparado pelas leis *Kirchoff* e pela teoria geral da análise de circuitos elétricos em corrente contínua em regime permanente, pode-se afirmar que os módulos termoelétricos quando estão associados em série somam os seus valores de diferença de potencial e quando estão associados em paralelo os mesmos somam as suas correntes.

Enquanto os ensaios de caracterização e validação do microgerador proposto no capítulo 6 foram realizados dentro do rigor científico de forma experimental, demonstrando coerência com dados apresentados em [57, 58], sendo seus resultados validados por análise de desempenho com [49], covalidos por comparação com [25, 28, 31, 39] e demais pesquisas citadas ao longo deste capítulo.

Com base nos dados contidos em [49], o protótipo do microgerador termoelétrico de estado sólido foi dimensionado para ser capaz de suprir uma carga de 40W com a tensão de saída de 15V para um gradiente de temperatura médio de 80°C. Porém, ao analisar a curva da máxima potência fornecida (P_{out}) em [W], em função da tensão de saída (V_{out}) em [V] apresentado na Figura 5.10. tem-se que o microgerador é capaz de fornecer $\approx 29W$ com uma tensão de 17V para um gradiente de temperatura (ΔT) de 80°C. Logo, ao comparar os resultados experimentais com os analítico ensaio, percebe-se que o microgerador desenvolvido com o módulo termoelétrico modelo inbC1-127.08HTS apresenta um desempenho inferior ao valor teórico esperado. Destaca-se que esta variação dos valores deve-se, em grande parte, pela variação da temperatura na superfície de contato dos módulos, que possui uma diferença de gradiente de temperatura (ΔT) de até 7°C de uma extremidade a outra. Além disso, tem-se que as temperaturas medidas são uma estimativa a

partir de medições pontuais utilizando-se de termopares (tipo K) para a estimativa do gradiente de temperatura (ΔT), pois, a superfície de contato dos módulos não é acessível.

Segundo dados de [39], o dispositivo termoeétrico DT1089 da *Marlow Industries Inc.*, EUA, em sua melhor configuração gera aproximadamente 0,5W por unidade de módulo termoeétrico para um gradiente de temperatura (ΔT) de 80°C. O microgerador desenvolvido gera aproximadamente 1,45W por unidade de módulo termoeétrico modelo inbC1-127.08HTS para um gradiente de temperatura (ΔT) de 80°C, o que representa um acréscimo de geração de aproximadamente três vezes quando comparado com o dispositivo apresentado em [39] por unidade de módulo termoeétrico.

Segundo dados de [25], o dispositivo termoeétrico para uso em paredes de alvenaria é capaz de suprir uma carga de 336,1W, com um gradiente de temperatura (ΔT) de 18°C em uma área de 9m² utilizando cerca de 90 módulos termoeétrico, modelo 127cpl/0.4A, da *Thermoelectric Inc.*, sendo que cada um deles está ligado eletricamente em paralelo. Com base na curva da máxima potência fornecida (P_{out}) em [W], em função da tensão de saída (V_{out}) (Figura 5.10) e realizando uma aproximação dos valores por meio de interpolação utilizando equação 13, tem-se que o microgerador desenvolvido gera cerca de 1,8W utilizando 20 módulos termoeétrico modelo inbC1-127.08HTS, para um gradiente de temperatura (ΔT) de 18°C, ocupando uma área superficial de 320cm², que representa um acréscimo de geração (516W) de aproximadamente 50% comparado ao dispositivo apresentado em [25] por unidade área de superfície. Porém, comparando a eficiência da conversão termoeétrica para ultrabaixos gradientes de temperatura teriam que utilizar uma quantidade de módulos extremamente elevada, isto é, mais que os 90 módulos utilizados em [25]. Esta variação dos valores deve-se, em grande parte, pelas características dos módulos termoeétricos utilizados no desenvolvimento do microgerador termoeétrico proposto que apresenta um melhor rendimento na faixa de operação entre 40°C até 170°C de acordo com [40] e ensaios realizados. Logo, após a realização desta análise pode-se afirmar que a escolha do módulo termoeétrico a ser utilizado para o desenvolvimento de um microgerador termoeétrico deve considerar a faixa de variação do gradiente de temperatura (ΔT). Sendo assim, é de suma importância para a otimização do desempenho do microgerador.

Já, quando se compara o protótipo proposto com dispositivos que operam com gradiente de temperatura (ΔT) superior, como, por exemplo, o sistema da *Hi-Z technology* apresentado em [30], o mesmo gera 20W com uma tensão de saída de 12 a 14V enquanto o sistema apresentado em [31] gera 12,6W utilizando 3 módulos e uma área de superficial de

cerca de 430cm^2 para um gradiente de temperatura (ΔT) de 152°C . Utilizando-se a curva de desempenho do módulo termoelétrico modelo inbC1-127.08HTS apresentada na Figura 4.2 e readequando a estimativa teórica correlacionada e readequando pelos valores da curva da máxima potência fornecida (P_{out}) em função da tensão de saída (V_{out}) (Figura 5.10), tem-se que o microgerador desenvolvido quando submetido a um gradiente de temperatura (ΔT) de 152°C irá gerar aproximadamente 90W, com uma tensão de saída de 32,74V, em uma área superficial de cerca de 320cm^2 utilizando os módulos termoelétrico modelo inbC1-127.08HTS. Logo, pode-se afirmar que quando se compara o protótipo desenvolvido com sistemas como [30, 31] que operam dentro da faixa de operação entre 40°C até 170°C , o protótipo apresenta um desempenho satisfatório e superior, tanto em potência fornecida (P_{out}) como em menor área ocupada.

Como última análise permite-se um comparativo com dispositivos de captação de perdas térmicas que operam em altíssima temperatura ($>200^\circ\text{C}$), podendo gerar 120W a 1kW de acordo com [4, 9, 26, 28]. Segundo dados de [9], a BMW desenvolveu um gerador que produzia uma potência elétrica de 500Watt, com um gradiente de temperatura (ΔT) de 207°C . De forma análoga a realizada anteriormente, pode-se utilizar a curva de desempenho do módulo termoelétrico modelo inbC1-127.08HTS apresentada na Figura 4.2 e readequando a estimativa teórica, correlacionado e readequando pelos valores da curva da máxima potência fornecida (P_{out}) em função da tensão de saída (V_{out}) apresentado na Figura 4.10, tem-se que o microgerador desenvolvido quando submetido a um gradiente de temperatura (ΔT) de 170°C irá gerar aproximadamente 107W, com uma tensão de saída de 36,15V em uma área de superficial de cerca de 320cm^2 , operando numa temperatura máxima de 200°C por limitação dos módulos termoelétrico modelo inbC1-127.08HTS utilizados. Logo, pode-se afirmar que o microgerador termoelétrico de estado sólido desenvolvido obteve resultados coerentes aos termogeradores apresentados no estado da arte de acordo com [4, 9, 26, 28], e apresenta desempenho similar aos termogeradores apresentados em [9], gerou 150W em 12 e 24V capaz de carregar baterias e acessórios do automóvel, e de acordo com [28] cujo o MMRTG é capaz de gerar 120W.

Do ponto da vista de aplicação, os materiais termoelétricos são amplamente utilizados em processos de refrigeração transformando energia elétrica em energia térmica (efeito *Peltier*) conforme [6, 15, 19, 23]. Porém, a utilização do efeito termoelétrico reversível, ou seja, transformar energia térmica diretamente em energia elétrica (Efeito *Seebeck*) ainda não é muito explorado para fins de geração de energia elétrica como citado em [59, 60, 61]. Portanto, o presente projeto de pesquisa teve por objetivo aprofundar na

utilização de materiais termoelétricos e desenvolver uma nova tecnologia (microgerador adaptável) no que diz respeito à conversão de energia térmica em energia elétrica por meio da termoelectricidade [61].

Conforme sugerido em [17, 58] e de acordo com [61, 62] bem como, analisando de forma macro, o microgerador termoelétrico proposto quando aplicado em larga escala, poderá ajudar a melhorar a eficiência energética de processos e reduzindo o consumo de energia elétrica. Destaca-se que é possível realizar a aplicação do microgerador proposto em vários processos e obter valores de potência elevados, como por exemplo, a aplicação de um sistema de cogeração em grande escala e com gradientes de temperaturas elevados.

Enfatiza-se que as indústrias são grandes setores de aplicação, porque há muitos processos dentro das mesmas. Em grande parte, estes processos envolvem trocas de calor. Citam-se aqui usinas termoelétricas, cerâmicas e fundições como sendo indústrias com grande potencial para aplicação do microgerador termoelétrico. Outro setor promissor é o automobilístico, onde já estão sendo desenvolvidos termogeradores, que servem para carregar a bateria do carro, por termogeradores inseridos no sistema de escapamento [4, 9, 26].

Destaca-se que apesar das dificuldades de obtenção de materiais termoelétricos com elevado rendimento devido à necessidade de apresentarem elevada condutividade elétrica e baixa resistência térmica (o que não é comum em nenhum material, como pode ser visto em [63, 64, 65, 66]), recentemente, retomou-se o interesse pelo desenvolvimento de novos materiais termoelétricos, visto que os mesmos apresentam um futuro promissor pela necessidade de se obter novas fontes de energia limpa. Concluindo, pode afirmar-se com base em [17, 61] que qualquer processo que envolva calor este sistema de cogeração de estado sólido pode ser aplicado, pois mesmo com um baixo rendimento dos materiais termoelétricos como demonstrado em [25], o resultado é significativo quando analisado de forma global.

Por fim, constata-se que apesar das diversas intempéries ao qual o sistema real está exposto, tanto na parte de geração como na variação do gradiente de temperatura e as dificuldades de medição, entende-se que os resultados obtidos são satisfatórios para um protótipo experimental de bancada e que por sua vez, demonstram a funcionalidade e eficácia do microgerador termoelétrico de estado sólido validado pelas referências e ensaios experimentais. Assim, comprovando a viabilidade técnica do uso do mesmo para captar perdas em processos industriais e gerar energia elétrica para alimentar pequenas cargas. Porém, economicamente os termogeradores ainda não são viáveis devido ao seu

alto custo, baixa vida útil e rendimento dos materiais termoelétricos, quando comparados com outras fontes alternativas, como, por exemplo, eólica e fotovoltaica. Logo, trata-se de uma tecnologia embrionária que precisa ser desenvolvida para aplicação em larga escala, e assim tornar-se uma fonte de energia limpa e competitiva.

7 CONCLUSÕES

Esta Tese apresentou uma proposta de um microgerador para captação de perdas térmicas resultantes de processos industriais sem impactar em redução da eficiência do sistema principal, caracterizando assim, o reaproveitamento de energia residual.

Assim, desenvolveu-se o protótipo do Microgerador Termoelétrico para Captação de Energias Residuais baseado no Efeito *Seebeck* apresentado em [58], composto por um Sistema de Transferência de Calor Intercambiável. Amparado por [67], a originalidade do microgerador termoelétrico de estado sólido proposto e dada por sua característica adaptativa que poderá ser aplicado a quaisquer fontes de perdas térmicas alterando-se o módulo de captação térmica (gases, vapor ou água) quando aplicados a processos industriais permitirá o incremento da eficiência por meio da captação das perdas.

De acordo com [61] e o princípio da conservação de energia que estabelece que a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante, o aproveitamento de parte da energia desperdiçada pode ser regenerada e utilizada no próprio local gerador deste desperdício. Conseqüentemente, ao reaproveitar parte desta energia residual irá maximizar-se o rendimento do sistema como um todo. Além disso, destaca-se que a captação da energia residual através do efeito *Seebeck* para cogeração de energia é eficiente, tendo em vista sua facilidade de aplicação, peso e tamanho, quando analisados os resultados encontrados, que por sua vez, colaboram para estudos que buscam de forma renovável e eficiente utilizando energias residuais para gerar energia elétrica.

A partir disto, vislumbra-se aplicar o microgerador térmico em locais tais como uma usina termelétrica onde a energia residual que em seu processo apresente facilidade na captação, bem como, não interfira no rendimento do processo principal de geração. Estas condições remetem as sugestões [59, 60, 61] para utilização do microgerador na saída de gases (chaminé), trocadores de calor, processos de forjamento e conformação, sistemas de refrigeração industrial, caldeiras, fornos cerâmicos que são processos que atendem às condições de facilidade de captação e principalmente que o mesmo não interfere no processo fabril.

Destaca-se que o microgerador em questão terá um importante impacto na operação

das indústrias, pois possibilitará a melhoria do rendimento global do sistema por meio da captação das perdas. Segundo [17, 61, 62], adicionalmente a redução das perdas tem-se uma redução do consumo de energia elétrica e que, conseqüentemente, exigirá um menor aumento na capacidade de geração causando um impacto positivo em termos econômicos e socioambientais tanto para as indústrias como para o setor elétrico.

Segundo [16, 17, 58, 61], a relevância para a utilização da cogeração de energia elétrica é o fato de ser uma forma de energia limpa (*Green Power*) e depende apenas da captação de perdas, sendo estas energias residuais oriundas de processos industriais e são liberadas ao meio ambiente sem serem aproveitadas. Com a invenção proposta o resíduo não deixará de existir e também não deixará de ser liberado no meio ambiente, mas será aproveitado para a geração de energia elétrica.

Os resultados deste projeto de pesquisa foram bastante atrativos, e por sua vez demonstram a viabilidade técnica do uso de termogeradores para a captação das perdas em processos industriais tendo como produto principal o protótipo de um sistema de regeneração de energia, capaz de converter energia térmica diretamente em energia elétrica por meio da captação de energia residual de processos industriais amparado por [68].

Conforme descrito no capítulo 4, tem-se o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo para dimensionamento elétrico de microgerador termoelétrico baseado no efeito *Seebeck*, a partir de curvas de desempenho e gradiente de temperatura (ΔT). De acordo com os ensaios realizados no capítulo 6 e as análises comparativas realizadas no capítulo 4 e 6, e legítimo afirmar que a metodologia se mostrou eficaz e coerente para obter uma estimativa de geração do termogerador a ser desenvolvido.

Conforme descrito no capítulo 5 e de acordo com [58, 61], tem-se o estudo do desempenho do microgerador proposto de acordo com as possíveis aplicações e seu respectivo impacto na redução das perdas em um processo industrial demonstrando a viabilidade técnica do microgerador termoelétrico de estado sólido para captação de energias, inclusive para dispositivo como em [25], que operam com gradientes de temperatura extremamente baixos ($<30^{\circ}\text{C}$). E, por fim, conforme descrito no capítulo 6, tem-se a validação experimental do microgerador termoelétrico estando coerente com [57, 58] e seus resultados validados por análise de desempenho com [49], covalidado por comparação com [25, 28, 31, 39].

De entre as ações e contribuições que caracterizam a originalidade do microgerador termoelétrico de estado sólido proposto destacam-se os seguintes desenvolvimentos e modelos:

a) **Metodologia simplificada:** para projetar e dimensionar a parte elétrica dos microgeradores termoelétricos a partir de curvas de potências reais utilizando módulos termoelétricos;

b) **Dispositivo Intercambiável:** possibilita utilizar diferentes formas de captação de calor (serpentina, matriz de vapor, blocos de refrigeração, etc.) sem alterar seu funcionamento;

c) **Sistema não invasivo:** sistema caracterizado por uma captação indireta, garantindo ao microgerador a característica de não interferência ao processo industrial;

d) **Arranjo modular e aplicação:** característica que permite ampliar sua geração garantida pela concepção modular que permite a alteração da configuração e se adaptar a qualquer processo. Por ser adaptativo e intercambiável, pode ser aplicado a quaisquer fontes de perdas térmicas, alterando-se o módulo de captação térmica (gases, vapor ou água);

e) **Pedido de Patente:** segundo pesquisa no banco de patentes do Instituto Nacional de Patentes e Invenções (INPI), não se encontra nenhum desenvolvimento com características similares ao apresentado nesta Tese. Consequentemente foi dada a entrada junto ao INPI do pedido de privilégio de invenção por meio da solicitação de patente – PI deposita sob o número BR1020130279471 e intitulada "Microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no efeito *Seebeck* com sistema de transferência de calor intercambiável".

Finaliza-se este projeto de pesquisa, enfatizando que se trata de um desenvolvimento inédito e inovador [67], pois com a utilização da metodologia para projeto e dimensionamento permitirá desenvolver microgeradores termoelétricos para captação de energia residual sendo este customizado e adaptado às características dos processos industriais e sua respectiva carga (potência e tensão) que desejam alimentar-se a partir de gradientes de temperaturas.

Além disso, destaca-se que a captação das energias residuais para cogeração de energia elétrica é um caminho a seguir para a melhor a eficiência energética dos processos industriais. Um dos motivos é o fato de os módulos termoelétricos já apresentarem rendimentos de aproximadamente 25% [10], juntamente, com a necessidade de melhorar a eficiência dos processos industriais e diminuir a poluição atmosférica.

8 TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade dos resultados experimentais desta Tese, sugere-se como trabalhos futuros o estudo e desenvolvimento de novas ligas de materiais termoelétricos por meio de metalurgia do pó visando obter uma Figura de Mérito (ZT) superior a 1, ou seja, melhor condutividade elétrica, redução da condutividade térmica e maior coeficiente de *Seebeck*, bem como, desenvolver materiais que suportem temperaturas superiores à 350°C , pois os módulos termoelétricos atuais devido às soldas dos contatos não resistirem não podem operar a temperaturas superiores à 350°C , enquanto os sistemas térmicos existentes ultrapassam facilmente a casa dos 300°C de temperatura de operação [63, 64, 65].

Outra sugestão é o projeto modelagem e desenvolvimento de módulos termoelétricos por meio da metalurgia do pó, com geometrias adaptadas ao local de aplicação. Conseqüentemente pode estudar-se o incremento da captação e geração de energia de módulos com geometrias adaptadas em relação às geometrias convencionais. Outro tópico de pesquisa futura consiste no estudo e modelagem de novas geometrias para os materiais termoelétricos existentes, buscando promover a melhoria do desempenho e da Figura de Mérito (ZT), ou seja, melhorar a condutividade elétrica, reduzir a condutividade térmica e maior coeficiente de *Seebeck* [59, 66, 68].

Do ponto vista de aplicação da termoeletricidade para refrigeração, pode-se desenvolver um sistema de ar condicionado baseado no efeito *Peltier*, utilizando módulos termoelétricos para refrigerar o ambiente em substituição dos sistemas convencionais a compressor usado atualmente, e conseqüentemente, estimar a redução da emissão de gases poluentes. O estudo consiste em modelar e desenvolver um sistema de condução térmica baseado em módulos termoelétricos para maximizar a troca térmica com o ambiente, fazendo com que o mesmo sofra um decréscimo da temperatura que por sua vez fará com que o ambiente interno fique climatizado [60, 69].

Além dos trabalhos propostos ao longo do texto, sugere-se o projeto e desenvolvimento de microgeradores termoelétricos aplicados a sistemas com gradiente de temperatura superiores ($\geq 300^{\circ}\text{C}$), como por exemplo, veículos a combustão, fornos de

indução, forjamento, etc. Desta forma, permitirá uma análise do desempenho do termogerador proposto quando aplicado a um processo industrial possibilitando medir o incremento no rendimento energético do processo, bem como, o percentual da captação das perdas térmicas no processo pelo uso do mesmo [58, 62].

Como última sugestão para trabalhos futuros, deixa-se a proposta para a análise da viabilidade econômica de um sistema de cogeração de energia elétrica para captação de perdas aplicados a um sistema real. Recomenda-se a realização de uma análise de tempo de vida útil dos módulos termoelétricos quando em funcionamentos para geração de energia elétrica, visto que atualmente não se encontram estudos que abordem a sua viabilidade econômica e a vida útil por se tratar de uma tecnologia nova quanto a sua concepção e a forma de aplicação [61].

REFERÊNCIAS

- [1] BASTOS, Sérgio André Machado. **Pulseira para Geração de Energia**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Braga, 2010.
- [2] SANTOS, Leonardo Paiva. **Análise de Desempenho de um Gerador Termoeletrico Baseado no Efeito Seebeck**. 2010. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2010.
- [3] GAO MIN, D.M. ROWE. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems. **IEEE Transactions on Energy**, v. 22, n. 2, p. 528-534, Jun. 2007.
- [4] LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira; AZEVEDO, Lizandra Prado de. O Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Inútil ao Sustentável. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, p.59-100, 2008.
- [5] NASCIMENTO, André Luccas Eccard de Souza; LUBANCO, Jhennifer Campos; MOREIRA, Thayara Abreu. Fontes Alternativas de Energia Elétrica: Potencial Brasileiro, Economia e Futuro. **Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras e Instituto Federal Fluminense**, Rio de Janeiro, p.23-36, 2012.
- [6] RIFFAT, S. B. & XIAOLI, M. (2003). Thermoelectrics: a Review of Present and Potential Applications. **Applied Thermal Engineering**, v.23, n.8, p.913-935, 2003.
- [7] ALVES, Paula Portugal. **A Experiência de Joule Revisitada**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.
- [8] MOURA, José Américo De Sousa. **Filmes Nanométricos de Fen e Aln Crescidos Por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. 2010. 140 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal, 2010.
- [9] MARTINS, J; BRITO, F. P.; GONÇALVES, L. M. GONÇALES; ANTUNES, J. “Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes”. **SAE International**, p. 1-23, 2011.
- [10] HENDRICKS, Terry; CHOATE, Willian T. **Engineering Scoping Study of**

- Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery.** 2006. 74 f. U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program, novembro 2006.
- [11] K. UCHIDA, S. TAKAHASHI, K. HARI, J. IEDA, W. KOSHIBAE, K. ANDO, S. MAEKAW, and E. SAITOH, **Observation of the Spin Seebeck Effect**, Nature 455, 778 (2008).
- [12] J. FLIPSE, F. K. DEJENE, D. WAGENAAR, G. E.W. BAUER, J. BEN YOUSSEF, and B. J. VAN WEES. **Observation of the Spin Peltier Effect for Magnetic Insulators.** 2014. Physical Review Letters 113, 027601 2014 – Published July 7, 2014
- [13] J. FLIPSE, F. L. BAKKER, A. SLACHTER, F. K. DEJENE, and B. J. VAN WEES, **Direct Observation of the Spin-Dependent Peltier Effect**, Nature Nanotech. 7, 166 (2012).
- [14] SNYDER, G. J. Small Thermoelectric Generators. **The Electrochemical Society Interface.** New Jersey, USA, v. 17, n. 3, p.54-56, 2008.
- [15] D.M. ROWE, "**CRC Handbook of THERMOELECTRICS**," CRC Press, 1995.
- [16] BITSCHI, Andreas. **Modelling of thermoelectric devices for electric power generation.** 2009. 144 f. Tese (Doutorado) - Swiss Federal Institute Of Technology Zurich. Zurich, 2009.
- [17] ISMAIL, Basel I.; AHMED, Wael H. Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology. **Bentham Science Publishers Ltd:** Recent Patents on Electrical Engineering, United States, n. 2, p.27-39, 24 nov. 2009.
- [18] GONÇALVES, L. M.. **Microsistema termoelétrico baseado em teluretos de bismuto e antimônio.** 2008. 200 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Electrónica Industrial e Computadores, Departamento de Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2008.
- [19] ROMANI, Rubens. **Aplicações de Efeitos Termoelétricos da Indústria Aeronáutica.** In. CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA, 8, 2007, Cusco, p.1246-1254.
- [20] SONG, Yang. **Oxide based thermoelectric materials for large scale power generation.** 2008. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Massachusetts Institute Of Technology, Massachusetts, 2008.
- [21] Datasheet **Specification of Thermoelectric Module TEHP1-24156-1.2.** Disponível

em: <http://www.thermonamic.com/TEHP1-24156-1.2.pdf>. Acesso em: 28 jan.2013.

[22] FERREIRA, E. **Sensores e condicionamento de sinais**. Campinas: Departamento de Eletrônica e Microeletrônica – Demic, 2009.

[23] GAO MIN, D.M. ROWE, Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators. **Applied Energy**, v. 83, n. 2, p. 133-152, Feb. 2006.

[24] OTA, T.; TOKUNAGA, C.; FUJITA, K.. **Development of thermoelectric power generation system for industrial furnaces**. In. TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMOELECTRICS, 25, 06-10 August 2006, p. 335-338.

[25] AZARBAYJANI, Mona; Anderson Jim. Assessment of Solar Energy Conversion Technologies-Application of Thermoelectric Devices in Retrofitan Office Building. In. SYMPOSIUM ON IMPROVING BUILDING SYSTEMS IN HOT AND HUMID CLIMATES, Proceedings of the Sixteenth, 2008.

[26] GAO MIN. Thermoelectric Energy Harvesting. **Publisher: Artech House**, v. 413-414, p. 325-336, 2010.

[27] FAIRBANKS, John. Vehicular Thermoelectric Applications. EUROPEAN CONFERENCE ON THERMOELECTRICS, 6th, Paris, 2-4 jul. 2008. **Anual**. Disponível em: <http://ect2008.icmpe.cnrs.fr>. Acesso em: 24 set. 2012.

[28] RITZ, F.; PETERSON, C.E., Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) program overview. AEROSPACE CONFERENCE, 2004. **Proceedings**. 2004, v. 5, p. 2957, 6-13 Mar. 2004.

[29] HUANG, J., **Aerospace and aircraft thermoelectric application**. Presentation, October 2009. Boeing Engineering, Operations, & Technology, Research & Technology, U.S. Department Energy.

[30] FARIA, Sandro Ricardo Alves. **Protótipo de um Microgerador Termoelétrico de Estado Sólido: Cogeração a Gás**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

[31] NUWAYHID R. et al. **Development and testing of a domestic woodstove Thermoelectric generator with natural convection cooling**. **Energy Conversion and Management**, Beirut, p. 1631-1643, 2004.

[32] ONO, K. e SUZUKI, R.O. Thermoelectric Power Generation: Converting Low-Grade Heat into Electricity. **Energy Resources**, p. 49-51, 1998.

- [33] SEIKO INSTRUMENTS INC. (Japan). Engineers Pursuing the Ultimate in the Evolution of Wristwatch Technology. **Nature Interface**, Japan, n. 3, p.45-49, 28 jun. 2001.
- [34] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, A. Taroni, **Characterization of Thermoelectric Modules for Powering Autonomous Sensors**, Proceedings of IMTC 2007 Instrumentation and Measurement Technology Conference, (2007).
- [35] HARB, Adnan. Energy harvesting: State-of-the-art. **Renewable Energy**, United Arab Emirates, v. 36, n. 10, p.2641-2654, 10 jul. 2011.
- [36] GYSELINCKX, B.; Van Hoof, C.; RYCKAERT, J.; YAZICIOGLU, R.F.; FIORINI, P.; LEONOV, V., "Human++: autonomous wireless sensors for body area networks," CUSTOM INTEGRATED CIRCUITS CONFERENCE, 18-21 sept. 2005. **Proceedings**, p.13-19.
- [37] PENDERS, J.; GYSELINCKX, B.; VULLERS, R.; DE NIL, M.; NIMMALA, V.; VAN DE MOLENGRAFT, J.; YAZICIOGLU, F.; TORFS, T.; LEONOV, V.; MERKEN, P.; VAN HOOFF, C., "**Human++: From technology to emerging health monitoring concepts**," Medical Devices and Biosensors, 2008. INTERNATIONAL SUMMER SCHOOL AND SYMPOSIUM, 5th, 1-3 june 2008, p.94-98. .
- [38] WANG Z. et al. Realization of a wearable miniaturized thermoelectric generator for human body applications. **Sensors & Actuators: A. Physical**, v. 156, n. 1, p. 95-102, nov. 2009.
- [39] OMER S. A.; INPELD D.G. **Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation**. Solar Energy Materials and Solar Cells. 1998.
- [40] S. Dalola, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, E. Sardini, M. Serpelloni, A. Taroni, **Autonomous Sensor System with RF Link and Thermoelectric Generator for Power Harvesting**, In. INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 1, 2008, 12-15.
- [41] Ashwin Date, Abhijit Date, Chris Dixon, Aliakbar Akbarzadeh, Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. **Solar Energy**, v. 105, p. 656-668, 2014.
- [42] Wei-Hsin Chen, Chen-Yeh Liao, Chen-I Hung, Wei-Lun Huang, Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions. **Energy**,

v. 45, p. 874-881, 2012.

[43] Peter M. Attia, Matthew R. Lewis, Cory C. Bomberger, Ajay K. Prasad, Joshua M.O. Zide, Experimental studies of thermoelectric power generation in dynamic temperature environments. **Energy**, v. 60, p. 453-456, 2013.

[44] Fankai Meng, Lingen Chen, Fengrui Sun, Bo Yang, Thermoelectric power generation driven by blast furnace slag flushing water. **Energy**, v. 66, p. 965-972, 2014.

[45] Dan Dai, Yixin Zhou, Jing Liu, Liquid metal based thermoelectric generation system for waste heat recovery. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3530 -3536, 2011.

[46] X.F. Zheng, Y.Y. Yan, K. Simpson, A potential candidate for the sustainable and reliable domestic energy generation - Thermoelectric cogeneration system. **Applied Thermal Engineering**, v. 53, p. 305-311, 2013.

[47] Ashwin Date, Abhijit Date, Chris Dixon, Aliakbar Akbarzadeh, Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation, Renewable and Sustainable. **Energy Reviews**, v. 33, p. 371-381, 2014.

[48] Wei Jieting, Xiong Linchang, Wang Hao; The Study of Thermoelectric Power Generation in The Cooling of Fin and Vibration Heat Pipe, 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems. **Energy Procedia**, v. 17, p. 1570-1577, 2012.

[49] Datasheet **inbC1-127.08HTS Thermoelectric Power Generation**. Disponível em: <http://www.inbthermoelectric.com/Thermoelectric-Peltier-Modules/Power-Generators/inbC1-127.08HTS.html>. Acesso em: 24 abr. 2013.

[50] LIMA, A. S. **Comparação de Dois Conversores Boost, para Aplicação em Carregadores de Baterias de um Sistema Fotovoltaico Autônomo, Aplicando Princípios da Engenharia de Valor**. 2008. 106 f. Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

[51] SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. 2009. 222 f. Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

[52] BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. Florianópolis, SC: Edição do Autor, 2005.

[53] BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. Florianópolis, SC: Edição do Autor, 2000.

- [54] MENDONÇA, R.C. **Projeto de Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2002. 41f. Pesquisa Científica, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu, 2002.
- [55] TEG Specification Sheet **1261G-7L31-24CX1 Custom Thermoelectric**. Disponível em: http://www.customthermoelectric.com/powergen/pdf/1261G-7L31-24CX1_spec_sht.pdf. Acesso em: 23 maio 2013.
- [56] TINEL, F. P.; RIBEIRO, J. A. Estudo sobre a eficiência dos fogões a gás, elétrico resistivo e elétrico indutivo. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 9, n. 1, 2013.
- [57] CARMO, J.P et al. Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior. **Measurement**, v. 44, n. 10, p. 2194-2199, Dec. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.015>.
- [58] ANDO JUNIOR, O. H. et al. Proposal of a Thermoelectric Microgenerator based on Seebeck Effect to Energy Harvesting in Industrial Processes. **Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)**, v. 1, p. 227-333, 2014.
- [59] H. BÖTTNER, et al. New Thermoelectric Components Using Microsystem Technologies. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 3, p. 414, 2004.
- [60] L.M. GONCALVES, J.G. ROCHA, C. COUTO, P. ALPUIM, AND J.H. CORREIA, **On-Chip Array of Thermoelectric Peltier Microcoolers**, Sensors and Actuators A: Physical, In Press (2008).
- [61] ANDO JUNIOR, O. H. et al. Analyze the Potential of Use Thermoelectric Materials for Power Cogeneration by Energy Harvesting - Brazil. **International Journal of Automation and Power Engineering (IJAPE)**, v. 2, p. 303-311, 2013.
- [62] A.POLOZINE, T.C.A.COLOMBO, L.SCHAEFFER. **Termoeletricidade de Seebeck aplicada no forjamento a quente**. Forge, Edição eletrônica, Jan. a Abril, 2003. Disponível em: <http://www.revistaforge.com.br/edicao/edicao-jan-a-abr2013/>. Acesso em: 27 mar. 2013.
- [63] L.M.GONCALVES et al. Optimization of Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ thin films deposited by co-evaporation on polyimide for thermoelectric applications, **Vacuum (2008)**, doi: 10.1016/j.vacuum.2008.03.076 .
- [64] A.POLOZINE, L.SCHAEFFER. Materiais sintetizados para geração de energia elétrica. In: Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis, 3, 2013, Porto Alegre,RS, **Anais 3º RENOMAT**, Porto Alegre/RS, Brasil, 2013.

- [65] L. M. GONCALVES et al. Fabrication of flexible thermoelectric microcoolers using planar thin-film technologies, **J. Micromech. Microeng**, v. 17, 2007.
- [66] L.M. GONCALVES et al. **Thermoelectric microstructures of Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ for a self-calibrated micro-pyrometer. Sensors and Actuators A: Physical**, n. 130–131, p. 346-351, 2006.
- [67] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. ANDO JUNIOR, O. H.. **Microgerador termoelétrico para captação de energia baseado no efeito seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. BR nº BR1020130279471, 30 out. 2013, 04 fev. 2014. Revista da Propriedade Industrial, v. 1, n. 2254, 2014.
- [68] L. M. GONCALVES et al. Thermoelectric Properties of Bi₂Te₃ / Sb₂Te₃ Thin Films, Materials Science Forum 514-516. **Trans Tech Publications**, p. 156-160, 2005.
- [69] SILVA, L. W. da; KAVIANY, M. Fabrication and measured performance of a first-generation microthermoelectric cooler, **Journal of MEMS**, v. 14, p. 1110, 2005.

ANEXOS

ANEXO - Conversor CC-CC Boost

I Conversor CC-CC Boost

O conversor *Boost* é utilizado para elevar a tensão sendo composto por um indutor, um capacitor de saída, um transistor e um diodo, conforme demonstrado na Figura 1. [40]

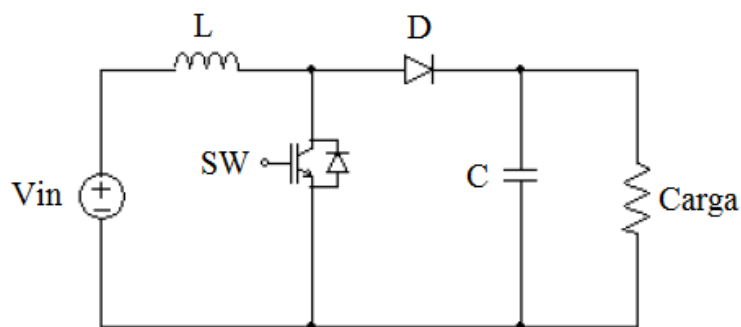


Figura 1 - Circuito elétrico de um conversor *Boost* [40]

O conversor *Boost* proposto irá operar no modo de condução contínua, neste caso a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída é expressa na equação A.1: [40]

$$\frac{V_o}{V_{conv}} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

- V_o : Tensão de saída do conversor [V];
- V_{conv} : Tensão mínima de entrada do conversor [V];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor.

Posteriormente, pode-se calcular a corrente máxima sendo este valor a razão entre a potência da carga e a tensão de entrada, pois na entrada a tensão é menor e então a corrente é máxima. A equação A.2 a seguir mostra o cálculo:

$$I_{\max} = \frac{P_{Carga}}{V_{Conv}} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- P_{Carga} : Potência da carga [W];
- V_{Conv} : Tensão mínima de entrada do conversor. [V]

I.I Dimensionamento do indutor

Para o dimensionamento do indutor deve-se admitir uma variação de 15% do valor máximo da ondulação de corrente sobre o indutor boost. A equação A.3 apresenta cálculo: [38]

$$\Delta I_L = 15\% \cdot I_{\max} \quad (\text{A.3})$$

Onde:

- ΔI_L : Variação da ondulação de corrente sobre o indutor [A];
- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A].

Com a variação da ondulação de corrente sobre o indutor é possível fazer o cálculo do indutor boost através da equação A.4: [38]

$$L = \frac{V_{\text{Conv}} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (\text{A.4})$$

Onde:

- L : Indutância do indutor do Conversor Boost [H];
- V_{Conv} : Tensão mínima de entrada do conversor [V];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do Conversor *Boost*;
- ΔI_L : Variação da ondulação de corrente sobre o indutor [A];
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz].

A corrente de pico no indutor é calculada na equação A.5: [38]

$$I_{L\text{ pico}} = I_{\max} + \frac{V_{\text{Conv}} \cdot D}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (\text{A.5})$$

Onde:

- $I_{L\text{ pico}}$: Corrente de pico que passa pelo indutor [A];
- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor boost;
- L : Indutância do indutor do Conversor *Boost* [H];
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz];
- V_{Conv} : Tensão mínima de entrada do conversor [V].

I.II Dimensionamento do transistor

Para a escolha do transistor adequado devem ser feitos alguns cálculos para depois analisar as características de cada tipo de interruptor e assim seleccionar a melhor opção para cada caso. A máxima tensão nos terminais dreno-fonte (V_{DS}) do transistor será igual à máxima tensão de saída (V_o). A corrente média que passa pelo transistor é encontrada pela equação A.6: [38, 39, 40]

$$A_{Smed} = D \cdot I_{\max} \quad (\text{A.6})$$

Onde:

- I_{Smed} : Corrente média que passa pelo transistor [A];
- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor *Boost*.

Já a corrente eficaz é encontrada pela equação A.7: [38, 39, 40]

$$I_{Teficaz} = I_{\max} \cdot \sqrt{D} \quad (\text{A.7})$$

Onde:

- $I_{Teficaz}$: Corrente eficaz que passa pelo transistor [A];
- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do

conversor *Boost*.

Finalmente, a corrente de pico é obtida através da equação A.8: [38, 39, 40]

$$I_{Spico} = I_{Lpico} = I_{max} + \frac{V_{conv} \cdot D}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (A.8)$$

Onde:

- I_{Spico} : Corrente de pico que passa pelo transistor [A];
- I_{max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- L : indutância do indutor boost [H];
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz];
- V_{conv} : Tensão mínima de entrada do conversor [V].

I.III Dimensionamento do diodo

Como no transistor, a tensão máxima reversa nos terminais do diodo é igual à tensão de saída. A corrente média no diodo pode ser calculada pela equação A.9: [38, 39, 40]

$$I_{Dmed} = (1 - D) \cdot I_{max} \quad (A.9)$$

Onde:

- I_{Dmed} : Corrente média no diodo [A];
- I_{max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor.

Assim é determinada a corrente eficaz do diodo do conversor boost com a equação A.10: [38, 39, 40]

$$I_{Deficaz} = \sqrt{1 - D} \cdot I_{max} \quad (A.10)$$

Onde:

- $I_{Deficaz}$: Corrente eficaz no diodo [A];

- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor.

Com os valores de corrente eficaz e de pico e da tensão reversa, pode-se escolher o diodo a ser utilizados no projeto. [38, 39, 40]

I.IV Dimensionamento do capacitor de filtro

Como os capacitores de saída estão em paralelo com a carga, a tensão máxima que estes capacitores estarão submetidos será igual a da carga. Desta forma a tensão de trabalho dos capacitores deve ser pelo menos 25% maior [38, 39, 40]

Com as equações a seguir podem-se calcular os valores de corrente através dos capacitores e com esses valores calcular a resistência série equivalente do capacitor e o seu valor propriamente dito. A corrente eficaz que atravessa o capacitor de saída é vista na equação A.11: [38, 39, 40]

$$I_{Ceficaz} = \sqrt{(1-D)} \cdot I_{conv} - \frac{P_{Carga}}{V_o} \quad (A.11)$$

Onde:

- $I_{Ceficaz}$: Corrente eficaz no capacitor [A];
- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- I_{conv} : Corrente na entrada do conversor [A];
- P_{Carga} : Potência da carga [W];
- V_o : Tensão de saída do conversor [V].

A ondulação de corrente no capacitor é dada pela equação A.12: [38, 39, 40]

$$\Delta I_C = I_{\max} + \frac{V_{conv} \cdot D}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (A.12)$$

Onde:

- ΔI_C : Ondulação de corrente máxima no capacitor [A];

- I_{\max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- L : indutância do indutor boost [H];
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz];
- V_{conv} : Tensão mínima de entrada do conversor [V].

Considerando uma variação de 10% na ondulação da tensão na saída conforme a equação A.13, tem-se: [38, 39, 40]

$$\Delta V_o = 10\% \cdot V_o \quad (\text{A.13})$$

Onde:

- ΔV_o : Ondulação da tensão de saída do conversor [V];
- V_o : Tensão de saída do conversor do conversor [V].

Conhecendo a corrente de saída do conversor com o auxílio da equação A.14:

$$I_o = \frac{P_{\text{Carga}}}{V_o} \quad (\text{A.14})$$

Onde:

- I_o : Corrente de saída do conversor [A];
- P_{Carga} : Potência da carga [W];
- V_o : Tensão de saída do conversor [V].

Calcula-se o valor do capacitor mínimo requerido para a máxima ondulação de tensão com a equação A.15: [38, 39, 40]

$$C \geq \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_o} \quad (\text{A.15})$$

Onde:

- C : Capacitância mínima do capacitor [F];
- I_o : Corrente de saída do conversor [A];

- D: Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz];
- ΔV_o : Ondulação da tensão de saída do conversor [V].

Assim, a resistência série equivalente do capacitor (R_{SE}), deve ser menor que o valor expresso pela equação A.16: [38, 39, 40]

$$R_{SE} \leq \frac{\Delta V_o}{\Delta I_c} \quad (\text{A.16})$$

Onde:

- ΔI_c : Ondulação de corrente máxima no capacitor [A];
- ΔV_o : Ondulação da tensão de saída do conversor [V].

II Conversor CC-CC Buck

O conversor *Buck* é utilizado para converter uma tensão contínua de entrada em uma tensão de saída com valor inferior ao valor da tensão de entrada, ou seja consiste de um circuito rebaixador de tensão [41]. O circuito elétrico do Conversor CC-CC *Buck* pode ser visto na Figura 2.

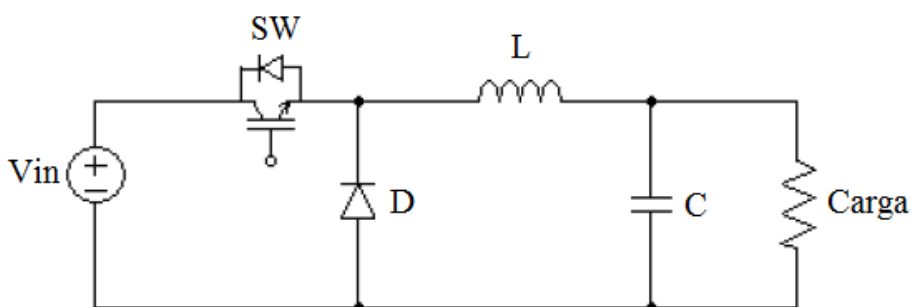


Figura 2 - Demonstrativo do circuito elétrico de um conversor *Buck*

Inicia-se o dimensionamento do conversor *Buck* obtendo-se a relação entre a tensão de entrada e saída no conversor Buck pode ser expressa com a equação A.17: [39]

$$D = \frac{V_{Carga}}{V_{max}} \quad (A.17)$$

Onde:

- D: Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- V_{Carga} : Tensão de saída do conversor [V];
- V_{max} : Tensão máxima de entrada do conversor [V].

Enquanto a corrente na carga (I_{Carga}) pode ser obtida pela equação A.18: [39]

$$I_{Carga} = \frac{P_{Carga}}{V_{Carga}} \quad (A.18)$$

Onde:

- P_{Carga} : Potência da carga [W];
- V_{Carga} : Tensão de saída do conversor [V].

II.I Dimensionamento do indutor

Neste conversor o dimensionamento do indutor é similar ao anterior, só que desta vez a corrente máxima que circula no indutor é igual à corrente de saída do conversor, conforme mostra a equação A.19: [39]

$$\Delta I_L = 15\% \cdot I_{Carga} \quad (A.19)$$

Onde:

- ΔI_L : Variação da ondulação de corrente sobre o indutor [A];
- I_{Carga} : Corrente de saída do conversor [A].

O valor mínimo da indutância é encontrado através da equação A.20: [39]

$$L = \frac{V_{max} \cdot (D - D^2)}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (A.20)$$

Onde:

- L : Indutância do indutor do Conversor *Buck* [H];
- V_{\max} : Tensão máxima de entrada do conversor [V];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- ΔI_L : Variação da ondulação de corrente sobre o indutor [A];
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz].

A corrente de pico no indutor é calculada através da equação 38: [39]

$$I_{L\text{ pico}} = I_{Carga} + \frac{V_{Carga} \cdot (1-D)}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (38)$$

Onde:

- $I_{L\text{ pico}}$: Corrente de pico que passa pelo indutor [A];
- I_{Carga} : Corrente de saída do conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- L : Indutância do indutor do Conversor [H];
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz];
- V_{Carga} : Tensão de saída do conversor [V].

Já a corrente eficaz é encontrada aplicando-se a equação A.21: [39]

$$I_{L\text{ eficaz}} = I_{Carga} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{V_{Carga} \cdot (1-D)}{2 \cdot I_{Carga} \cdot f_s \cdot L} \right)^2} \quad (A.21)$$

Onde:

- $I_{L\text{ eficaz}}$: Corrente eficaz que passa pelo indutor [A];
- I_{Carga} : Corrente de saída do conversor [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- L : Indutância do indutor do Conversor [H];

- f_s : Frequência de chaveamento [Hz];
- V_{Carga} : Tensão de saída do conversor [V].

II.II Dimensionamento do transistor

A máxima tensão nos terminais dreno-fonte (V_{DS}) do interruptor será igual à máxima tensão de entrada. A corrente média que passa pelo transistor é determinada com a equação A.22: [42]

$$I_{Smed} = D \cdot I_{Carga} \quad (A.22)$$

Onde:

- I_{Smed} : Corrente média que passa pelo transistor [A];
- I_{Carga} : Corrente de saída do conversor ou na carga [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor.

Já a corrente eficaz é encontrada pela equação A.23: [42]

$$I_{Teficaz} = I_{Carga} \cdot \sqrt{D} \quad (A.23)$$

Onde:

- $I_{Teficaz}$: Corrente eficaz que passa pelo transistor [A];
- I_{Carga} : Corrente de saída do conversor ou na carga [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor.

A corrente de pico no interruptor será igual à corrente de pico no indutor [42].

II.III Dimensionamento do diodo

A tensão máxima reversa nos terminais do diodo é igual à tensão de entrada. Já corrente média no diodo pode ser calculada pela equação A.24: [42]

$$I_{Dmed} = \frac{(D - D^2) \cdot V_{max} \cdot P_{Carga}}{V_{Carga}^2} \quad (A.24)$$

Onde:

- I_{Dmed} : Corrente média no diodo [A];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- V_{max} : Tensão máxima de entrada do conversor [V];
- P_{Carga} : Tensão da carga [W].
- V_{Carga} : Tensão de saída do conversor ou na carga [V].

Assim, é determinada a corrente eficaz do diodo do conversor Buck com a equação A.25: [42]

$$I_{Deficaz} = \frac{D \cdot V_{max} \cdot P_{Carga} \cdot \sqrt{1 - D}}{V_{Carga}^2} \quad (A.25)$$

Onde:

- $I_{Deficaz}$: Corrente eficaz no diodo [A];
- V_{max} : Tensão máxima que circula no conversor [V];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor;
- P_{Carga} : Tensão da carga [W];
- V_{Carga} : Tensão de saída do conversor ou na carga [V].

No diodo a corrente de pico será igual à corrente de pico no indutor [42].

II.IV Dimensionamento do capacitor de filtro

Considerando a mesma variação de 10% usada no conversor Boost na ondulação da tensão de saída, obtém-se a equação A.26:

$$\Delta V_o = 10\% \cdot V_o \quad (A.26)$$

Onde:

- ΔV_o : Ondulação da tensão de saída do conversor [V];

- V_o : Tensão de saída do conversor do conversor [V].

Logo o valor do capacitor mínimo para a máxima ondulação de tensão é encontrado com a equação A.27: [42]

$$C \geq \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta V_o \cdot f_s} \quad (\text{A.27})$$

Onde:

- C: Capacitância mínima do capacitor [F];
- ΔI_L : Variação da ondulação de corrente sobre o indutor [A];
- f_s : Frequência de chaveamento [Hz];
- ΔV_o : Ondulação da tensão de saída do conversor [V].

Assim, a resistência série equivalente do capacitor, deve ser menor que o valor expresso pela equação A.28: [42]

$$R_{SE} \leq \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} \quad (\text{A.28})$$

Onde:

- ΔI_L : Variação da ondulação de corrente sobre o indutor [A];
- ΔV_o : Ondulação da tensão de saída do conversor [V].

III Conversor CC-CC *Buck-Boost*

O circuito elétrico equivalente do conversor *Buck-Boost* pode ser visto na Figura 3. Este circuito pode elevar e também diminuir a tensão de saída em relação à tensão de entrada e ainda destaca-se que este circuito possui fase invertida [41].

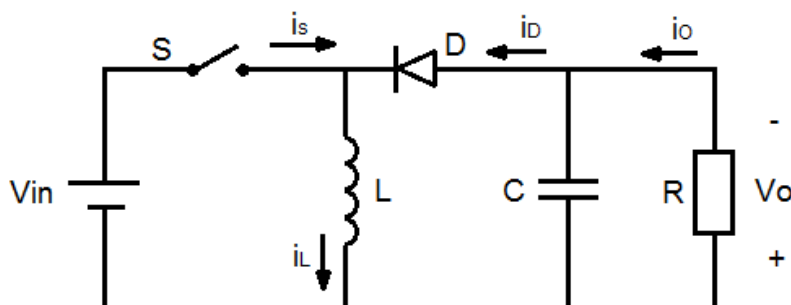


Figura 3 – Demonstrativo do circuito do conversor *Buck-Boost*

O conversor Buck-Boost proposto irá operar no modo de condução contínua, neste caso a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída é expressa na equação A.29:

$$\frac{V_o}{V_{conv}} = \frac{D}{1-D} \quad (\text{A.29})$$

Onde:

- V_o : Tensão de saída do conversor [V];
- V_{conv} : Tensão mínima de entrada do conversor [V];
- D : Razão cíclica para um período completo de funcionamento do conversor.

Os demais cálculos para o conversor Buck-Boost são idênticos aos do conversor Boost que seguem nas equações A.2 à A.16. O fluxograma apresentado na Fig. 4 demonstra o passo a passo para determinação dos componentes.

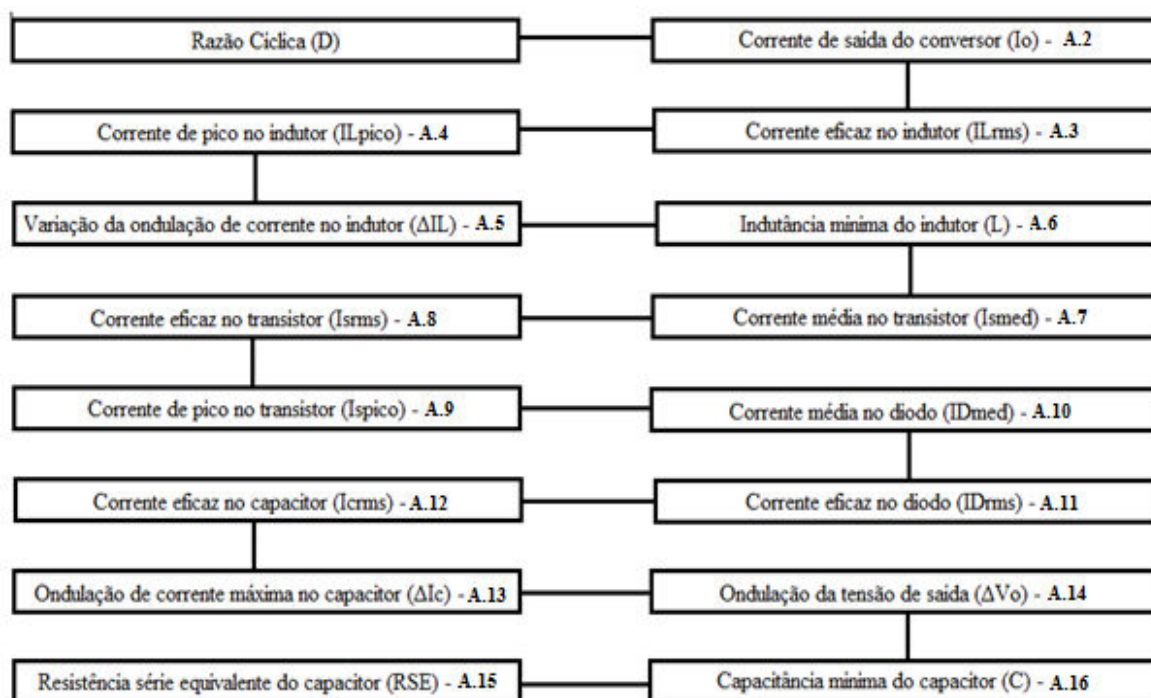


Figura 4 - Fluxograma para dimensionamento do conversor Buck-Boost

IV Dimensionamento do indutor

O dimensionamento da estrutura física do indutor é igual para todos os tipos de conversores supracitados, para se projetar corretamente o indutor para o conversor CC-CC desejado. O procedimento de cálculo utiliza-se os valores previamente determinados do conversor CC-CC bem como a indutância calculada para o mesmo. A seguir apresenta-se a metodologia de cálculo para determinação do indutor a ser utilizado.

IV.I Dimensionamento do núcleo do indutor

O dimensionamento físico é importante para que o indutor não sature as condições de trabalho e também para minimizar as não linearidades próprias do indutor como a indutância magnetizante, indutância de dispersão, capacitâncias entre enrolamentos, capacitâncias entre espiras, etc. [39] Na Figura 5 apresenta-se um núcleo de ferrite do tipo E, indicando área efetiva da perna central do núcleo e a área da janela onde fica situado o enrolamento.

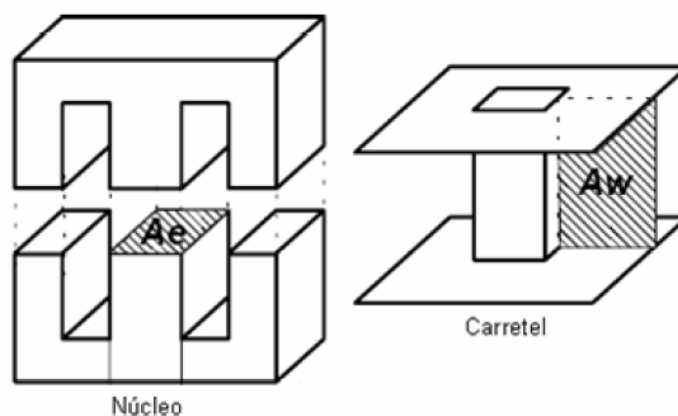


Figura 5 - Demonstrativo de um núcleo tipo E para confecção do indutor [39]

Inicialmente, define-se o valor do produto $A_e \cdot A_w$ necessário para a fabricação do indutor, com a equação A.30 [39]:

$$A_e \cdot A_w = + \frac{L \cdot I_{L\text{ pico}} \cdot I_{\text{max}} \cdot 10^4}{B_{\text{max}} \cdot J_{\text{max}} \cdot F_u} \quad (\text{A.30})$$

Onde:

- A_e : Área efetiva da perna central do núcleo [cm^2];
- A_w : Área da janela onde é situado o enrolamento [cm^2];

- L: Indutância do indutor do Conversor Boost [H];
- F_u : Fator de ocupação do cobre no carretel, geralmente utiliza-se 70% (0,7) [%];
- B_{max} : Máxima densidade de fluxo magnético [T];
- J_{max} : Máxima densidade de corrente elétrica no cobre do fio [A/cm^2];
- I_{Lpico} : Corrente de pico que passa pelo indutor [A];
- I_{max} : Corrente máxima que circula no conversor [A].

O valor de máximo da densidade do fluxo magnético do núcleo do indutor deve ser encontrado através da curva de magnetização (B versus H). Os núcleos mais indicados para operação em frequências elevadas são os de ferrite. A Figura 6 mostra a curva de magnetização da ferrite. Analisando a curva de magnetização observa-se que o valor da densidade de fluxo magnético (B) mais apropriado é de 0,25Tesla, porque nessa região a curva de magnetização tem um comportamento linear e não é muito afetada pela temperatura. [39]

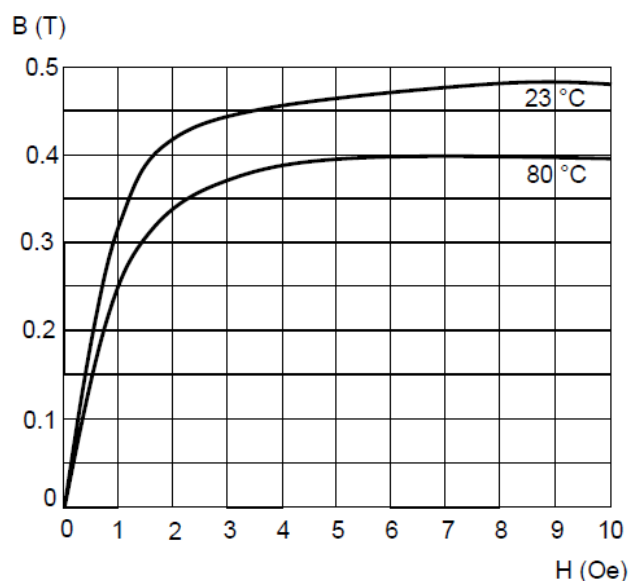


Figura 6 - Demonstrativo da curva de magnetização do Ferrite.

O valor da intensidade de campo magnético (H) indica a capacidade máxima de corrente por unidade de área que depende dos condutores utilizados nos enrolamentos mas geralmente o valor da intensidade de campo magnético (H) fica entre 300 e 350 Oerted ou A/cm^2 [39].

Com todos os valores a disposição já é possível encontrar o produto $A_e.A_w$,

para então escolher o núcleo. Deve-se optar o núcleo que apresente o valor do produto $Ae \cdot Aw$ em suas especificações mais próximo ao especificado pelo projeto. [39]

IV.II Dimensionamento da bobina do indutor

O número de espiras pode ser obtido através da equação A.31:

$$Ne = \frac{L \cdot I_{L\text{pico}} \cdot 10^4}{B_{\text{max}} \cdot Ae} \quad (\text{A.31})$$

Onde:

- Ne: Número de espiras;
- Ae: Área efetiva da perna central do núcleo [cm^2];
- L: Indutância do indutor do Conversor Boost [H];
- Bmax: Máxima densidade de fluxo magnético [T];
- $I_{L\text{pico}}$: Corrente de pico que passa pelo indutor [A].

Para encontrar o valor de Ae , faz-se necessário analisar as especificações do núcleo fornecidas pelo fabricante. [39]

IV.III Determinação do entreferro do núcleo

O valor do entreferro é visto através da equação A.32: [39]

$$l_{\text{gap}} = Le \cdot \left(\frac{1}{\mu e} - \frac{1}{\mu r} \right) \quad (\text{A.32})$$

Onde:

- l_{gap} : Comprimento do entreferro [mm];
- Le: Comprimento efetivo do núcleo (fornecido pelo fabricante) [cm];
- μe : Permeabilidade relativa equivalente do núcleo [H/m];
- μr : Permeabilidade relativa do núcleo (fornecida pelo fabricante) [H/m].

O valor da permeabilidade relativa equivalente do núcleo é obtido pela equação A.33: [39]

$$\mu e = \frac{B_{\max}^2 \cdot V_e}{2 \cdot \mu_0 \cdot W_{L \max}} \quad (\text{A.33})$$

Onde:

- μe : Permeabilidade relativa equivalente do núcleo [H/m];
- μ_0 : Permeabilidade do ar ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$) [H/m];
- B_{\max} : Máxima densidade de fluxo magnético [T];
- V_e : Volume magnético efetivo do núcleo (fornecido pelo fabricante) [cm³];
- $W_{L \max}$: Máxima energia a armazenar no indutor [J].

Define-se com a equação A.34 a máxima energia a armazenar no indutor como sendo: [39]

$$W_{L \max} = \frac{1}{2} \cdot I_{L \text{ pico}} \cdot L \quad (\text{A.34})$$

Onde:

- $W_{L \max}$: Máxima energia a armazenar no indutor [J];
- $I_{L \text{ pico}}$: Corrente de pico que passa pelo indutor [A];
- L : Indutância do indutor do Conversor Boost [H].

IV.IV Dimensionamento do condutor da bobina do indutor

O uso dos condutores em altas frequências deve levar em consideração o efeito pelicular. Com o aumento da frequência a corrente no condutor começa a se distribuir pela superfície do mesmo. Este efeito causa uma redução na área efetiva do condutor. Então, o condutor a ser utilizado não deve possuir um diâmetro superior a 2Δ , sendo que Δ é determinado com a equação A.35: [39]

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} \quad (\text{A.35})$$

Onde:

- f_s : Frequência de chaveamento [Hz].

Já a área do condutor depende da máxima densidade de corrente admitida para o condutor e da máxima corrente eficaz que passará por ele. A equação A.36 faz esta relação: [39]

$$A_{cond} = \frac{I_{max}}{J_{max}} \quad (A.36)$$

Onde:

- A_{cond} : Área do condutor [cm^2];
- I_{max} : Corrente máxima que circula no conversor [A];
- J_{max} : Máxima densidade de corrente elétrica no cobre do fio [A/cm^2].

Com o valor de A_{cond} obtido deve-se determinar o valor do diâmetro correspondente a esta área com o auxílio da equação A.37:

$$D_{cond} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cond}}{\pi}} \quad (A.37)$$

Onde:

- D_{cond} : Diâmetro do condutor [cm];
- A_{cond} : Área do condutor [cm^2].

Caso o valor de D_{cond} não seja menor que 2Δ , é necessário que se associe condutores em paralelo, formando o fio de *Litz*, com a finalidade de conduzir a corrente sem que haja o superaquecimento dos fios. O número de fios condutores pode ser calculado pela equação A.38: [38] [39]

$$N_{cond} = \frac{A_{cond}}{A_{sup}} \quad (A.38)$$

Onde:

- N_{cond} : Número de condutores;
- A_{cond} : Área do condutor [cm^2];
- A_{sup} : Área do condutor cujo valor máximo é limitado pelo valor de 2Δ [cm^2].

Portanto a área total ocupada pelos condutores é representada na equação A.39:

[39]

$$A_{total} = Ne \cdot N_{cond} \cdot A_{sup+isol} \quad (A.39)$$

Onde:

- A_{total} : Área total ocupada pelos condutores [cm^2];
- Ne : Número de espiras;
- N_{cond} : Número de condutores;
- $A_{sup+isol}$: Área do condutor mais a camada de isolamento [cm^2].

V Dimensionamento térmico

Neste subcapítulo descreve-se a metodologia para dimensionamento do dissipador a ser utilizado nos semicondutores do conversor CC-CC. Esta metodologia tem a finalidade de garantir que a temperatura de cada componente permaneça dentro dos limites máximos pré-estabelecidos pelo fabricante.

Generalizando sabe-se que os semicondutores em média têm sua máxima temperatura de junção variando entre 150°C a 175°C . É válido destacar que a vida útil de um semicondutor tem relação direta com a temperatura de trabalho, ou seja, quanto maior for a temperatura de trabalho menor será o tempo médio entre falhas (MTBF). [40]

Logo, visando garantir o funcionamento do conversor CC-CC bem como maximizar sua vida útil, sugere-se por segurança que a temperatura máxima em cada junção seja de 120°C . Para fins de cálculo térmico em regime permanente utiliza-se o circuito análogo elétrico demonstrado na Fig. 7.

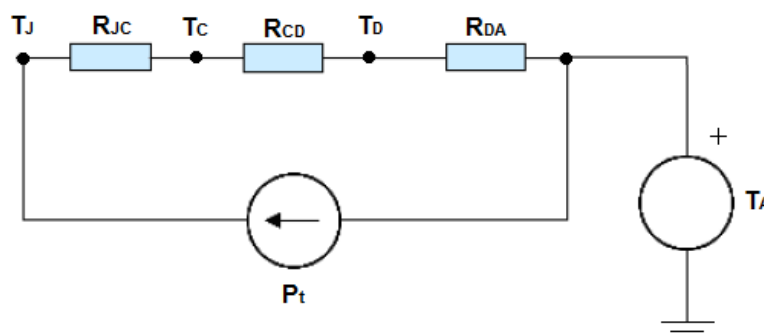


Figura 7 - Demonstrativo do análogo elétrico do circuito térmico dos semicondutores

Na Fig. 5 pode-se visualizar o análogo elétrico do circuito térmico aonde se têm representadas todas as variáveis de influência no sistema.

Onde:

- T_J : Temperatura da junção [$^{\circ}\text{C}$];
- T_C : Temperatura do encapsulamento [$^{\circ}\text{C}$];
- T_D : Temperatura do dissipador [$^{\circ}\text{C}$];
- T_A : Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$];
- R_{JC} : Resistência térmica da junção para a cápsula [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];
- R_{CD} : Resistência térmica de contato entre o semicondutor e o dissipador [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];
- R_{DA} : Resistência térmica de contato entre o dissipador e o ambiente [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];
- P_t : Perdas totais no semicondutor [W].

Aplicando-se as Leis de *Kirchoff* no circuito da Figura 7 que diz que o somatório das diferenças de potenciais em um caminho fechado é igual zero, obtém-se a equação A.40.

$$T_J - T_A - P_t \cdot (R_{JC} + R_{CD} + R_{DA}) = 0 \quad (\text{A.40})$$

Logo, a resistência térmica do dissipador (R_{DA}) pode ser calculada pela equação A.41.

$$R_{DA} \leq \frac{T_J - T_A}{P_t} - R_{JC} - R_{CD} \quad (\text{A.41})$$

Para fins de dimensionamento pode-se estimar a temperatura máxima da junção do semicondutor sem utilizar o dissipador utilizando a resistência térmica da junção com o ambiente (R_{JA}). Destaca-se que este dado consta no *datasheet* fornecido pelo fabricante e conseqüentemente pode-se obter a temperatura de junção através da equação A.42.

$$T_J = T_A + R_{JA} \cdot P_t \quad (\text{A.42})$$

Onde:

- R_{JA} : Resistência térmica da junção com o ambiente [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

É válido destacar que a deve optar pelo dissipador que possua a resistência térmica igual ou inferior à resistência térmica de contato entre o dissipador e o ambiente (R_{DA}), garantindo assim que os semicondutores trabalhem com segurança e dentro dos limites admissíveis de temperatura.