

Universidade Federal da Paraíba



Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Mestrado - Doutorado

Gerador Termoelétrico de Exaustão Automotiva com Permutador de Calor de Aletas e Minicanais Corrugados

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de doutor*

**João Pessoa – Paraíba
Fevereiro, 2024**

CLEITON RUBENS FORMIGA BARBOSA JÚNIOR

**Gerador Termoelétrico de Exaustão Automotiva com
Permutador de Calor de Aletas e Minicanais Corrugados**

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do Grau de
Doutor.

Orientador: Professor Carlos Antônio Cabral dos Santos

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro, 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B238g Barbosa Junior, Cleiton Rubens Formiga.

Gerador termoelétrico de exaustão automotiva com
permutador de calor de aletas e minicanais corrugados /
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Junior. - João Pessoa,
2024.

153 f. : il.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Gerador termoelétrico. 2. Efeito Seebeck. 3.
Motor térmico - Eficiência. 4. Recuperação de energia.
I. Santos, Carlos Antônio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.3(043)

Gerador Termoelétrico de Exaustão Automotiva com Permutador de Calor de Aletas e Minicanais Corrugados

Por

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior

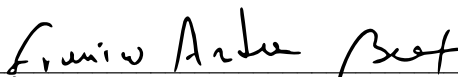
Tese aprovada em 29 de fevereiro de 2024

Período letivo 2024.1

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS
Data: 16/05/2024 09:05:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos – UFPB

Orientador



Prof. Dr. Francisco Antônio Belo - UFPB

Examinador interno

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE MAURICIO ALVES DE MATOS GURGEL
Data: 08/05/2024 16:51:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel - UFPB

Examinador Interno



Prof. Dr. Ângelo Roncalli de Oliveira Guerra - UFRN

Examinador Externo



Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza - UFRN

Examinador Externo

DEDICATÓRIA

“Mentes pequenas discutem a vida de outras pessoas, falácias. Boas mentes discutem eventos. Mentes brilhantes discutem ideias.” Denzel Washington

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa não poderia ter sido concluída com êxito sem as contribuições e os apoios recebidos de diversas pessoas as quais presto aqui a minha homenagem:

Agradeço primeiramente e imensamente a DEUS pelas inúmeras bênçãos e por sempre me iluminar e guiar meus passos nessa vida.

À minha esposa Heloísa Helena pelo apoio e colaboração ao longo desta jornada, por toda paciência e compreensão, todo amor e carinho.

Agradeço aos meus pais Cleiton Rubens e Lenise Paiva pela educação, paciência e todo amor demonstrados ao longo dos anos, que foram essenciais para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Professor Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos pela confiança em mim depositada, acolhimento, oportunidade, ensinamentos e orientação desta tese de doutorado.

Ao Professor Dr. Francisco de Assis Oliveira Fontes pela amizade e valiosas contribuições no ajuste da bancada experimental.

Ao Professor Dr. Maurício Peres de Engenharia dos Materiais/UFRN pelas análises de MEV e EDS das superfícies e materiais dos permutadores de calor do TEGea;

Ao Dr. Engenheiro Mecânico Alysson Lucena do Nascimento pelas contribuições no desenvolvimento do módulo ventilador da bancada experimental de testes do TEGea.

Ao Dr. Engenheiro Mecânico da Petrobras Elierton Evangelista das Neves pelo apoio e colaboração na simulação TEGea do ANSYS;

Ao Professor Dr. Edilson Marinho e ao Técnico Ricardo Luiz (IFRN) pelas contribuições no desenvolvimento dos controles da bancada experimental de testes do TEGea.

Ao estudante de graduação em Engenharia Mecânica da UFRN Matheus Antônio Pereira da Silva pela usinagem em frezadora CNC dos minicanais dos permutadores de calor do TEGea.

Ao doutorando de Engenharia de Materiais da UFRN Luciano Lucas Fernandes Lima pelo apoio nos ensaios de rugosidade das superfícies dos permutadores de calor do TEGea.

Aos funcionários da UFRN: Dr. Luiz Henrique Pinheiro (Laboratório de Metrologia), João Maria Alves Frazão (Laboratório de Manufatura), Eliane Alves Rocha e Arivaldo Alves (Laboratório de Energia), pelas contribuições e apoio na execução dos experimentos.

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica (PPGEM/UFPB) pela oportunidade.

Aos professores da banca de qualificação e defesa de tese de doutorado pelas valiosas contribuições de aperfeiçoamento e qualidade da pesquisa.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o êxito desta pesquisa de doutorado.

GERADOR TERMOELÉTRICO DE EXAUSTÃO AUTOMOTIVA COM PERMUTADOR DE CALOR DE ALETAS E MINICANAIS CORRUGADOS

RESUMO

A presente tese tem o foco principal a pesquisa do desenvolvimento e análise em regime transiente da performance de um protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) para recuperação de energia dos gases de exaustão de motor térmico automotivo. A modelagem numérica e a simulação do protótipo de TEGea foi realizada a partir da entrada de dados empíricos no ANSYS, auxiliando na definição da configuração dos permutadores de calor de alta e baixa temperatura e na pré-seleção dos módulos termoelétricos, além de prever os perfis de temperatura de exaustão na seção do TEGea e estimar a performance da conversão termoelétrica. O material dos permutadores de calor do TEGea proposto foi o alumínio em razão da alta condutibilidade térmica, baixa densidade e fácil usinabilidade. O design do permutador de calor de alta temperatura apresenta geometria retangular e possui aletas internas com minicanais corrugados para intensificação da captação e transferência do calor dos gases quentes para os módulos termoelétricos. O permutador de calor de baixa temperatura apresenta geometria retangular e possui um canal interno de escoamento do líquido de arrefecimento para maximização das trocas térmicas e redução das perdas por bombeamento. Uma bancada instrumentalizada (túnel de ar quente) foi desenvolvida para análise em regime transiente da performance do protótipo de TEGea. Os resultados obtidos mostram que a inserção de aletas internas com minicanais corrugados no permutador de calor da fonte quente intensifica a captação de calor contribuindo para maior eficiência do TEGea proposto.

Palavras-chave: Gerador termoelétrico, efeito Seebeck, motor térmico, eficiência, recuperação de energia

GERADOR TERMOELÉTRICO DE EXAUSTÃO AUTOMOTIVA COM PERMUTADOR DE CALOR DE ALETAS E MINICANAIS CORRUGADOS

ABSTRACT

The present thesis focuses primarily on the research of development and transient analysis of the performance of a prototype of an automotive exhaust thermoelectric generator (TEGea) for recovering energy from the exhaust gases of an automotive thermal engine. The numerical modeling and simulation of the TEGea prototype were based on empirical data input into ANSYS, assisting in defining the configuration of high and low-temperature heat exchangers and pre-selecting thermoelectric modules, as well as predicting exhaust temperature profiles in the TEGea section and estimating thermoelectric conversion performance. The proposed material for the TEGea heat exchangers was aluminum due to its high thermal conductivity, low density, and easy machinability. The design of the high-temperature heat exchanger features a rectangular geometry and internal fins with corrugated minicanals to enhance heat capture and transfer from hot gases to thermoelectric modules. The low-temperature heat exchanger also has a rectangular geometry and an internal channel for coolant flow to maximize thermal exchanges and reduce pumping losses. An instrumented test bench (hot air tunnel) was developed for transient analysis of the TEGea prototype performance. The results obtained show that the insertion of internal fins with corrugated minicanals in the heat exchanger of the hot source intensifies heat capture, contributing to the higher efficiency of the proposed TEGea.

Keywords: Thermoelectric generator, Seebeck effect, heat engine, efficiency, energy recovery

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	22
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	22
1.2 HIPÓTESE INVESTIGATIVA	26
1.3 OBJETIVOS	26
1.3.1 Objetivos geral.....	26
1.3.2 Objetivos Específicos	27
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	28
CAPÍTULO II – GERADORES TERMOELÉTRICOS	29
2.1 INTRODUÇÃO	29
2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	31
2.1.1 O Efeito Seebeck	34
2.1.2 Efeito Peltier	36
2.1.4 Efeito Thompson	36
2.1.5 Figura de Mérito	37
2.2 RELAÇÕES ENERGÉTICAS.....	40
2.3 MODO DE OPERAÇÃO.....	43
2.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO	46
CAPÍTULO III - GERADORES TERMOELÉTRICOS AUTOMOTIVO	48
3.1 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA SEEBECK.....	48
3.2 BALANÇO DE ENERGIA EM UM TEGEA.....	54
3.3 APLICAÇÕES DE TEGs AUTOMOTIVOS	56
3.4 APLICAÇÃO E PERFORMANCE DE TEGs AUTOMOTIVOS	58
CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE TEGEA.....	61
4.1.1 Simulação do TEGea	62
4.1.2 Seleção dos módulos termoeletricos.....	65
4.1.3 Projeto e desenvolvimento do permutador de calor da fonte quente.....	68
4.1.4 Seleção do permutador de calor da fonte fria	71
4.2 BANCADA EXPERIMENTAL DE TESTE DO PROTÓTIPO DE TEGEA	74
4.2.1 Projeto conceitual da bancada experimental	74

4.2.2 Bancada experimental para teste do protótipo de TEGea.....	75
4.3 METOLOGIA DOS TESTES DE PERFORMANCE DO TEGEA.....	81
4.4 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	84
4.5 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	87
4.6 ANÁLISE TERMOGRÁFICA DAS SUPERFÍCIES DO TEGEA	88
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	90
5.1 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	90
5.2 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES E COMPOSIÇÃO DO HHX.....	99
5.3 PERFORMANCE DO TEGEA	104
5.3.1 Perfis de temperatura no HHX.....	105
5.3.2 Potências de aquecimento e do TEGea	113
5.3.3 Mapas termográficos do HHX	120
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	121
REFERÊNCIAS	123
APÊNDICES	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Publicações de geradores termoeletricos na plataforma na <i>web of science</i> .	25
Figura 1.2 Publicações de geradores termoeletricos de exaustão automotiva na plataforma <i>scopus</i>	25
Figura 2.1 Diagrama esquemático de recuperação de energia residual de processo industrial típico.	30
Figura 2.2 Aplicações de geradores termoeletricos de efeito <i>Seebeck</i>	31
Figura 2.3 Fluxograma da evolução tecnológica dos geradores termoeletricos de efeito <i>seebeck</i>	31
Figura 2.4 Princípio de funcionamento do TEG	34
Figura 2.5 Potencial termoeletrico dos materiais	35
Figura 2.6 Efeito Peltier	36
Figura 2.7 Efeito Thompson	37
Figura 2.8 Efeito <i>Seebeck</i> : (a) quando um gradiente de temperatura é aplicado as junções tipo p-n, as cargas difundem-se para o lado frio; (b) o campo elétrico interno e uma diferença de tensão elétrica é obtida através do material desde que o gradiente de temperatura exista.	38
Figura 2.9 Diagrama esquemático de um módulo termoeletrico com detalhe de conectores elétricos das junções do tipo p e do tipo n.	39
Figura 2.10 Diagrama esquemático de um módulo termoeletrico com detalhe dos substratos de óxidos de alumínio de isolamento elétrico.	39
Figura 2.11 Diagrama esquemático de um módulo termoeletrico com detalhe dos bornes elétricos positivo e negativo conectados à carga externa.	40
Figura 2.12 Movimento do portador de carga	44
Figura 2.13 (a) Modo de geração de energia TEG (b) Modo TEC de refrigeração	45
Figura 2.14 Módulo termoeletrico formado por vários termopares	45
Figura 3.1 (a) Diagrama de energia (b) Percentual de fluxos de energia típicos de motores de combustão interna.	49
Figura 3.2 Diagramas de energia e potencial de recuperação de energia de motor diesel marítimo de 2 e 4 tempos	50
Figura 3.3 Potência gerada por (TEGea) <i>versus</i> potência disponível nos gases de exaustão do motor de combustão interna de 2 tempos	52
Figura 3.4 Potência gerada por (TEGea) <i>versus</i> potência disponível nos gases de	53

exaustão do motor de combustão interna de 2 tempos

Figura 3.5 Diagrama esquemático de um gerador termoeletrico de exaustão automotiva com ilustração dos balanços de fluxos de energia e massa no volume de controle do TEGea. 54

Figura 3.6 Exemplos de instalação de TEGea na tubulação de exaustão de motores de ignição por compressão (diesel). (a) Valores de picos de temperatura (b) Valores médios de temperatura 57

Figura 3.7 Valores típicos de temperatura e vazão mássica dos gases de exaustão de veículos comerciais com motorização diesel ou a gasolina em regime de plena carga. 58

Figura 3.8 Sistema para motores diesel com TEGea e aquecedor elétrico autônomo (TATH) para controle do NO_x. 59

Figura 4.1 Fluxograma das fases de desenvolvimento do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) proposto na pesquisa 61

Figura 4.2 Modelos 3-d: (a) Gerador termoeletrico de exaustão automotiva (b) Permutador de calor da fonte quente (c) Módulo termoeletrico 63

Figura 4.3 (a) Malha do permutador de calor da fonte quente (b) Condições de contorno do modelo fluido-térmico 64

Figura 4.4 Acoplamento no *software* ANSYS dos submodelos fluido-térmico e térmico-elétrico 64

Figura 4.5 Módulo termoeletrico hz-2 do fabricante Hi-z technology 66

Figura 4.6 Módulo termoeletrico hz-14 do fabricante Hi-z technology 66

Figura 4.7 Módulo termoeletrico hz-14 do fabricante Hi-z technology 67

Figura 4.8 Módulo termoeletrico hz-14hv do fabricante Hi-z technology (a) lado frio (b) lado quente 67

Figura 4.9 (a) Foto dos 02 primeiros protótipos de HHX (b) Soprador térmico e (c) Câmera termográfica 68

Figura 4.10 Modelo 3-d de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) típico. 69

Figura 4.11 Modelo 3d do módulo comercial em alumínio que compõe o permutador de calor da fonte fria (CHX) 72

Figura 4.12 (a) Instalação do permutador de calor da fonte fria CHX na estrutura do protótipo de TEGea (b) Acabamento superficial extrudado (c) Acabamento polido. 73

Figura 4.13 Projeto conceitual da bancada experimental para teste em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) 74

Figura 4.14 Diagrama esquemático da bancada experimental para teste em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) 75

Figura 4.15 – Vista parcial da bancada experimental para teste do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)	76
Figura 4.16 Componentes da seção de propulsão do ar do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)	76
Figura 4.17 Banho termostático da Brookfield modelo TC-550 para resfriamento do permutador de calor da fonte fria (CHX) do protótipo de (TEGea)	77
Figura 4.18 Características técnicas do instrumento de pressão diferencial Magnesense II <i>dwyer</i> utilizado para identifica a queda de pressão na seção do protótipo de TEGea	78
Figura 4.19 Especificações do wattímetro Minipa et-4091 e sensor de corrente ACS712 30A utilizados para medição de parâmetros elétricos no protótipo de TEGea	79
Figura 4.20 Sensor de corrente alternada ACS712 30ª OEM compatível com Arduino e outras plataformas.	79
Figura 4.21 Sensor de temperatura termopar tipo K compatível com Arduino e outras plataformas.	80
Figura 4.22 Diagrama esquemático da instrumentação da bancada experimental para testes em regime transiente do protótipo de TEGea	80
Figura 4.23 Controles eletrônicos da bancada experimental para testes em regime transiente do protótipo de TEGea	82
Figura 4.24 Amostras de material removidas dos permutadores de calor HHX para análise de MEV e EDS	85
Figura 4.25 Microscópio eletrônico de varredura (MEV-FEG) modelo <i>Zeiss Auriga 40</i> de alta resolução 5000x do laboratório de caracterização de materiais do DEMAT/UFRN.	86
Figura 4.26 Rugosímetro portátil Taylor Hobson modelo Surtronic 25 realizando teste de rugosidade transversal do permutador de calor HHX do TEGea	87
Figura 4.27 Teste de rugosidade na superfície externa dos permutadores de calor HHX com indicação da área dos módulos termoeletricos (circunscrita na cor branca) e direção longitudinal e transversal (setas azuis)	88
Figura 4.28 Bloco padrão de calibração do rugosímetro portátil da Taylor Hobson modelo Surtronic 25 para calibração do sensor perfilométrico.	88
Figura 4.29 Especificações técnicas da câmera termográfica para avaliação dos gradientes de temperatura das superfícies quente e fria dos permutadores de calor em diferentes condições de funcionamento do TEGea.	89
Figura 5.1 Rugosidade superficial das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U150	90
Figura 5.2 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U250	91

Figura 5.3 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000, HHX-U150 e HHX-U250	92
Figura 5.4 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U150	93
Figura 5.5 rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U250	94
Figura 5.6 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000, HHX-U150 e HHX-U250	95
Figura 5.7 Rugosidade longitudinal e transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M1 e CHX-U-M1	96
Figura 5.8 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M1 e CHX-U-M1	97
Figura 5.9 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M2 e CHX-U-M2	98
Figura 5.10 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M2 e CHX-U-M2	99
Figura 5.11 Topografia da superfície interna original da base - área 1 - do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.	101
Figura 5.12 Topografia da superfície interna original da base - área 2 - do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.	102
Figura 5.13 Topografia da superfície externa original (sem usinagem) do permutador de calor hhx por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.	102
Figura 5.14 Topografia da superfície externa usinada (polida) do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.	103
Figura 5.15 Topografia da superfície externa original (sem usinagem) do permutador de calor hhx por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 2000x.	104
Figura 5.17 Mapas de temperaturas das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente	105
Figura 5.18 Mapas de temperaturas das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente	106
Figura 5.19 Mapas de temperaturas das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente	108
Figura 5.20 Mapas de temperaturas das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente	109
Figura 5.21 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-250 do TEGea em plena carga e módulos termoeletrônicos: (a) Hz-14 (b) Hz-14hv	110

Figura 5.22 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-250 do TEGea em carga parcial e módulos termoeletricos: (a) Hz-14 (b) Hz-14hv	112
Figura 5.23 Potências de aquecimento e termoeletrica do protótipo de TEGea com HHX-000 em regime de plena carga: (a) Hz-14 (b) Hz-14hv	114
Figura 5.24 Potências de aquecimento e termoeletrica do protótipo de TEGea com HHX-000 em regime de carga parcial: (a) hz-14 (b) hz-14hv	115
Figura 5.25 Potências de aquecimento e termoeletrica do protótipo de TEGea com HHX-150 em regime de plena carga: (a) Hz-14 (b) Hz-14hv	116
Figura 5.26 Potências de aquecimento e termoeletrica do protótipo de TEGea com HHX-150 em regime de carga parcial: (a) Hz-14 (b) Hz-14hv	117
Figura 5.27 Potências de aquecimento e termoeletrica do protótipo de TEGea com HHX-250 em regime de plena carga: (a) Hz-14 (b) Hz-14hv	118
Figura 5.28 Potências de aquecimento e termoeletrica do protótipo de TEGea com HHX-250 em regime de carga parcial: (a) Hz-14 (b) Hz-14hv	119
Figura 5.29 Mapas termográficos do permutador de calor HHX-000 até 156,4 °C	120
Figura 5.30 Mapas termográficos do permutador de calor HHX -000 até 176,1 °C	120
Figura A-1 Características térmicas e elétricas (a) Módulo hz-14 (b) Módulo hz-14hv e (c) módulo hz-2	131
Figura B-1 Curvas de potência termoeletrica versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria e dos tem hz-14hv	132
Figura B-2 Curvas de eficiência versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria dos módulos termoeletricos hz-14hv	132
Figura B-3 Curvas de potência termoeletrica versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria e dos tem hz-14	133
Figura B-4 Curvas de eficiência versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria dos módulos termoeletricos hz-14	133
Figura C-1 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 29,2°C a 47,4°C	134
Figura C-2 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 30,5,2°C a 47,6°C	135
Figura C-3 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 42,8°C a 104,5°C	136
Figura C-4 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 46,6°C a 148,3°C	137
Figura C-5 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 50,8°C a 156,4°C	138

Figura C-6 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 46,8°C a 165,7°C	139
Figura C-7 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 55,7°C a 176,1°C	140
Figura C-8 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 57,0°C a 175,7°C	141
Figura C-9 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 70,9°C a 175,3°C	142
Figura C-10 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 70,9°C a 175,3°C	143
Figura E-1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies internas permutador de calor HHX-000	146
Figura E-2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies internas permutador de calor HHX-150	146
Figura E-3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies internas permutador de calor HHX-250	146
Figura G-1 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-NU.	150
Figura G-2 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-NU.	150
Figura G-3 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-U.	151
Figura G-4 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-U.	151
Figura G-5 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-150-U.	152
Figura G-6 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-150-U.	152
Figura G-7 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-250-U	153
Figura G-8 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-250-U.	153
Figura G-9 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte fria CHX-000-NU	154
Figura G-10 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte fria CHX-000-NU.	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Cronologia das pesquisas de desenvolvimento da tecnologia dos geradores termoelétricos (TEG)	32
Tabela 2.2 Definição e exemplos dos três diferentes efeitos Thompson	37
Tabela 3.1 Performance de gerador termoelétrico de exaustão automotiva em diferentes regimes de condução do veículo: suburbano, interurbano ou autoestrada.	60
Tabela 4.1 Módulos termoelétricos da Hi-z Technology	65
Tabela 4.2 Permutador de calor HHX-000 do protótipo de TEGea com aletas internas retangulares sem minicanais corrugados.	70
Tabela 4.3 Permutador de calor HHX-150 e HHX-250 do protótipo de TEGea com minicanais corrugados para intensificação da turbulência do fluxo de ar aquecido.	71
Tabela 4.4 Especificação do permutador de calor da fonte fria (CHX) do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea)	73
Tabela 4.5 Especificações dos componentes da seção de propulsão de ar do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea)	77
Tabela 4.6 Unidades e sistemas de controle, monitoramento e medição da bancada experimental de testes em regime transiente do TEGea.	81
Tabela 4.7 Principais características e tipos de testes de avaliação da performance do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea)	83
Tabela 5.1 Análise por EDS da composição (% em peso) da liga de alumínio na superfície original interna da base do permutador de calor da fonte quente (HHX) incluindo o oxigênio.	100
Tabela 5.2 Análise por EDS da composição (% em peso) da liga de alumínio na superfície original interna da base do permutador de calor da fonte quente (HHX) excluindo o oxigênio.	100
Tabela 5.3 Análise por EDS da composição (% em peso) da liga de alumínio na superfície original interna da base do permutador de calor da fonte quente (HHX) incluindo ou excluindo o oxigênio.	104
Tabela D-1 Características das principais variáveis independentes para avaliação experimental da performance de TEGea.	144
Tabela D-2 Principais parâmetros de avaliação da performance do protótipo de tegea	144

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACS	Sistema de aquisição de dados
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
CHX	Trocador de calor da fonte fria
CLCU	Unidade de controle de líquido de resfriamento
DAS	Sistema de controle automatizado
EDX ou EDS	Espectroscopia de energia dispersiva de raio X
HGCU	Unidade de controle de gás quente
HHX	Trocador de calor da fonte quente
MCIA	Motor de combustão interna alternativo
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
M-FTE	Modelagem fluido-termico-elétrica
TEG	Gerador termoelétrico
TEGea	Gerador termoelétrico de exaustão automotiva
TEM	Módulo termoelétrico
HHX-000	Trocador de calor da fonte quente sem minicanais
HHX-150	Trocador de calor da fonte quente com minicanais de 150 μ m
HHX-250	Trocador de calor da fonte quente com minicanais de 250 μ m
CHX	Trocador de calor da fonte fria
HHX-NU000	Trocador de calor da fonte quente sem usinagem superficial
HHX-U150	Trocador de calor da fonte quente com minicanais de 150 μ m com usinagem superficial
HHX-U250	Trocador de calor da fonte quente com minicanais de 250 μ m com usinagem superficial
CHX-NU-M1	Trocador de calor da fonte fria não usinado módulo 1
CHX-NU-M2	Trocador de calor da fonte fria não usinado módulo 2
CHX-U-M1	Trocador de calor da fonte fria usinado módulo 1
CHX-U-M2	Trocador de calor da fonte fria usinado módulo 2

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Area do termoelemento [mm^2]
r	Parâmetro de contato [λ/λ_c]
n	Parâmetro de contato ($2\rho/\rho_c$) [mm]
I_{mp}	Corrente de máxima potência [A]
I_{sc}	Corrente de curto circuito [A]
I	Corrente [A]
R	Resistência elétrica [Ω]
Q_{in}	Calor fornecido ao TEG lado quente [W]
Q_{out}	Calor dissipado do lado frio [W]
L	Espessura (também chamado de altura) do termoelemento [mm]
L_C	Espessura da solda ou contato no módulo [mm]
m	Razão de carga [R_L/R]
R_L	Resistência da carga [Ω]
P_{max}	Potência elétrica máxima [W]
N	Número de termoelementos por módulo
V_{oc}	Voltagem do circuito aberto [V]
V_m	Voltagem de saída [V]
P	Potência [W]
P_{ref}	Potência do referencial elétrico [W]
ΔT_{ref}	Referencial da diferença de temperature [$^{\circ}\text{C}$]
x	Comprimento do lado de um termoelemento quadrado [mm]
ΔT	Diferença de temperature entre o lado quente e o lado frio [$^{\circ}\text{C}$]
T_C	Temperatura do lado frio [$^{\circ}\text{C}$]
T_H	Temperatura do lado quente [$^{\circ}\text{C}$]
Z	Figura de mérito termoselétrica $\alpha^2\alpha/\lambda$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
ρ_c	Resistividade elétrica de contato [$\Omega\cdot\text{mm}$]
λ_c	Condutividade térmica de contato [$\text{W}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$]
σ	Condutividade elétrica [$\Omega^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$]
ρ	Resistividade elétrica [$\Omega\cdot\text{mm}$]
η	Eficiência do módulo [%]
α	Coefficiente Seebeck [V/K]

R_p	Altura máxima do pico do perfil [μm]
R_v	Profundidade máxima do vale do perfil [μm]
R_z	Altura máxima do perfil [μm]
R_c	Altura média do perfil [μm]
R_t	Altura total do perfil [μm]
R_a	Desvio médio aritmético do perfil em avaliação [μm]
R_q	Desvio médio quadrático do perfil em avaliação [μm]
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil em avaliação [μm]
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil em avaliação [μm]
R_{sm}	Largura média de um elemento do perfil [μm]
R_{mr}	Razão portante do perfil
R_{dc}	Diferença de altura na seção do perfil
η_{TEM}	Eficiência do módulo termoelétrico [%]
η_{TEG}	Eficiência do gerador termoelétrico [%]
ε_{HHX}	Eficácia do trocador de calor gasoso [%]
$\dot{m}_{water}$	Taxa de vazão mássica de água $\left[\frac{kg}{s}\right]$
$\dot{m}_{air}$	Taxa de vazão mássica de ar $\left[\frac{kg}{s}\right]$
$\dot{m}_{set}$	Valor atribuído da taxa de vazão mássica de ar $\left[\frac{kg}{s}\right]$
Δp	Queda de pressão no permutador de calor [Pa]
p_f	Ar pressurizado [Pa]
p_{gen}	Potência elétrica do TEG [W]
P_H	Potência de aquecimento [W]
P_{net}	Potência da rede [W]
P_{loss}	Perda de potência do TEG [W]
R_{load}	Resistência da carga
T_C	Temperatura do lado frio do TEM [$^{\circ}\text{C}$]
T_H	Temperatura do lado quente do TEM [$^{\circ}\text{C}$]
T_{heater}	Temperatura atribuída a resistência de aquecimento [$^{\circ}\text{C}$]
T_{in_air}	Temperatura de entrada do gás [$^{\circ}\text{C}$]
T_{out_air}	Temperatura de saída do gás [$^{\circ}\text{C}$]
T_{in_water}	Temperatura de entrada da água [$^{\circ}\text{C}$]

T_{out_water}	Temperatura do ar [°C]
T_f	Temperatura de saída da água [°C]
$\dot{V}_{air}$	Taxa de vazão volumétrica de gás $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
$\dot{V}_{water}$	Taxa de vazão volumétrica de água $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
$\dot{Q}_H$	Fluxo de calor através do TEM [W]
$\dot{Q}_{in_air}$	Calor de entrada no permutador de calor da fonte quente [W]
$\dot{Q}_{out_air}$	Calor rejeitado pelo permutador de calor da fonte quente [W]

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório tem como propósitos a contextualização da pesquisa contendo a motivação, delimitação do estudo, apresentação da hipótese investigativa e os objetivos geral e específicos sobre o desenvolvimento e avaliação da performance em regime transiente de um protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) com permutador de calor de aletas e minicanais corrugados e ainda a apresentação da estrutura de organização do documento, com intuito de facilitar a melhor compreensão da tese de doutorado.

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com CAI et al (2021) à medida que as aplicações dos geradores termoeletricos (TEGs) tornaram-se mais extensas, as características transitórias dos TEGs têm gradualmente atraído maior atenção da comunidade científica. Os estudos transientes atuais em sistemas TEG, no entanto, baseiam-se principalmente no aprendizado por simulação. Além disso, o pequeno número de experimentos planejados considera, em sua maioria, um único processo de pulso de aquecimento.

Portanto, a avaliação do desempenho de geradores termoeletricos de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com fonte de calor no modo transiente e em escala de laboratório ainda é muito incipiente e carece de novas investigações experimentais. Neste contexto, a presente pesquisa propõe investigar experimentalmente a performance de protótipo de TEGea, em escala de laboratório, funcionando sob condições de contorno transientes.

Entre os principais contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa no meio ambiente, os automóveis contribuem substancialmente na ordem de 16,4%. As perspectivas atuais dos especialistas, dão conta de que a frota de veículos leves nas estradas deverá alcançar cerca de dois bilhões até 2050. (LI et al. 2022), (OCHIENG et al. 2022)

O avanço da tecnologia e aumento da frota de veículos elétricos (EV) tem sido intensificado nos últimos anos, mas ainda está longe de fazer qualquer redução drástica no

nível de emissões do setor de transporte, a menos que uma revolução seja feita na tecnologia de baterias de armazenamento de energia elétrica.

Políticas como melhor planejamento urbano que possam aumentar o uso do transporte coletivo e tecnologias inovadoras que possam reduzir a necessidade de veículos leves podem contribuir consideravelmente para a redução das emissões de CO₂.

Embora seja explorada há muito tempo devido à sua simplicidade inerente, a conversão em eletricidade de uma parte da energia térmica dos gases de exaustão de um motor de combustão interna por um gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) é uma tecnologia que ganhou muita atenção nas últimas décadas.

Em um motor de combustão interna alternativo (MCIA), somente cerca de um terço do calor total produzido na combustão do combustível é utilizado para a propulsão do veículo, enquanto os dois terços restantes são rejeitados na forma de calor residual principalmente através dos gases de exaustão e do líquido de arrefecimento do motor.

O gás de exaustão, geralmente a uma temperatura mais alta em comparação com o líquido de arrefecimento do motor que absorve o calor das paredes do motor, é liberado na atmosfera e o líquido de arrefecimento é recirculado no motor após o arrefecimento no radiador. (HEYWOOD, 2018)

Em alguns dos motores, particularmente nos movidos a diesel, para obter melhor eficiência, parte dos gases de exaustão é resfriado e misturado com ar no sistema de recirculação de gases de escape (EGR) para reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio (Nox). O turbocompressor é outra tecnologia que utiliza o calor dos gases de exaustão para melhorar a eficiência volumétrica e a potência do motor. (HEYWOOD, 2018)

No entanto, em todas essas tecnologias, apenas uma pequena fração do gás de exaustão ou de sua energia é convertida em trabalho útil e o restante é liberado para a atmosfera. Nos últimos anos, melhorar o desempenho do motor fazendo uso deste calor residual de exaustão tem sido objeto de intensa pesquisa no campo de sistemas de recuperação de energia.

A tecnologia de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) envolve a conversão do calor residual disponível nos gases de exaustão em eletricidade que pode ser

armazenada e utilizada para várias necessidades elétricas de um veículo para que a eficiência de combustível possa ser melhorada.

Desde a década de sessenta geradores termoelétricos de exaustão automotiva têm sido desenvolvidos e testados em veículos de passeio e veículos de transporte de carga utilizando principalmente módulos termoelétricos a base de telureto de bismuto. (WOJCIECHOWSKI et al. 2022), (POURKIAEI et al. 2019), (SHEN et al. 2022), (CHAMPIER et al. 2017)

Muito embora a tecnologia de geradores termoelétricos de exaustão automotiva tenha sido há mais de 50 anos, um aumento nas atividades de pesquisa neste campo vem ocorrendo apenas nos últimos 15 anos, o que é evidente a partir de Figura 1 mostrando o número de publicações sobre o tema nas últimas cinco décadas.

Esse aumento exponencial na produção de pesquisa nos últimos anos deve-se principalmente a alguns dos resultados inovadores nas propriedades dos materiais termoelétricos, que melhoraram o valor da figura de mérito (zT), que foi menos de 1 durante um longo período para mais de 1.

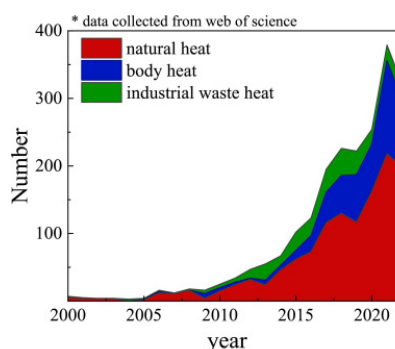
Nos últimos anos, a evolução da tecnologia da microestrutura de materiais termoelétricos em escala de comprimento micrométrica ou nanométrica têm elevado figura de mérito (zT) para valores superiores a 2. (POURKIAEI et al. 2019), (LIU et al. 2014)

No mundo contemporâneo, a crescente crise ambiental e as questões climáticas extremas tornaram um desafio urgente criar uma sociedade neutra em carbono. O gerador termoelétrico (TEG) desempenha um papel indispensável na construção de um mundo renovável devido aos seus méritos de nenhuma emissão, nenhum ruído e respeito ao meio ambiente. (LI et al. 2022)

Nas últimas décadas, o interesse da comunidade científica em geradores termoelétricos tem crescido exponencialmente em razão das perspectivas de utilização nos segmentos comercial, industrial e residencial.

As Figura 1.1 e 1.2 mostram o número de artigos científicos de geradores termoelétricos publicados nas plataformas *Web of Science* e *Scopus* nas últimas décadas, respectivamente. (LI et al. 2022), (OCHIENG et al. 2022)

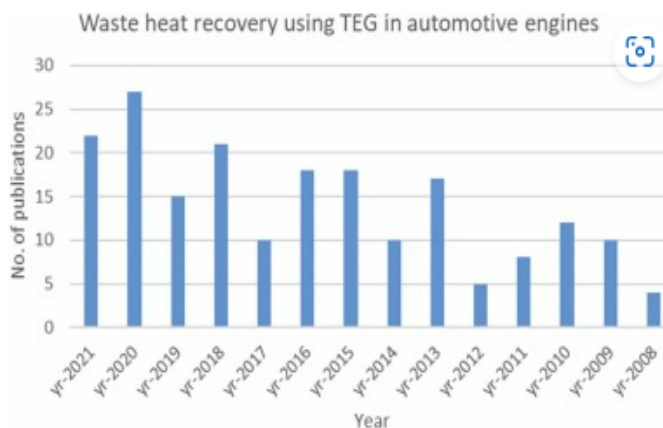
FIGURA 1.1 Publicações de geradores termoeletricos na plataforma na *Web of Science*.



Fonte: LI et al. (2022)

Um gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) consiste em pelo menos um permutador de calor que captura o calor de uma fonte de calor externa e pelo menos um conversor termoeletrico (módulo TE) que transforma o fluxo de calor absorvido diretamente em energia elétrica, além de dissipadores de calor que rejeita o excesso de calor para fonte fria (meio ambiente). (WOJCIECHOWSKI et al. 2022) e (NIU et al 2014)

FIGURA 1.2 Publicações de geradores termoeletricos de exaustão automotiva na plataforma *Scopus*



Fonte: OCHIENG et al. (2022)

O tamanho pequeno e as altas densidades de potência dos módulos termoeletricos (TEMs) permitem a construção de fontes de energia compactas. Além disso, os geradores termoeletricos TEGs são facilmente escaláveis, o que significa que podem ser aplicados a vários tipos e tamanhos de sistemas de potência. POURKIAEI et al. (2019), SHEN et al. (2019), CHAMPIER (2017).

Os geradores termoelétricos de exaustão automotiva são geralmente testados quanto ao seu desempenho por três métodos diferentes, a saber: (a) utilizando um equipamento de ensaio construído em laboratório com gás quente ou ar como fonte de calor; (b) numa condição de condução simulada utilizando um equipamento de ensaio de laboratório com motor a gasolina ou diesel e dinamômetro; (c) em um teste de condução em estrada real.

Embora a maioria dos testes de desempenho relatados até agora tenham sido realizados por primeiro ou segundo métodos, os testes em condições reais de condução são muito poucos. Estas condições reais de condução de um veículo podem dar uma avaliação mais realista das questões associadas a esta tecnologia e à sua viabilidade comercial.

A bancada experimental para teste em regime transiente de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) foi projetada e construída com o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba (PPGEM/UFPB), Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DEM/UFRN) e Instituto Federal de Educação Tecnológica do Rio grande do Norte (IFRN).

1.2 HIPÓTESE INVESTIGATIVA

A inserção de minicanais corrugados nas superfícies das aletas e paralelos ao escoamento dos gases de exaustão do permutador de calor da fonte quente poderá favorecer a transferência de calor por convecção contribuindo para maior eficiência do gerador termoelétrico de exaustão automotiva, em razão dos efeitos sinérgicos de aumento de área disponível para transferência de calor, redução da massa da aleta e nova geometria do canal que intensifica a turbulência dos gases de exaustão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos geral

O desenvolvimento experimental e avaliação da performance em regime transiente de um protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) com permutador de calor de aletas retangulares submetido a alterações topológicas ao longo do escoamento preferencial dos gases de exaustão.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Simulação no ANSYS da temperatura na superfície quente do permutador de calor em contato com os módulos termoelétricos de TEGea;
2. Simulação no ANSYS da conversão termoelétrica de TEGea com módulos termoelétricos de telureto de bismuto;
3. Seleção de módulos termoelétricos a base de telureto de bismuto para o TEGea proposto na pesquisa;
4. Projeto e desenvolvimento experimental de permutador de calor da fonte quente (HHX) com modificações topológicas nas superfícies das aletas internas para intensificação da turbulência dos gases de exaustão;
5. Caracterização da rugosidade das superfícies externas usinadas (polidas em máquinas CNC) e não usinadas (sem polimento) dos permutadores de calor da fonte quente (HHX) e da fonte fria (CHX);
6. Caracterização da topografia das superfícies das aletas do permutador de calor da fonte quente por microscopia eletrônica de varredura (MEV);
7. Identificação da composição dos elementos químicos da liga de alumínio das superfícies das aletas internas do permutador de calor da fonte quente (HHX) por Análise de (EDS);
8. Seleção de permutador de calor da fonte fria com arrefecimento a água para extração do excesso de calor dos módulos termoelétricos do protótipo de TEGea;
9. Desenvolvimento de bancada experimental automatizada, para avaliação em regime transiente da performance do protótipo de TEGea;
10. Análise experimental comparativa em regime transiente da performance do protótipo de TEGea, nas configurações do permutador de calor da fonte quente (HHX) com aletas internas de diferentes topologias.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Para melhor compreensão do leitor, a tese de doutorado está estruturada em seis capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução da pesquisa na qual são estabelecidos a motivação da pesquisa, a hipótese investigativa, os objetivos gerais e específicos e a arquitetura de organização do documento.

O segundo capítulo aborda os geradores termoelétricos de efeito *Seebeck* que representa o alicerce fundamental para o desenvolvimento da presente pesquisa experimental.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão bibliográfica contendo as publicações científicas mais relevantes da evolução e estado da arte concernentes às tecnologias de geradores termoelétricos de exaustão automotiva.

No quarto capítulo estão descritos os materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento experimental do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) proposto na pesquisa e na análise de sua performance funcionando em regime transiente.

O quinto capítulo mostra os resultados obtidos mais relevantes da pesquisa acompanhados de discussões técnicas, alicerçadas na fundamentação e revisão bibliográfica, com intuito de estabelecer a compreensão dos diferentes fenômenos observados na investigação.

Finalmente, no sexto e último capítulo são estabelecidas as principais conclusões da pesquisa e ainda são sugeridos alguns tópicos que poderão ser explorados em trabalhos futuros, visando a absorção de novos conhecimentos sobre geradores termoelétricos de exaustão automotiva.

Este documento contém ainda a relação das referências bibliográficas consultadas que fundamentam o texto e os apêndices com informações relevantes sobre diferentes aspectos relativos ao desenvolvimento da investigação.

CAPÍTULO II – GERADORES TERMOELÉTRICOS

Neste capítulo são estabelecidos os principais fundamentos dos geradores termoeletricos (TEG) de efeito *Seebeck* que serviram de alicerce para o desenvolvimento experimental e análise em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) com permutador de calor de aletas e minicanais corrugados objeto desta pesquisa.

2.1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem um papel muito importante na sociedade sendo essencial no desenvolvimento de quase todas as atividades da vida moderna. Entretanto, segundo ARIDI et al (2021) nos últimos anos, em razão da crescente demanda de energia necessária para alavancar o desenvolvimento, aliada à necessidade de um ambiente sustentável, o uso de recursos verdes e de energia residual para geração de eletricidade tem sido cada vez mais incentivado com virtuosos investimentos.

GIELENA et al. (2019) comentam que as fontes de energia renováveis constituem 25% do setor de geração de energia, e esta proporção deverá aumentar para 85% até 2050. Por outro lado, a energia residual na forma cinética ou de calor das aplicações convencionais, que é recuperada e reutilizada, incluem principalmente a recuperação de calor de gases de combustão e a recuperação de energia cinética por meio de um volante. Assim, a principal vantagem destes sistemas é a recuperação de energia residual que naturalmente seriam desperdiçadas causando maiores impactos ambientais.

Em geral, o aproveitamento das energias renováveis tem sido integrados com sistemas de recuperação de energia. De modo que, a energia perdida do sistema primário é capturada e reutilizada, criando uma fonte de energia regenerada e mais ecologicamente correta com resíduos que impactam minimamente o meio ambiente.

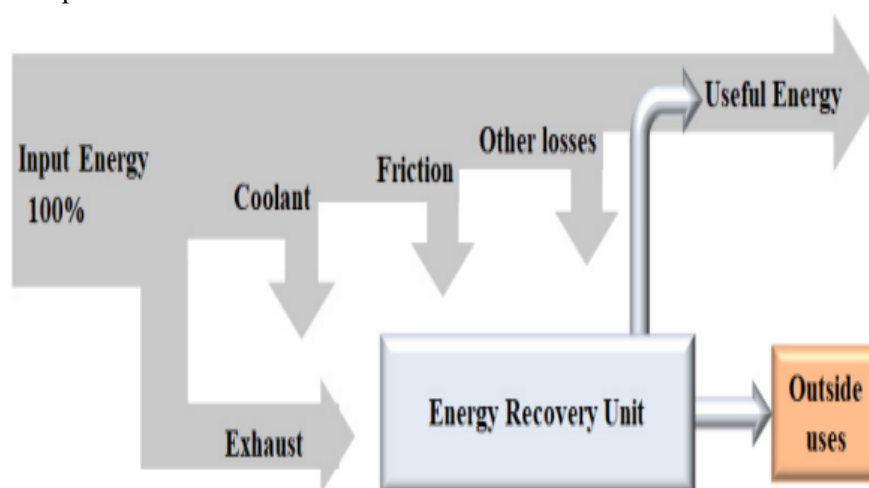
A principal vantagem do gerador termoeletrico (TEG) de efeito *Seebeck* sobre outros dispositivos de recuperação de calor é que ele pode ser aplicável para fontes de energia discretas e de pequena escala. Além disso, o TEG não contém partes móveis, tem construção simples e de baixo custo e operação silenciosa, porém apresenta menor eficiência quando utilizado em aplicações com baixas temperaturas.

A performance do TEG está relacionada a dois fatores principais: (1) propriedades termoelétricas do material, que afeta a eficiência do TEG e (2) gradiente de temperatura, que está relacionado a taxa de fluxo de massa e fonte de calor do coletor, propriedades do fluido que flui, temperatura de entrada e o projeto dos trocadores de calor da fonte quente e da fonte fria.

Para ARIDI et al (2021), a grande desvantagem da geração de energia termoelétrica por efeito *Seebeck*, proveniente de resíduos térmicos de processos industrial, continua sendo ainda a baixa eficiência de conversão, podendo atingir atualmente, em condições muito controladas e com elevados gradientes de temperatura, o limite máximo 7% de eficiência.

A Figura 2.1 apresenta o diagrama esquemático de uma unidade de recuperação da energia residual dos gases de exaustão e que pode ser aplicada a maioria dos processos industriais.

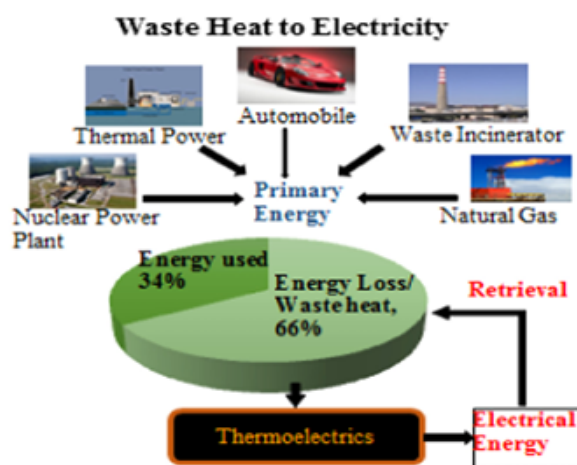
Figura 2.1 Diagrama esquemático de recuperação de energia residual de processo industrial típico.



Fonte: ARIDI et al (2021)

A Figura 2.2 apresenta a gama de possibilidades de aplicação de geradores termoelétrico (TEG) nos segmentos comercial e industrial.

Figura 2.2 Aplicações de geradores termoeétricos de efeito *Seebeck*

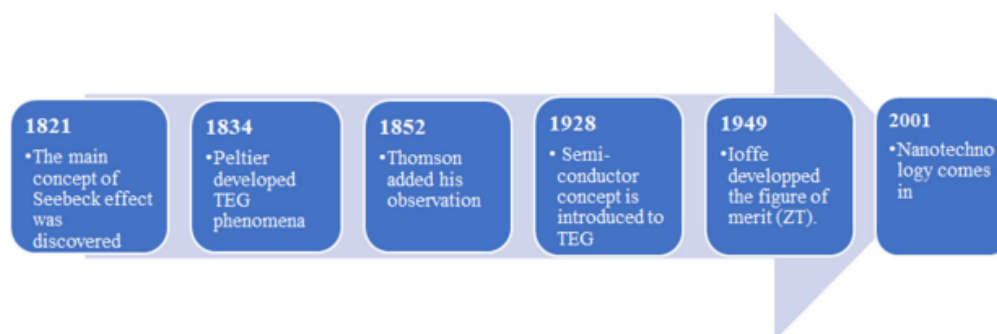


Fonte: FITRIANI et al (2016)

2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A Figura 2.3 apresenta o fluxograma com os marcos históricos na linha do tempo da evolução tecnológica dos geradores termoeétricos de efeito Seebeck. No século 18 em 1821, 1834 e 1852 foram descobertos os fenômenos termoeétricos Seebeck, Peltier e Thomson, respectivamente.

Figura 2.3 Fluxograma da evolução tecnológica dos geradores termoeétricos de efeito *Seebeck*



Fonte: ARIDI et al (2021)

No século 19 tem-se uma grande evolução tecnológica dos materiais termoelétricos do TEG com a introdução em 1928 dos semicondutores, conceito da figura de mérito em 1949 e a inserção da tecnologia de dopagem em escala nanométrica no ano de 2001.

A Tabela 2.1 apresenta os principais eventos de desenvolvimento da tecnologia dos geradores termoelétricos (TEG) relacionando cronologicamente o ano e a descoberta da pesquisa científica. A Tabela 2.1 mostra ainda que os geradores termoelétricos TEG foram amplamente difundidos e desenvolvidos, especialmente após cada marco.

Tabela 2.1 Cronologia das pesquisas de desenvolvimento da tecnologia dos geradores termoelétricos (TEG)

Year	Research Finding
1821	The main concept of Seebeck effect was discovered [54]
1834	Peltier developed TEG phenomena [55]
1852	Thomson added his observation [54]
1909	Altenkirch stated that mathematically, the relationship between the physical properties of thermoelectric materials and the efficiency of a simple TEG [52].
1911	Altenkirch (1880–1953) initiated the concept of maximum efficiency of TEG and the performance of a cooler
1928	Semiconductor concept is introduced in thermoelectric energy [56]
1930	The first thermoelectric operated radio was stated [56]
1947	Maria Telkes (1900–1995) built the first thermoelectric power generation of a 5% efficiency [56]
1949	Abram Fedorovich Ioffe developed the figure of merit (ZT) [52]
1954	H. Julian Goldsmid froze to 0 °C a surface by a TE Peltier cooler using Bismuth telluride (Bi_2Te_3) [56]
1968	The first radioisotope ISNAP19 TEG flew on a NASA spacecraft due to its reliability and remote power generation. Another TE SNAP generator was prepared to travel to the moon in the following year [56].
1970 *	The healthcare company “Medtronic” prolonged the use of TEGs in the biomedical sector [57].
1970	Medtronic has developed the first cardiac pacemaker driven by a TEG and was implanted into a human in France [56].
1972	Units of TE cooling were established in Japan for Satellite Communication Ground [58].
1975	Lead Telluride (PbTe) TEG technology was formed to generate terrestrial power remotely, forming Global TEG [56].
1977	NASA used MHW-RTG3, a Silicon Germanium (SiGe) TEG, to power two voyagers 1 and 2 [56].
2001	A noteworthy stepped forward in TEG by introducing nanotechnology scale materials [56,59]
2004	TEG was integrated into automotive through a program fund by the US Department of Energy and General Motors, like Caterpillar, BMW, and others [56,60]
2005 *	TEG for Industrial Waste Heat Recovery (WHR) was developed [61]
2006 *	Flexible TEG technology [62]
2013	Voyager 1 developed the first manmade piece powered continuously by TEG to depart the solar system and go into interstellar [56].

* There was no specific year for introducing nanotechnology or flexible TEG; the years were obtained by going back to all review papers related to nanotechnology and polymers for TEG and find the first time they were mentioned.

Fonte: ARIDI et al (2021)

Estes eventos notáveis e ideias inovadoras abriram a oportunidade para novos campos e valor acrescentado ao desenvolvimento dos TEG, onde o desenvolvimento dos TEG ajudou a estar mais envolvido nas aplicações.

Além disso, a disseminação dos TEGs em aplicações permite que a pesquisa avance no desenvolvimento de materiais TEG.

O efeito termoelétrico foi descoberto pela primeira vez em 1822 por Seebeck, que observou que a tensão poderia ser produzida por um circuito feito de dois condutores diferentes quando uma das junções era aquecida. Quando uma diferença de temperatura entre duas junções é criada, uma tensão (V) é produzida entre suas extremidades abertas. A tensão potencial (V) é proporcional à diferença de temperatura e à constante de Seebeck, como mostra a seguinte equação:

$$V = \alpha(T_H - T_C) \quad (2.1)$$

onde α é o coeficiente de Seebeck, que é uma propriedade do material termoelétrico, e T_H e T_C são as temperaturas de junção "quente" e "fria", respectivamente. O efeito Seebeck é a conversão de uma diferença de temperatura em corrente elétrica. A eficiência dos materiais termoelétricos é uma função da “figura de mérito” (Z), que é frequentemente expressa em sua forma adimensional (ZT), onde T é a temperatura absoluta. A “figura de mérito” do material termoelétrico é definida como:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \quad (2.2)$$

onde λ é a condutividade térmica, σ é a condutividade elétrica e ρ é a resistividade elétrica. A figura do mérito é uma consideração fundamental para comparar a eficiência de materiais termoelétricos. A Eq. (2.2) mostra que a figura de mérito é afetada diretamente pela condutividade elétrica e pelo coeficiente de Seebeck, mas inversamente afetada pela condutividade térmica do material termoelétrico.

O valor da ZT esteve em níveis relativamente baixos por muitos anos. Entretanto, desde o final da década de 1990, novos mecanismos para aumento da condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck e redução da condutividade térmica foram desenvolvidos para aumentar a figura de mérito termoelétrica (ZT).

Para alcançar alguns volts na carga, muitos pares termoelétricos, cada um dos quais consiste em pares de elementos semicondutores p-n, são conectados em série eletricamente e em paralelo termicamente, prensados entre duas placas cerâmicas de alta condutividade térmica, mas baixa condutividade elétrica para formar um módulo.

O módulo termoeétrico (TEM) é fixado entre o trocador de calor do lado quente e o dissipador de calor do lado frio, que absorve o calor em alta temperatura e rejeita o calor em um ambiente de temperatura mais baixa enquanto gera eletricidade. Quanto maior a diferença de temperatura do lado quente para o dissipador de calor, maior é a eficiência e a potência de saída.

Nas últimas décadas, o bismuto-telureto (Bi_2Te_3), geradores termoeétricos à base de ligas de chumbo-telureto (PbTe) e silício-germânio (SiGe) têm sido extensivamente estudados em diferentes faixas de temperatura.

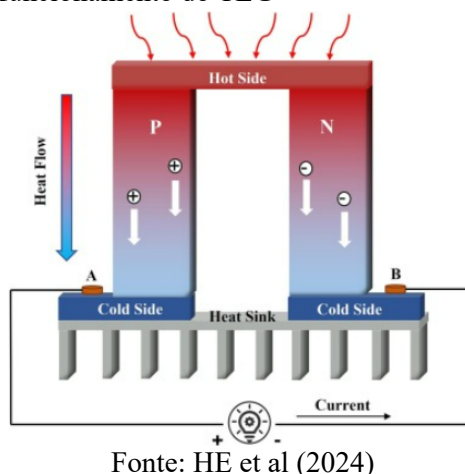
Os geradores termoeétricos baseados no telureto de bismuto (Bi_2Te_3) têm uma figura de mérito mais alta, mas sua temperatura máxima de trabalho é restrita à faixa de 250 a 300 °C. Por outro lado, os geradores de PbTe e SiGe são usados para aplicações de alta temperatura (aproximadamente 600 °C para PbTe e 1000 °C para SiGe), mas têm valores de mérito relativamente mais baixos.

Os materiais TE avançados recentemente descobertos (materiais nano estruturados, super-rede de filmes finos e poços quânticos) foram caracterizados com ZT acima de 2, tornando os dispositivos TE viáveis para aplicações específicas. Se o valor da ZT for acima de 3, os geradores de energia termelétrica se tornariam competitivos com os geradores de energia tradicionais.

2.1.1 O Efeito Seebeck

O princípio de funcionamento de um gerador termoeétrico (TEG) é mostrado na Figura 2.4 e se baseia no efeito Seebeck proposto por Thomas Johann Seebeck em 1821.

Figura 2.4 Princípio de funcionamento do TEG



Fonte: HE et al (2024)

Este físico alemão Seebeck descobriu que a agulha de uma bússola seria desviada devido às diferentes respostas dos materiais ao gradiente temperatura, criando uma corrente e um campo magnético através do loop.

Assim, o Seebeck efeito refere-se à presença de uma corrente elétrica potencial através de um material termoelétrico quando submetido a uma diferença de temperatura.

A conversão direta da energia térmica em elétrica ocorre devido a três fenômenos termoelétricos principais:

- O efeito Seebeck
- O efeito Peltier
- O efeito Thomson.

Nesta seção, três termos principais são descritos: (1) A ligação entre dois metais diferentes é chamada de termopar, (2) a força eletromotriz (fem) produzida em um termopar é chamada termo (fem), e (3) a corrente que flui através o circuito fechado é chamado de corrente termoelétrica.

Para uma faixa específica de temperatura e diferentes combinações de materiais, a termo (fem) é diferente. A direção e magnitude da (fem) térmica estão relacionadas à natureza dos materiais utilizados em termopares ΔT entre junções quentes e frias.

Na Figura 2.5 é apresentada a série de Seebeck em que o símbolo do elemento com seu número atômico e massa é organizado conforme mostrado.

Quanto maior a distância entre os dois metais escolhidos, maior será (fem) obtida e por isso que o TEG à base de telureto de bismuto é usado principalmente.

Para uma faixa específica de temperatura e diferentes combinações de materiais, a termo (fem) é diferente. A direção e magnitude da (fem) térmica estão relacionadas à natureza dos materiais termopares entre junções quentes e frias.

Figura 2.5 Potencial termoelétrico dos materiais

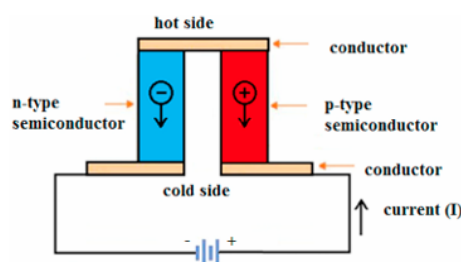
83	28	78	29	25	80	82	50	79	47	30	48	26	51	52
Bi	Ni	Pt	Cu	Mn	Hg	Pb	Sn	Au	Ag	Zn	Cd	Fe	Sb	Te
208.98	58.69	195.08	63.55	54.93	200.59	207.2	118.71	196.97	107.87	65.38	112.41	55.84	121.76	127.6

Fonte: ARIDI et al (2021)

2.1.2 Efeito Peltier

O efeito *Peltier* descoberto pelo físico francês Jean Charles Athanase Peltier em 1834 estabelece que a aplicação de corrente numa junção entre dois materiais dissimilares induz à liberação e absorção de calor (Figura 2.6). em razão dos diferentes estados de energia dos materiais semicondutores do tipo P e do tipo N.

Figura 2.6 Efeito Peltier



Fonte: ANDO JUNIOR et al (2018)

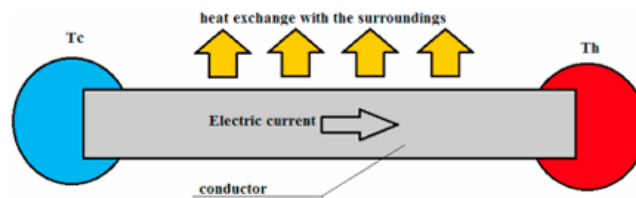
À medida que os elétrons migram do material tipo P para o tipo N, eles atingem um nível mais alto de energia, levando à absorção de calor do ambiente. Do outro lado, como os elétrons migram do material tipo N para o tipo P, os elétrons se decompõem no material de energia mais baixo nível, levando à liberação de calor para o ambiente.

Então, o efeito Peltier está relacionado ao calor absorção em uma extremidade de um material termoelétrico e liberação de calor na outra extremidade devido ao fluxo de corrente sobre o material, conforme mostrado na Figura 2.6.

2.1.4 Efeito Thompson

O efeito Thomson foi desenvolvido por William Thomson em 1851 estabelecendo que quando uma corrente passa ao longo do mesmo comprimento metálico de uma extremidade fria para a outra extremidade quente ou vice-versa, absorção e evolução do calor ocorreria conforme mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 Efeito Thompson



Fonte: ANDO JUNIOR et al (2018)

A quantidade de energia térmica desenvolvida e absorvida quando uma corrente de 1 A (um ampere) passa através de um metal entre dois pontos da diferença de temperatura $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, é chamado de Coeficiente de Thomson (τ).

O efeito de Thomson pode ser positivo, negativo ou nulo JOUHARA et al (2021) e ARIDI et al (2021). Esses efeitos distintos estão associados aos materiais utilizados, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Definição e exemplos dos três diferentes efeitos Thomson

Thomson's positive effect	When the current passes from the hot end to the cold end, the heat is developed, so the conductor becomes hot.
	When the current passes from the cold end to the hot end, the heat is absorbed, so the conductor becomes cold.
	Antimony, Silver, Zinc, Cadmium
Thomson's negative effect	When the current passes from the hot end to the cold end, the heat is absorbed, so the conductor becomes cold.
	When the current passes from the cold end to the hot end, the heat is evolved, so the conductor becomes hot.
	Platinum, Bismuth, Cobalt, Nickel, Mercury.
Thomson's null effect	Used for the standard metal in thermoelectricity.
	Lead

Fonte: ARIDI et al (2021)

2.1.5 Figura de Mérito

O coeficiente de Seebeck (α) é uma constante dos materiais termoelétricos e pode ser definido pela Equação 2.3 como:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.3)$$

Onde ΔV é a diferença de tensão em *volt* e ΔT é a diferença de temperatura em *K*.

A figura de mérito (ZT) expressa pela Equação 2.4 é um parâmetro adimensional que determina a capacidade de absorção ou rejeição de calor, sendo empregado para especificar o desempenho termoelétrico de um material específico:

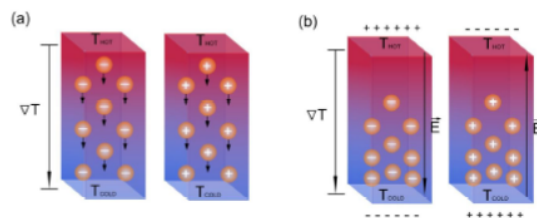
$$ZT = \frac{\alpha^2}{\kappa} \sigma T \quad (2.4)$$

Onde σ e T denotam a condutividade elétrica e a temperatura, respectivamente. κ denota a condutividade térmica que é composta por duas propriedades térmicas separadas (κ_e e κ_l , a condutividade elétrica e a condutividade da rede, respectivamente).

Em 1834 descobriu-se que na presença de corrente no circuito, dependendo da direção da corrente, vários materiais condutores absorvem ou rejeitam o calor nas juntas. Esse fenômeno representado na Figura 2.6 foi chamado de efeito Peltier.

MALIK (2018) e HAN (2014) descrevem que o efeito termoelétrico corresponde exatamente à resposta dos materiais termoelétricos (condutor/semicondutor) quando submetido a uma diferença de temperatura ou, alternativamente, quando uma corrente elétrica passa por eles, podendo ocorrer de três modos diferentes: (i) Efeito *Seebeck*; (ii) Efeito *Peltier*; (iii) Efeito Thomson.

Figura 2.8 Efeito Seebeck: (a) quando um gradiente de temperatura é aplicado as junções tipo p-n, a carga difunde-se para o lado frio; (b) o campo elétrico interno e uma diferença de tensão elétrica é obtida através do material desde que o gradiente de temperatura exista.



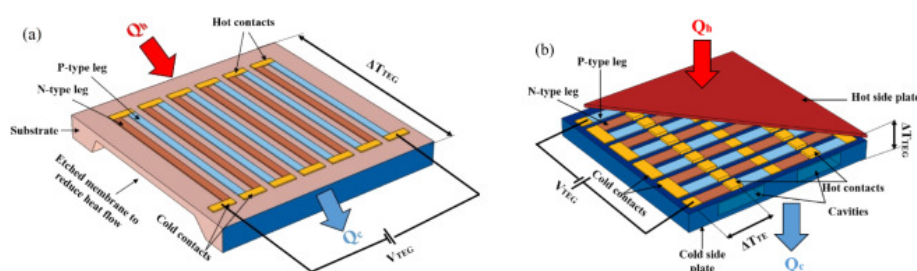
Fonte: HAN (2014)

MALIK (2018) e HAN (2014) relatam ainda que o efeito *Seebeck* foi descoberto por Thomas Johann *Seebeck* em 1821, observando que uma bússola magnética seria desviada quando aproximada de um circuito fechado, formado por dois metais diferentes, com suas junções submetidas à diferentes temperaturas.

De acordo com FARIA (2016), o efeito Seebeck pode ser usado para geração de energia elétrica a partir de um gradiente de temperatura existente entre as junções semicondutoras do tipo p-n do TEG. Diferentemente do gerador convencional que converte energia mecânica em energia elétrica, o gerador termoeletrico não tem peças móveis. Ele converte calor diretamente em eletricidade.

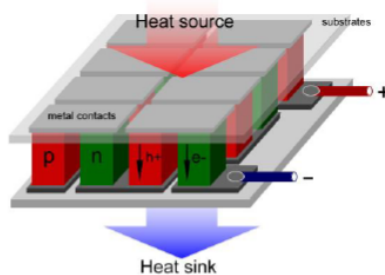
As Figuras 2.9, 2.10 e 2.11 extraídas respectivamente de JAZIRI et al (2022), MALIK (2018) e HAN (2014) mostram exemplos de diagramas esquemáticos de geradores termoeletricos (TEGs) que convertem calor diretamente em eletricidade.

Figura 2.9 Diagrama esquemático de um módulo termoeletrico com detalhe de conectores elétricos das junções do tipo P e do tipo N.



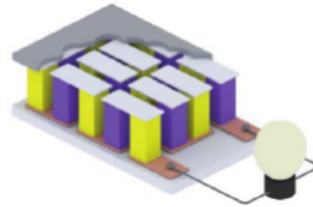
Fonte: Adaptado de JAZIRI et al (2022)

Figura 2.10 Diagrama esquemático de um módulo termoeletrico com detalhe dos substratos de óxido de alumínio de isolamento elétrico.



Fonte: MALIK (2018)

Figura 2.11 Diagrama esquemático de um módulo termoeétrico com detalhe dos bornes elétricos positivo e negativo conectados à carga externa.



Fonte: HAN (2014)

2.2 RELAÇÕES ENERGÉTICAS

As equações que governam a taxa de entrada e saída de calor de um par termoeétrico são obtidas por balanços de energia em torno das junções quente e fria, respectivamente. Essas equações são utilizadas para modelar as características dos TEGs com base nos fenômenos termoeétricos. (GAO et al 2016)

$$Q_{in} = 2\alpha IT_H + \frac{2\lambda A}{L}(\Delta T) - \frac{1}{2}I^2 \frac{2\rho L}{A} \quad (2.5)$$

$$Q_{out} = 2\alpha IT_C + \frac{2\lambda A}{L}(\Delta T) + \frac{1}{2}I^2 \frac{2\rho L}{A} \quad (2.6)$$

A potência produzida por cada par termoeétrico entre o lado quente T_H e o lado frio T_C é obtido por balanços energéticos, o que leva a:

$$P = 2 \left(\alpha I \Delta T - I^2 \frac{\rho L}{A} \right) \quad (2.7)$$

onde $\Delta T = T_H - T_C$, e A , L , λ , ρ e I são a área, o comprimento, a condutividade térmica, a resistividade elétrica e a corrente elétrica do termoelemento, respectivamente.

O maior valor da tensão produzida pelo TEG é quando as extremidades dos bornes (+) e (-) do TEM estão abertas. A tensão de circuito aberto (V_{oc}) é expressa da seguinte forma:

$$V_{oc} = (\alpha_p - \alpha_n)(T_H - T_C) \quad (2.8)$$

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) do TEG é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do TEM ($T_H - T_C$) e aos coeficientes de *Seebeck* do material semiconductor do tipo p (α_p) e do tipo n (α_n).

O fator é duplicado porque o coeficiente de *Seebeck*, a condutividade térmica e a resistividade elétrica das pernas termoelétricas do tipo n e p são assumidos como sendo iguais. Assim, a tensão de circuito aberto e a corrente elétrica são dadas por:

$$V_{oc} = 2\alpha\Delta T \quad (2.9)$$

$$I = \frac{\alpha A \Delta T}{\rho L(1+m)} \quad (2.10)$$

onde $m = R_L/R$ é a razão de carga e R_L é a resistência à carga externa.

A potência de saída pode ser obtida inserindo a corrente na Equação (2.6), que é a função das propriedades do material e da forma geométrica do par termoelétrico para uma dada diferença de temperatura:

$$P_{max} = 2 \frac{m}{(1+m)^2} \frac{\alpha^2 A}{\rho L} \Delta T^2 \quad (2.11)$$

Usando as relações acima, os casos limitantes de circuito aberto, curto-circuito e potência máxima podem ser alcançados enquanto a resistência à carga interna R é consistente com a resistência à carga externa R_L . Considerando que um módulo termoelétrico contém N pares, as seguintes relações são dadas:

$$V_{oc} = 2\alpha N\Delta T \quad (2.12)$$

$$V_{mp} = \frac{V_{oc}}{2} = \alpha N\Delta T \quad (2.13)$$

$$I_{sc} = \frac{\alpha A}{\rho L} \Delta T \quad (2.14)$$

$$I_{mp} = \frac{1}{2} \frac{\alpha A}{\rho L} \Delta T \quad (2.15)$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 NA}{\rho L} \Delta T^2 \quad (2.16)$$

Assim, a potência máxima é função da diferença de temperatura de operação, da geometria do gerador (N, A e L) e das características do material (α e ρ). A Equação (2.16) revela ainda que a potência é proporcional ao quadrado da diferença de temperatura entre as superfícies quente e fria do módulo termoeétrico (TEM).

A potência em outras temperaturas pode ser estimada a partir da seguinte equação quando a potência de saída em uma determinada diferença de temperatura é dada por um fabricante.

$$P = \frac{P_{ref}}{\Delta T_{ref}^2} \Delta T^2 \quad (2.17)$$

A potência aumenta à medida que o comprimento da perna do termoelemento diminui, o que significa que um módulo de maior potência requer menos material do que um módulo de menor potência. A tensão de saída de N termoelementos à temperatura de operação é dada por:

$$V_m = \frac{\alpha N(T_H - T_C)}{1 + 2\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)\left(\frac{L_c}{L}\right)} \quad (2.18)$$

A Equação (12.18) mostra que a tensão é proporcional ao número de elementos e à diferença de temperatura. Geralmente, muitas cargas elétricas requerem tensões mais altas

do que o módulo fornece; portanto, os módulos de alta temperatura são preferidos em relação aos módulos comuns devido à menor exigência de impulso.

A influência da temperatura na eficiência do módulo termoelétrico é dada pela seguinte expressão:

$$\eta = \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \left\{ \left(1 + \frac{2rL_c}{L} \right)^2 \left[2 - 0.5 \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) + \frac{4}{ZT} \left(\frac{L+n}{L+2rL_c} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (2.19)$$

Se os parâmetros das propriedades do módulo são assumidos como constantes através da operação, a potência elétrica (P) aumenta com o quadrado da diferença de temperatura.

A Equação (2. 19) mostra que a eficiência do módulo é proporcional a $(T_H - T_L)/T_H$, o que significa que a eficiência do módulo é diretamente afetada pela diferença de temperatura, mas inversamente afetada pela temperatura da superfície quente. Para se obter uma maior potência e eficiência, a superfície quente do TEG tem que ser mantida a uma alta temperatura inferior à sua temperatura limite, enquanto a superfície fria tem que ser mantida a uma temperatura baixa.

2.3 MODO DE OPERAÇÃO

Os geradores termoelétricos (TEGs) são dispositivos de estado sólido que convertem energia térmica diretamente em energia elétrica usando o efeito Seebeck. O TEG é constituído por uma conexão em cascata de vários termopares. O desempenho dos materiais termoelétricos (TE) é fortemente influenciado por três propriedades termoelétricas:

- Coeficiente de Seebeck (α)
- Resistividade elétrica (ρ)
- Condutividade térmica (K).

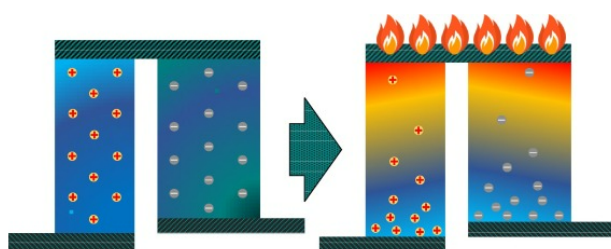
CHAMPIER, D. (2017) descreve que o projeto do TEG é baseado no efeito *Seebeck*, no qual o gradiente de temperatura entre o transportador de corrente elétrica, os semicondutores do tipo P e N, produzem uma diferença de tensão elétrica ΔV .

O semiconductor termoelétrico possui dois componentes principais: tipo P, que contém buracos livres e tipo N, que contém elétrons.

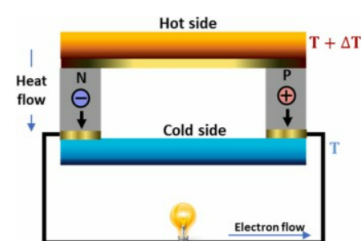
No tipo P, devido ao gradiente de temperatura, os furos se movem do lado quente para o lado frio (baixa densidade de furos para maior densidade), o que causa uma diferença de carga de densidade.

Esta diferença de carga de densidade irá repelir elétrons para o lado quente, conforme ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 Movimento do portador de carga



Fonte: TOHIDI et al (2022)



Fonte: OCHIENG et al (2022)

Durante o estado estacionário, a diferença de densidade de carga será ajustada pela diferença de temperatura. A (F_{em}) gerada através do material, que causa corrente elétrica, é chamada de tensão de Seebeck.

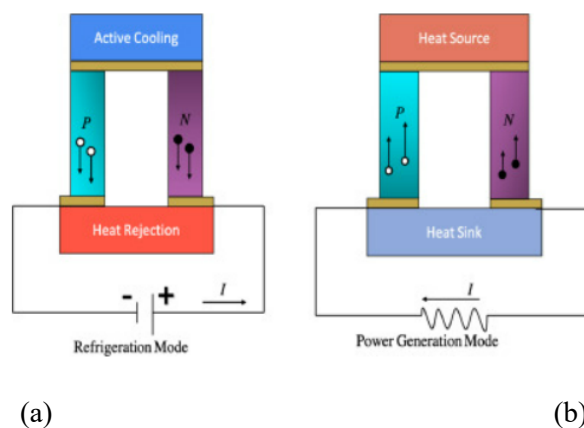
A tensão elétrica ΔV é proporcional a ΔT . Os elétrons se moverão em direção ao lado frio, que fica carregado negativamente, como mostrado na Figura 2.12.

Se os lados quentes estiverem conectados eletricamente e os lados frios ligados por uma carga, uma corrente seria criada e passaria pela carga. Quanto mais alto o fluxo de calor do lado quente para o frio maior será o fluxo de corrente elétrica.

Assim, os módulos termoelétricos podem ser utilizados de dois modos diferentes conforme apresentado na Figura 2.13 :

- I. Modo de geração de energia para produzir eletricidade, chamado gerador termoelétrico (TEG) via efeito *Seebeck*;
- II. Modo de refrigeração para controlar a temperatura, chamado termoelétrico cooler (TEC) e segue o efeito *Peltier*.

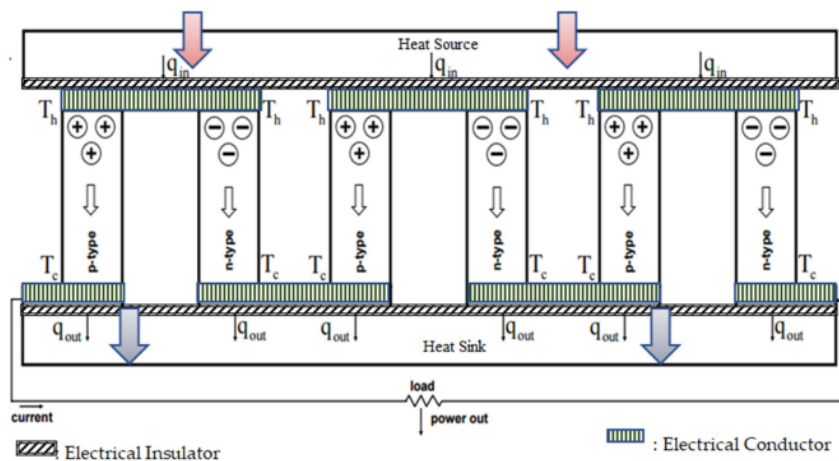
Figura 2.13 (a) Modo TEC de refrigeração (b) Modo TEG de geração de energia



Fonte: JOUHARA et al (2021)

Mais pares do tipo n e p devem ser conectados em série para obter maior tensão de saída, conforme mostrado na Figura 2.14. Esta figura apresenta um módulo termoelétrico, que é formado quando as pernas P e N são conectadas eletricamente em série e termicamente em paralelo. A termoeletrônica elementos dos tipos N e P transportam a corrente, enquanto o par formado pelos dois condutores é chamado de par termoelétrico.

Figura 2.14 Módulo termoelétrico formado por vários termopares



Fonte: ARIDI et al (2021)

2.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO

A simulação da conversão termoeétrica para recuperação dos gases de exaustão de um motor térmico automotivo poderá ser realizada utilizando softwares comerciais disponíveis no mercado tais como ANSYS-CFX, COMSOL, MATLAB-SIMULINK, FLOTHERM, ADVISOR são os mais usados para este propósito.

Os dados de entrada dos modelos de geradores termoeétricos são normalmente obtidos usando um ambiente de simulação de motores de combustão interna (por exemplo, RK-Diesel, AVL Boost, GT-Power etc.) e/ou utilizando-se os dados empíricos de experimentos. O telureto de bismuto (Bi_2Te_3) tem sido o material termoeétrico (TE) mais largamente empregado em aplicações para recuperação de calor dos gases de exaustão de um motor térmico.

De acordo com BURNETE (2022), os resultados de testes de simulação produzem normalmente eficiências maiores do que os cenários de testes do mundo real. São vários os aspectos que resultam nesse benefício aprimorado dos geradores termoeétricos em um ambiente de simulação:

- As propriedades elétricas e térmicas são estimadas com base nos valores médios das pernas do tipo p e do tipo n
- Radiação de calor, folgas de ar entre as pernas do módulo termoeétrico e/ou o efeito Thomson são desprezados,
- Os modelos de módulos termoeétricos são validados em relação aos dados do fabricante sem testes experimentais dos autores;
- A figura de mérito é muitas vezes considerada independente da temperatura, levando a uma superestimação da potência de saída em baixas temperaturas e subestimação em altas temperaturas,
- a pressão de contato (e, portanto, a resistência térmica de contato) é desconsiderada ou considerada constante, resultando em uma superestimativa dos valores de fluxo de calor,
- Para sistemas geradores termoeétricos compostos por vários módulos termoeétricos, a validação é feita para um único módulo e não para o sistema como um todo, desconsiderando as perdas adicionais (devido à distribuição não uniforme de temperatura e, conseqüentemente, gradientes de

temperatura) e requisitos para fornecer a tensão adequada níveis para o sistema de armazenamento e/ou carga,

- as perdas parasitas (contrapressão de exaustão, peso adicional do sistema e/ou componentes auxiliares, eficiência do conversor DC-DC, diferentes saídas de potência dos módulos individuais etc.) associadas ao sistema gerador termoeletrico são negligenciadas ou subestimadas,
- os modelos de simulação geralmente consistem em muitos submodelos que são validados individualmente – em muitos casos, cada submodelo superestima o desempenho e, conseqüentemente, o modelo completo fornece resultados mais otimistas.

CAPÍTULO III - GERADORES TERMOELÉTRICOS AUTOMOTIVO

A conversão de energia térmica diretamente em energia elétrica pelo efeito *Seebeck* apresenta uma ampla gama de aplicações e é conhecida há várias décadas. Este capítulo faz uma síntese das publicações científicas mais relevantes de geradores termoeletricos aplicados à regeneração da energia residual dos gases de exaustão de motores de combustão interna automotivos, procurando estabelecer os principais avanços e limitações para minimamente caracterizar o estado da arte e despertar o interesse da comunidade científica para potenciais nichos de investigação desta tecnologia.

3.1 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA SEEBECK

O interesse no desenvolvimento de tecnologias para melhorar a eficiência de conversão de geradores termoeletricos (TEGs) que ainda é considerada muito baixa, em especial para recuperação de energia residual de processos industriais e comerciais, tem se intensificado nos últimos anos.

A utilização da tecnologia de conversão de energia termoeletrica tem aumentado substancialmente nas últimas décadas devido à crescente demanda por produtos não poluentes e fontes de energia renováveis.

Muitos pesquisadores preveem que as necessidades dos recursos energéticos num futuro próximo poderão ser atendidas com maior intensidade através da conversão termoeletrica, em razão dos constantes avanços na obtenção dos materiais semicondutores com maiores figuras de mérito “ZT”, mediante dopagem de elementos químicos em escala nanométrica por processos tecnológicos de vanguarda.

Neste contexto, nos últimos anos o setor automotivo tem despertado grande interesse com pesquisas para desenvolvimento de tecnologias competitivas e confiáveis de recuperação de uma parcela da energia residual existente nos gases de exaustão do motor de combustão interna, que é lançado na atmosfera produzindo enorme impacto no meio ambiente. De acordo com BURNETE et al (2022), HE et al (2015), OLIVEIRA (2015) e SAIDUR (2012), o motor de combustão interna possui duas importantes fontes de rejeição de calor que representam aproximadamente 65–70% da energia de entrada, sendo

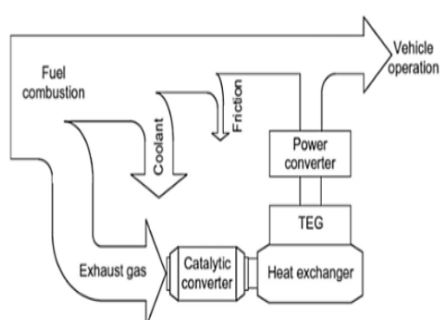
aproximadamente 35–40% desperdiçado através dos gases de exaustão e cerca de 30% através do sistema de arrefecimento.

Para estes pesquisadores, a recuperação parcial da energia contida nos gases de exaustão contribui para aumentar a eficiência térmica do motor. Os geradores termoeletricos (TEGs) em comparação a outros métodos de recuperação de calor dos gases de exaustão (ciclo Rankine orgânico, turbocompressor etc.), apresentam várias vantagens:

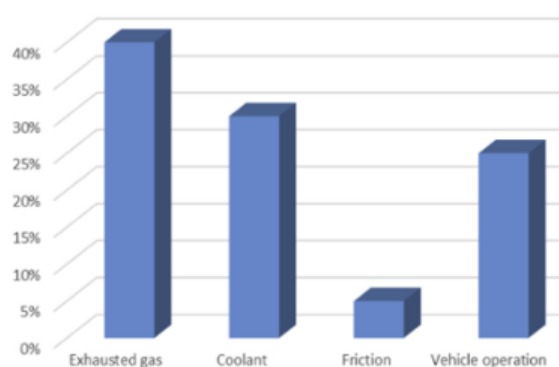
- Menor impacto ambiental;
- Não possuem partes móveis;
- Baixo nível de vibração ou ruído;
- Sem fluidos de trabalho;
- Alta confiabilidade e baixa manutenção;
- Ampla faixa de operação em condições transientes de temperatura;
- Conversão direta de energia térmica em energia elétrica.

Na Figura 3.1, extraída de HE et al. (2015) e SAIDUR (2012), é apresentado um balanço de energia de um motor de combustão interna onde se pode observar em termos percentuais o grande desperdício de energia calorífica através dos sistemas de exaustão e do sistema de arrefecimento do motor.

Figura 3.1 (a) Diagrama de energia (b) Percentual de fluxos de energia típicos de motores de combustão interna.



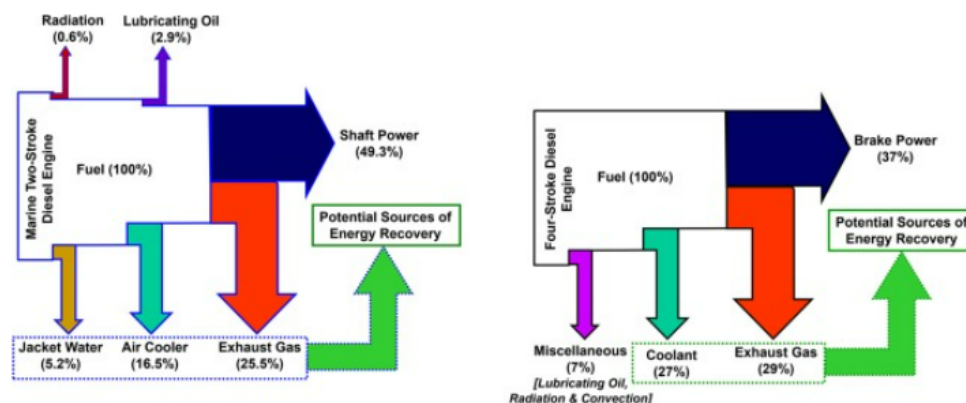
Fonte: SAIDUR (2012)



Fonte: HE et al (2015)

A Figura 3.2 de SAHA et al (2023), mostra um sistema típico de recuperação de energia dos gases de exaustão de um motor térmico que utiliza a tecnologia de gerador termoelétrico.

Figura 3.2 Diagramas de energia e potencial de recuperação de energia de motor diesel marítimo de 2 e 4 tempos



Fonte: SAHA et al (2023)

De acordo com OLIVEIRA (2015), mesmo com toda a evolução tecnológica dos motores automotivos, a realidade é que quase 70% da energia química de combustível liberada é involuntariamente desperdiçada na forma de calor. Isso representa aproximadamente o dobro da potência mecânica usada para propulsão de um veículo automotivo, sendo majoritariamente o calor rejeitado através do sistema de exaustão e de arrefecimento do motor de combustão interna.

Para este pesquisador, aproximadamente 1/3 do conteúdo de energia do combustível é usado para energia mecânica, enquanto 2/3 são desperdiçados através dos sistemas de exaustão e arrefecimento em partes aproximadamente iguais.

Para LAN (2018), a indústria automotiva impõe cada vez mais metas rigorosas em relação às emissões de gases com efeitos estufa e outros poluentes. Os gases de exaustão de um automóvel apresentam alto grau de exergia que favorece sua recuperação, devido à sua elevada temperatura. Esta energia térmica pode ser convertida diretamente em eletricidade pelo efeito *Seebeck* com o uso de módulos termoelétricos.

A presente proposta de tese de doutorado tem como premissa inovadora o estudo experimental em escala de laboratório de desenvolvimento de um gerador termoelétrico de efeito *Seebeck* com permutador de calor com aletas internas e minicanais corrugados para recuperação da energia dos gases de exaustão de um motor térmico automotivo.

Para tanto, será essencial para o êxito da pesquisa o uso de modernas ferramentas de modelagem, simulação numérica, seleção criteriosa dos módulos termoeletricos com altos valores da figura de mérito (ZT), além do emprego de técnicas avançadas em *design*, dimensionamento e fabricação de componentes, automação e análise de performance do protótipo de TEG proposto.

O projeto do permutador de calor da fonte quente do TEG tem como prioridade a maximização da área efetiva de transferência de calor e intensificação da turbulência dos gases quentes em contato com as paredes do equipamento e será confeccionado com materiais de alta condutibilidade térmica.

O projeto do permutador de calor da fonte fria do TEG tem como propósito intensificar a dissipação de calor podendo ser arrefecido com água ou mistura de água +nanofluido no intuito de reduzir a potência de bombeamento do fluido térmico necessária para extração do excesso de calor dos módulos termoeletricos. (DE OLIVEIRA (2018))

A inserção da cogeração em um motor térmico automotivo, com uso de geradores termoeletricos (TEGs) para recuperação da energia residual dos gases de exaustão e a produção direta de energia elétrica, constitui-se em uma opção muito atraente de melhoria da eficiência, redução do consumo de combustível, além de contribuir para obtenção de menores índices de emissões de CO_2 .

Entretanto, para que a conversão de energia termoeletrica por meio de TEGs seja exequível, economicamente viável e competitiva em relação às tecnologias convencionais, é necessário melhorar a eficácia de todos os dispositivos que compõe o sistema de TEG. Isto é, a seleção de materiais termoeletricos de TEGs com alta figura de mérito não é condição suficiente para garantir a alta eficiência de conversão termoeletrica.

É necessário também, o desenvolvimento de um gerador termoeletrico em que o projeto termoeletrico, o dimensionamento e o design de seus constituintes possam favorecer as transferências de calor entre as fontes quente (gases de exaustão) e fria (fluido de arrefecimento) e as superfícies de captação do TEG (placas de cerâmica).

FARIA (2016) e FARIAS (2009) comentam que os TEGs de efeito Seebeck trabalham com o princípio termoeletrico convertendo energia térmica diretamente em energia elétrica. Ao comparar com outras tecnologias ambientalmente amigáveis, o TEG apresenta vantagens distintas.

Sua maior vantagem é que não possui partes móveis, o que torna a operação e manutenção simples e menos onerosa. Os TEGs também oferecem outras vantagens

importantes, como o fato de serem extremamente confiáveis, compactos, leves e silenciosos.

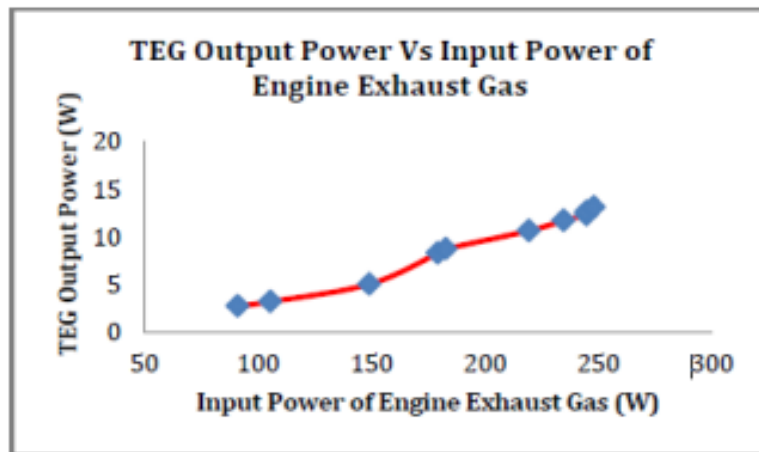
Por todas estas razões, o uso de geradores termoelétricos continuará sendo uma opção muito atraente para recuperação do calor dos gases de exaustão de um motor automotivo.

A Figura 3.3 de GONDANE et al. (2023) mostra que a potência elétrica produzida por um gerador termoelétrico de exaustão automotiva é aproximadamente diretamente proporcional à potência energética dos gases de exaustão de um pequeno motor de 2 tempos a gasolina.

Da análise do gráfico da Figura 3.3 observa-se que quando a potência dos gases energética dos gases de exaustão do motor é 248,03 W, a potência do TEGa é de 10 W, portanto a eficiência geral é de 5,28%

Figura 3.3 Potência gerada por (TEG_a) *versus* potência disponível nos gases de exaustão do motor de combustão interna de 2 tempos

TEG Output Power Vs Input Power of Exhaust Gas



Fonte: GONDANE et al. (2023)

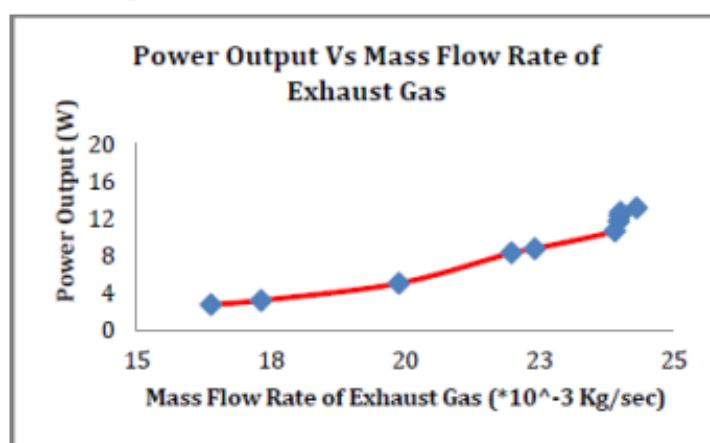
A Figura 3.4 de GONDANE et al. (2023) apresenta a relação quase que diretamente proporcional entre a potência elétrica produzida por um gerador termoelétrico de exaustão automotiva e a vazão mássica dos gases de exaustão de um pequeno motor de 2 tempos a gasolina.

O gráfico da Figura 3.4 mostra que a potência produzida pelo TEGea é função da vazão em massa dos gases de exaustão. Para vazão mássica dos gases de exaustão de 24,317 Kg/seg., a potência desenvolvida pelo sistema TEGea é de 10 W.

De acordo com estes pesquisadores, a regeneração do calor residual de um motor térmico envolve a captura e reutilização de calor residual do líquido de arrefecimento (de mais baixa temperatura) ou dos gases de exaustão (fonte de mais alta temperatura) e que pode ser disponibilizado para aquecimento ou para produção de trabalho mecânico ou elétrico.

Figura 3.4 Potência gerada por (TEGea) *versus* potência disponível nos gases de exaustão do motor de combustão interna de 2 tempos

Power Output Vs Mass Flow Rate of Exhaust Heat Gas



Fonte: GONDANE et al. (2023)

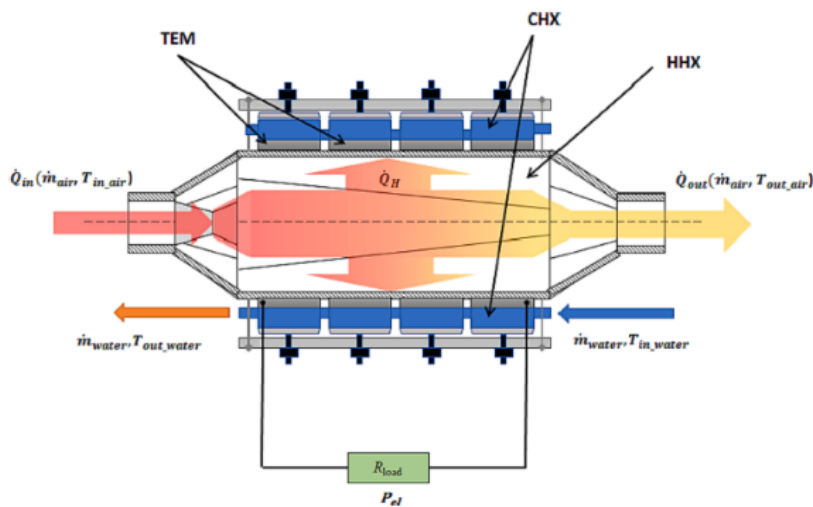
Neste contexto, a instalação de geradores termoelétricos (TEG) no sistema de arrefecimento e/ou no sistema de exaustão de um motor de combustão interna alternativo (a pistão) ou rotativo (turbina a gás) para recuperação de energia residual resulta no funcionamento do motor no modo de cogeração induzindo à melhoria no desempenho, economia de combustível e redução das emissões do motor.

GONDANE et al. (2023) relatam ainda que em veículos pesados, os gases NO_x provenientes da exaustão do motor constituem uma grande preocupação relativamente ao efeito estufa. Com o uso de TEGea a temperatura dos gases de exaustão tende a reduzir, e, por conseguinte, a formação de gases NO_x será minimizada.

3.2 BALANÇO DE ENERGIA EM UM TEGea

A Figura 3.5 mostra o diagrama esquemático de um gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEG_{ea}) em que os módulos termoeletricos (TEM) são instalados entre o permutador de calor da fonte quente (HHX) e o permutador de calor da fonte fria (CHX), respectivamente. (WOJCIECHOWSKI et al. (2022))

Figura 3.5 Diagrama esquemático de um gerador termoeletrico de exaustão automotiva com ilustração dos balanços de fluxos de energia e massa no volume de controle do TEG_{ea}.



Fonte: Adaptado de WOJCIECHOWSKI et al. (2022)

O projeto típico de um gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEG_{ea}) compreende um permutador de calor da fonte quente (HHX) que captura a energia residual dos gases de exaustão do motor térmico e um permutador de calor da fonte fria (CHX) que remove o excesso de calor dos módulos termoeletricos e é resfriado pelo líquido do sistema de arrefecimento do motor de combustão interna.

A temperatura do gás de entrada (T_{in-air}) e o fluxo mássico ($\dot{m}_{ar}$) transportam o calor (Q_{in}) que entra no permutador de calor da fonte quente HHX que está exposto. Neste dispositivo, o fluxo de calor (Q_{in}) é dividido no fluxo de calor (Q_H) absorvido pelas aletas internas do HHX, e pelo fluxo de calor expelido (Q_{out}) com o fluxo de gases de escape.

Os módulos termoeletricos (TEM) do (TEG_{ea}) transformam uma fração do fluxo de calor capturado em energia elétrica (P_{el}) que é direcionado para uma carga elétrica externa com resistência (R_{load}).

O calor excedente que atravessa os módulos termoeletrônicos é absorvido pelo permutador de calor da fonte fria (CHX), aumentando a temperatura do agente líquido de resfriamento (a água) de (T_{in_water}) para (T_{out_water}) .

A eficácia do permutador de calor da fonte quente (HHX) do sistema TEGea pode ser expressa pela Equação 3.1 como:

$$\varepsilon_{HHX} \cong \frac{\dot{Q}_{in_air} - \dot{Q}_{out_air}}{\dot{Q}_{in_air}} = \frac{T_{in_air} - T_{out_air}}{T_{in_air}} \quad (3.1)$$

A eficiência dos módulos termoeletrônicos η_{TEM} , bem como a eficiência do permutador de calor da fonte quente ε_{HHX} , tem influência direta na eficiência η_{TEG} do TEGea, podendo ser determinada pela Equação 3.2:

$$\eta_{TEG} = \eta_{TEM} \hat{A} \cdot \varepsilon_{HHX} \cong \frac{P_{gen}}{\dot{Q}_H} \cdot \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_{in_air}} = \frac{P_{gen}}{\dot{Q}_{in_air}} \quad (3.2)$$

Este parâmetro é o indicador mais comum de energia residual convertida, embora o benefício real para o usuário seja visto apenas quando se leva em conta as necessidades operacionais do próprio TEG:

$$P_{net} = P_{gen} - P_{loss} \quad (3.3)$$

O parâmetro (P_{loss}) da Equação 3.3 é a potência necessária para abastecer os equipamentos auxiliares do TEG: bombas, ventiladores, sopradores ou compressores que compensam as quedas de pressão Δp_i de fluidos em ambos os tipos de permutadores de calor do TEGea:

$$P_{loss} = \sum \Delta p_i \cdot \dot{V}_i \quad (3.4)$$

A Equação 3.5 expressa a eficiência líquida η_{net} resultante do gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEG_{ea}) e é definida como a razão entre a potência líquida gerada P_{net} e a energia residual $\dot{Q}_{in}$ dos gases de exaustão:

$$\eta_{net} = \frac{P_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (3.5)$$

3.3 APLICAÇÕES DE TEGs AUTOMOTIVOS

BURNETE et al (2022) descrevem que a baixa eficiência de geradores termoeletricos automotivos (TEGs-A) e a dificuldade de soluções eficientes para a recuperação do calor residual dos gases de exaustão de um motor de combustão interna deve-se em grande parte à distribuição não uniforme da temperatura, às grandes dimensões dos TEGs-A e ao impacto negativo na operação do motor térmico decorrente contrapressão na tubulação de exaustão com o aumento da eficiência do trocador de calor de alta temperatura.

De acordo com BURNETE et al (2022) e SAJID et al (2017) a eficiência global do TEG é fortemente influenciada pela qualidade do material dos módulos termoeletricos (maior figura de mérito) e pela capacidade de extração de calor do permutador de calor da fonte quente.

Assim, esforços em pesquisa devem ser intensificados nessa direção de modo que o TEG-A possa maximizar a captação de calor e a conversão termoeletrica para recuperação da energia dos gases de exaustão do motor térmico.

Além disso, vários fatores devem ser considerados ao escolher a posição de instalação do sistema TEG-A na tubulação de exaustão do motor térmico:

- ✓ Garantir o máximo desempenho possível do sistema (temperatura e vazão mássica devem ser consideradas),
- ✓ Limitações de espaço (dependendo do local de instalação),
- ✓ Projeto do sistema de refrigeração (dependendo do tipo de fluido de refrigeração),

- ✓ Evitar danos ao gerador termoeletrico por exposição a altas temperaturas e
- ✓ Mitigar o efeito negativo do sistema TEG no desempenho do motor de combustão interna e nos dispositivos de pós-tratamento.

A natureza variável da operação de um motor térmico (diesel ou Otto) gera flutuações frequentes nas temperaturas e na vazão mássica dos gases de exaustão e por conseguinte, a temperatura no lado quente dos elementos dos geradores termoeletricos varia constantemente.

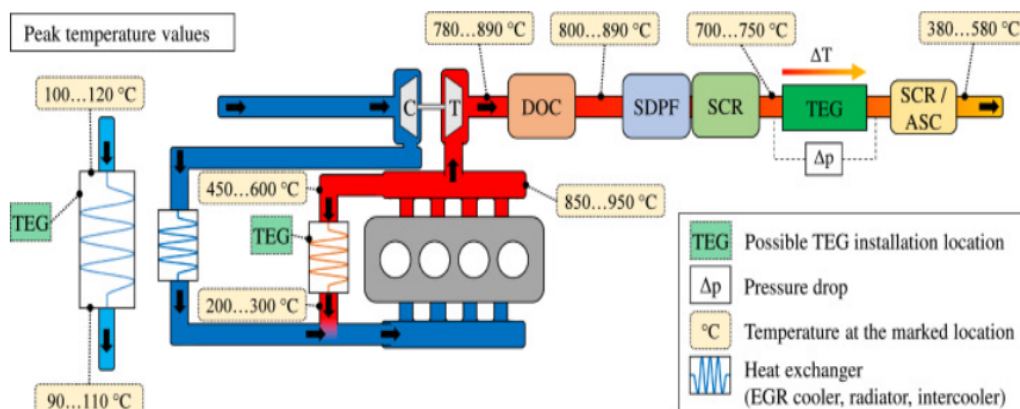
Daí surgem dois problemas:

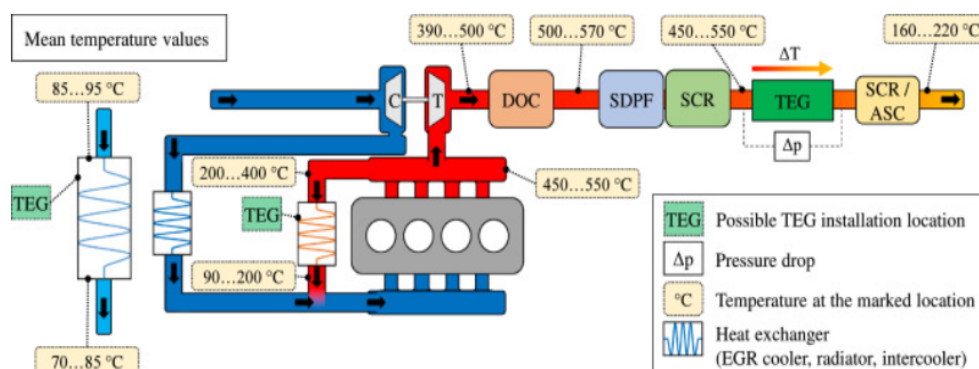
- A flutuação da energia gerada pelo TEG-A que pode ser solucionado através da utilização de algoritmo de controle;
- Em regimes de altas cargas do motor, a temperatura dos gases de escape pode exceder o limite máximo do TEG-A,; este problema pode ser resolvido utilizando recursos de by-pass dos gases quentes, tubos de calor (*heat pipe*) ou ainda armazenamento térmico de mudança de fase (pcm).

A Figura 3.6 extraída de BURNETE et al (2022) mostra as possibilidades de instalação de geradores termoeletrico em veículos com motores diesel ou a gasolina.

Os TEGs podem ser aplicados para recuperação da energia residual do fluido do sistema de arrefecimento do motor ou para recuperação da energia residual dos gases de exaustão do motor.

Figura 3.6 Exemplos de instalação de TEGs na tubulação de exaustão de motores de ignição por compressão (diesel). (a) valores de picos de temperatura (b) valores médios de temperatura

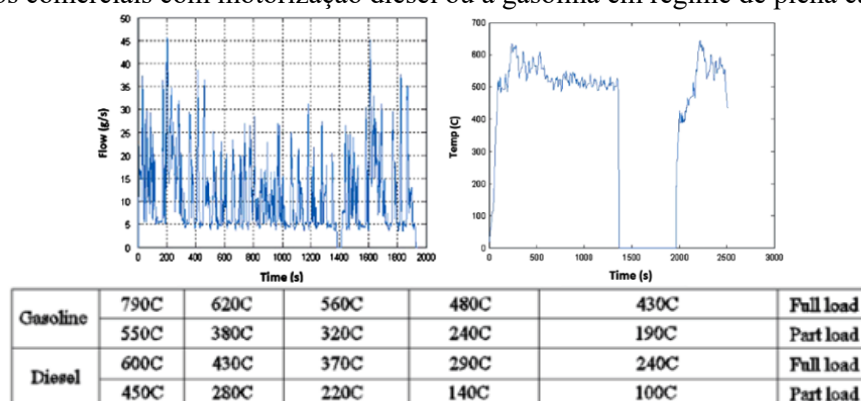




Fonte: BURNETE et al (2022)

A Figura 3.7 apresenta valores típicos de temperatura e vazão mássica dos gases de exaustão de veículos comerciais com motorização diesel ou gasolina.

Figura 3.7 Valores típicos de temperatura e vazão mássica dos gases de exaustão de veículos comerciais com motorização diesel ou a gasolina em regime de plena carga



Fonte: Adaptado de ZHENG et al (2014)

3.4 APLICAÇÃO E PERFORMANCE DE TEGs AUTOMOTIVOS

Os testes de desempenho de geradores termoelétricos automotivos (TEGs-A) de recuperação da energia dos gases de exaustão são geralmente realizados por três métodos diferentes:

- (i) bancada de teste construída em laboratório com ar (gás) aquecido como fonte de calor
- (ii) bancada de teste em laboratório em dinamômetro com motor a gasolina ou diesel

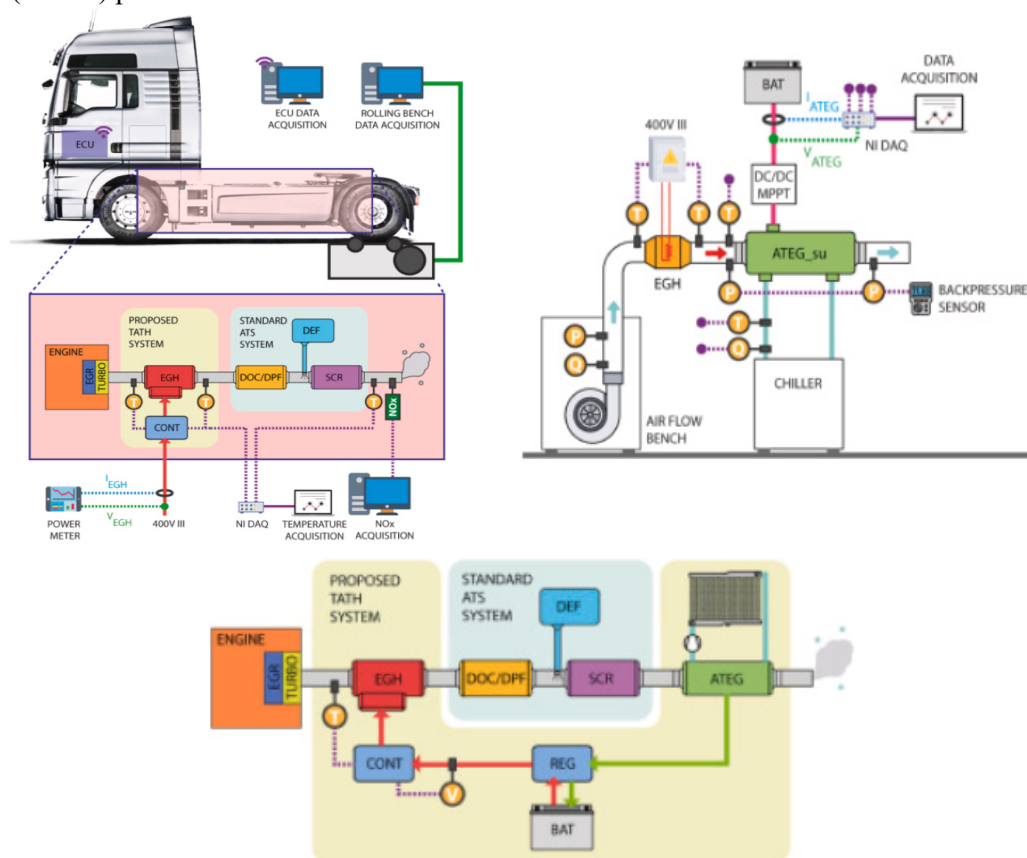
- (iii) teste em ciclo de condução (estrada ou urbano) com veículo automotivo.

A maioria dos testes de desempenho de TEGs-A encontrados na literatura especializada tem sido realizado pelo primeiro ou segundo métodos.

Os testes em ciclo de condução com veículo automotivo são menos frequentes, mas se tem uma avaliação mais realista da viabilidade tecnológica e comercial.

A Figura 3.8 de XIMINIS et al (2022) apresenta estudo experimental de um aquecedor de pós tratamento termoeletrico (TATH) para reduzir as emissões de NO_x em regimes de baixa exigência de veículos pesados movidos a diesel (HDV).

Figura 3.8 Sistema para motores diesel com TEGe e aquecedor elétrico autônomo (TATH) para controle do NO_x.



Fonte: XIMINIS et al (2022)

Este sistema é composto por um *Exhaust Gas Heater* (EGH) que aquece os gases de escape em regimes baixos do motor, de forma a diminuir o tempo de injeção de ureia. Além disso, o TATH é alimentado por um gerador termoelétrico automotivo (TEG-A) que converte o calor residual dos gases de exaustão em eletricidade, para que o sistema possa funcionar energeticamente autônomo.

Os resultados demonstram que o uso de um TATH reduz as emissões de NO_x em até 97,2% em um MAN Euro VI TGX 18.480 de longo curso movido a diesel e pode ajudar a cumprir a regulamentação EURO VII.

Além disso, também está demonstrado que um TEG-A pode produzir a energia exigida pelo EGH em um perfil de missão de longa distância. No entanto, o peso adicionado e a contrapressão causada pelo TATH devem aumentar o consumo de combustível do veículo em 0,35%.

A Tabela 3.1 apresenta a geração líquida de energia do protótipo testado em diferentes condições reais.

Tabela 3.1 Performance de gerador termoelétrico de exaustão automotiva em diferentes regimes de condução do veículo: suburbano, interurbano ou autoestrada.

CONDIÇÃO DE CONDUÇÃO	Velocidade do veículo	Tempo*	Temperatura de entrada ATEG (°C)	Taxa de fluxo de massa de entrada ATEG _{su} (kg/s)	ATEG _{su} energia gerada (W)	Energia ATEG gerada (W)	Potência da bomba hidráulica (W)	Geração de energia líquida ATEG P_{ATEG} (C)
SUBURBANO	55 km/h (1000 rpm)	1,5% (4 min)	162	0,025	23	138	20	118
INTERURBANO	68 km/h (1250 rpm)	0% (0 min)	225	0,028	34	204	20	184
AUTOESTRADA	82 km/h (1500 rpm)	98,5% (262 min)	210	0,035	53	318	20	298

Fonte: ZHENG et al (2014)

CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como finalidade apresentar os materiais e métodos que foram utilizados na investigação. Com este propósito, são descritos os principais procedimentos e materiais empregados no desenvolvimento e na avaliação da performance do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva com permutador de calor de aletas e minicanais corrugados.

A investigação desenvolvida é de natureza aplicada, podendo ser ainda caracterizada, quanto aos seus objetivos, como sendo exploratório-descritiva. Foi explorado o problema com vistas a construir uma hipótese e foi descrito o comportamento de protótipo através de observação sistemática. Quanto à abordagem do problema, caracteriza-se como uma pesquisa quantitativa, já ponto de vista dos seus procedimentos técnicos junta características de uma pesquisa-ação e experimental.

A pesquisa-ação/experimental foi escolhida devido ao seu caráter pragmático do trabalho recheado de variáveis e formas de controle capazes de influenciar o comportamento. Diante desse contexto, o método adotado que serviu de base lógica à investigação científica foi, predominantemente, dedutivo.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE TEGea

O protótipo do gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) objeto desta pesquisa foi desenvolvido em várias fases conforme mostra a Figura 4.1. A seguir serão descritas com maior riqueza de detalhes cada uma das fases de desenvolvimento do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea).

Figura 4.1. Fluxograma das fases de desenvolvimento do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) proposto na pesquisa

Fase 1	Simulação do TEGea
Fase 2	Seleção dos TEMs
Fase 3	Projeto do HHX
Fase 4	Seleção dos CHXs
Fase 5	Testes de componentes: rugosidade, MEV, EDS e termografia
Fase 6	Testes de performance do protótipo de TEGea
Fase 7	Análise comparativa das configurações do protótipo de TEGea

Fonte: Autor

O protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) proposto nesta pesquisa consiste dos seguintes componentes básicos: permutador de calor da fonte quente, módulos termoelétricos e permutador de calor da fonte fria.

4.1.1 Simulação do TEGea

De acordo com LUO et al (2021), LUO et al (2020) e LUO et al (2019), a simulação de fenômenos físicos é a representação mais simplificada de um processo ou sistema do mundo real. Nas simulações são utilizados modelos que representam as principais características ou comportamentos do sistema ou processo selecionado.

Neste contexto, a presente pesquisa aborda a simulação numérica em regime permanente de desempenho um gerador termoelétrico de exaustão automotiva alicerçada na modelagem fluido-térmico-elétrica (M-FTE) dos seus domínios físicos. (LUO et al 2023) e (LUO et al 2022)

Com o propósito de aumentar o desempenho do gerador termoelétrico automotivo, pesquisadores utilizaram o modelo numérico M-FTE para otimização das dimensões da aleta no canal de escoamento dos gases de exaustão do trocador de calor. (YANG et al. 2023)

O gerador termoelétrico de exaustão automotiva envolve acoplamento do campo multifísico que inclui o campo de escoamento de gases de exaustão e líquido de arrefecimento, o campo térmico de todo o sistema e o campo elétrico de pernas termoelétricas, eletrodos de cobre e resistência à carga. (LUO et al 2019-b), (LUO et al 2019-c) e (LUO et al 2019-d)

O calor é transferido dos gases de exaustão para o permutador de calor do lado quente, módulos termoelétricos, permutador de calor do lado frio e, finalmente, dissipado pelo líquido de arrefecimento. Alimentados pela diferença de temperatura, os módulos termoelétricos geram eletricidade. Ao mesmo tempo, o calor parasita gerado pelo fluxo de corrente elétrica afetará a transferência de calor e o escoamento dos fluidos, e esses efeitos de acoplamento ocorrem simultaneamente.

Portanto, o campo de fluxo, o campo térmico e o campo elétrico devem ser calculados simultaneamente para garantir a razoabilidade dos resultados numéricos. O modelo M-FTE baseia-se nas seguintes pré-condições:

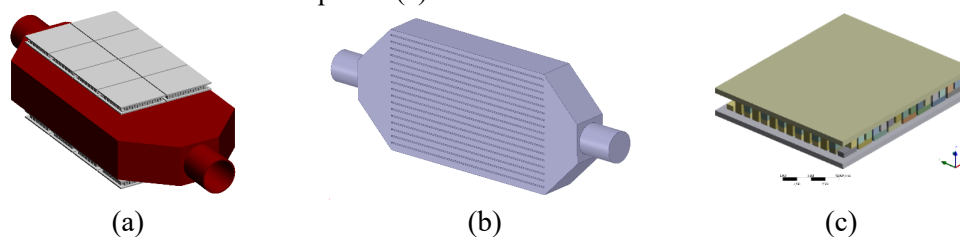
- I. calor da radiação é ignorado;
- II. Os materiais termoelétricos são isotrópicos;

III. efeito da gravidade é desprezado.

A metodologia para previsão da performance do gerador termoelétrico automotivo proposto, compreende basicamente a geração do modelo 3-D dos componentes do protótipo, discretização e geração da malha, inserção das condições de contorno, aplicação das equações do modelo M-FTE e acoplamento do submodelo CFD fluido-térmico com submodelo térmico-elétrico no software ANSYS.

Inicialmente foi realizada a modelagem 3-D do gerador termoelétrico (Figura 4.2-a) proposto na pesquisa que compreende basicamente um permutador de calor (Figura 4.2-b) fabricado de alumínio e contendo aletas internas para intensificação da captação de calor, módulos termoelétricos (Figura 4.2-c) a base de telureto de bismuto e permutador de calor (dissipadores) com refrigeração à água.

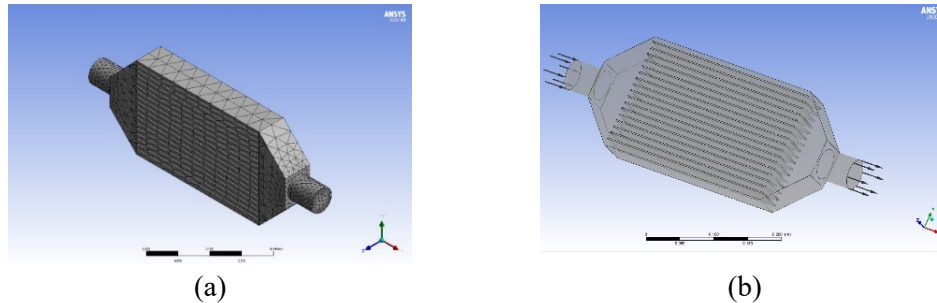
Figura 4.2 Modelos 3-D: (a) Gerador termoelétrico de exaustão automotiva (b) Permutador de calor da fonte quente (c) Módulo termoelétrico



Fonte: BARBOSA JÚNIOR et al (2023)

Na etapa seguinte, o permutador de calor do gerador termoelétrico proposto foi discretizado pelo método dos elementos finitos utilizando-se malha triangular e refinamento de malha do tipo “*inflator*” nos contornos do modelo (Figura 4.3-a), para otimização do tempo de convergência e de processamento da solução numérica. A Figura 4.3-b ilustra as condições de contorno do modelo fluido-térmico aplicada ao permutador de calor do gerador termoelétrico de exaustão automotiva.

FIGURA 4.3 (a) Malha do permutador de calor da fonte quente (b) Condições de contorno do modelo fluido-térmico



Fonte: BARBOSA JÚNIOR et al (2023)

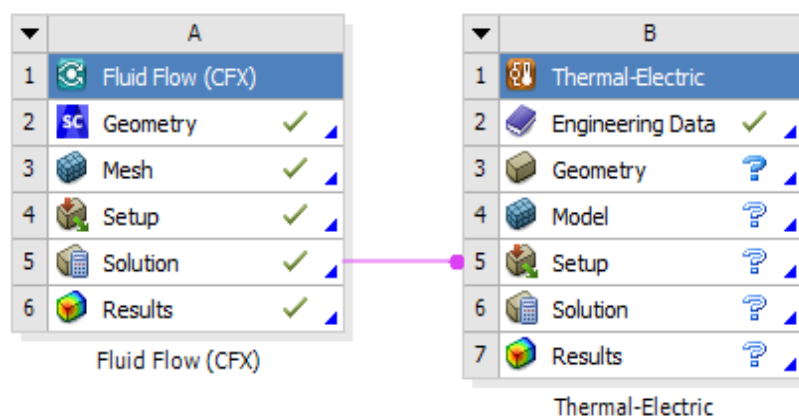
O modelo multifísico M-FTE do ANSYS utilizado na simulação da performance do gerador termoeletrônico proposto nesta pesquisa é tridimensional, regime permanente e apresenta escoamento turbulento.

Na simulação numérica, o ar atmosférico escoando com diferentes temperaturas e vazões de entrada foi a fonte de calor em substituição aos níveis térmicos característicos dos gases de exaustão na tubulação de exaustão de um motor de combustão interna.

Também foi especificada a temperatura de entrada do líquido de arrefecimento para dissipação do excesso do calor que atravessa os módulos termoeletrônicos.

A Figura 4.4 mostra o acoplamento do submodelo fluido-térmico (CFX) com o submodelo térmico-elétrico.

FIGURA 4.4. Acoplamento no software ANSYS dos submodelos fluido-térmico e térmico-elétrico



Fonte: BARBOSA JÚNIOR et al (2023)

4.1.2 Seleção dos módulos termoeletrônicos

Os módulos termoeletrônicos (TEMs) do gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) proposto nesta pesquisa foram selecionados considerando os seguintes fatores:

- Figura de mérito (ZT)
- Potência elétrica nominal
- Dimensões básicas (CxLxA)
- Intervalo de temperatura das fontes quente e fria
- Custo de aquisição

Considerando estes critérios foram inicialmente pré-selecionados os módulos termoeletrônicos da Tabela 4.1 à base de telureto de bismuto HZ-2, HZ-14, HZ-14HV e HZ-20HV do fabricante Hi-Z TECHNOLOGY.

Tabela 4.1 Módulos termoeletrônicos da Hi-Z technology

Ficha Técnica	Compre Agora!	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Alimentação Contínua	Potência Máxima	Tensão de circuito aberto	Quantidade (1 - 50) *
HZ-2	Adicionar ao Carrinho	29.21	29.21	5.08	2.3	4.0	6.1	\$30.00
HZ-14	Adicionar ao Carrinho	62.74	62.74	5.08	14.0	25.0	3.1	\$50.00
HZ-20HV	Adicionar ao Carrinho	74.50	68.00	5.00	20.0	36	10.8	\$70.00
HZ-14HV (80% de potência)	Adicionar ao Carrinho	61.05	71.05	7.87	11.2	20	6.4	40.00

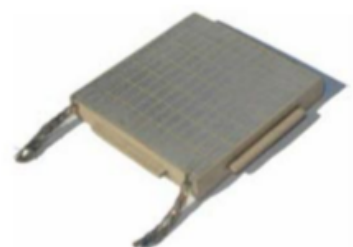
Fonte: <https://hz-technologies.com>

Os módulos termoeletrônicos HZ-20HV foram descartados em razão do maior custo unitário, sendo adquiridos para esta pesquisa os módulos termoeletrônicos HZ-2, HZ-14 e HZ-14HV respectivamente.

Os módulos termoeletrônicos HZ-2 da Figura 4-5 que apresentam menor custo é capaz de gerar até 4W de potência elétrica, tendo sido somente utilizado em testes preliminares para avaliação prévia de sua resposta em termos de produção de energia elétrica para

diferente gradiente de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria.

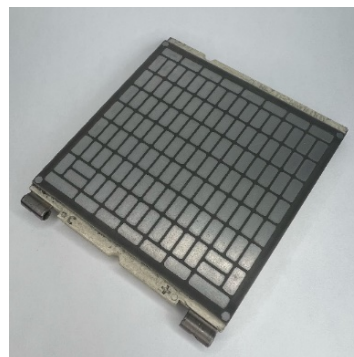
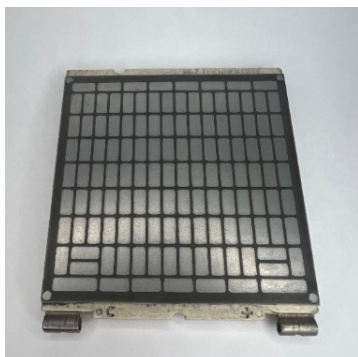
Figura 4.5 Módulo termoeétrico Hz-2 do fabricante Hi-Z technology



Fonte: <https://hz-technologies.com>

Os módulos termoeétricos HZ-14HV da Figura 4.6 que apresentam excelente capacidade de produção de energia elétrica foram pré-selecionados e adquiridos para ensaios do protótipo do gerador termoeétrico de exaustão automotiva (TEGea) proposto nesta pesquisa.

Figura 4.6 Módulo termoeétrico Hz-14HV do fabricante Hi-Z technology



Fonte: Autor

Em razão de sua densidade tecnológica, o módulo termoeétrico HZ-14 da Figura 4.7 que apresenta boa capacidade de produção de energia elétrica também foi pré-selecionado para ensaios do protótipo do gerador termoeétrico de exaustão automotiva (TEGea) proposto nesta pesquisa.

O módulo termoeétrico HZ-14HV selecionado para testes no protótipo de TEGea contém 49 termopares semicondutores à base de telureto de bismuto que estão dispostos eletricamente em série e termicamente em paralelo.

Figura 4.7 Módulo termoeletrico Hz-14 do fabricante Hi-Z technology



Fonte: Autor

Os módulos termoeletricos da Hi-Z technology pré-selecionados nesta pesquisa são constituídos de semicondutores à base de Telureto de Bismuto e conferem alta eficiência em altas temperaturas de calor residual, bem como alta resistência capaz de suportar aplicações robustas.

De acordo com o fabricante Hi-Z technology, os condutores metálicos que integram os módulos termoeletricos HZ-14HV e HZ-14V permitem a operação continuamente em temperaturas tão altas quanto 250°C (480F) e intermitentemente até 450°C (750F) sem ocorrência de degradação do módulo.

A Figura 4.8 apresenta os lados quente e frio do módulo termoeletrico HZ-14HV que foi selecionado para o gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEG_{ea}) da presente pesquisa.

Figura 4.8 Módulo termoeletrico Hz-14HV do fabricante Hi-Z technology (a) Lado frio (b) Lado quente



(a)

(b)

Fonte: Autor

4.1.3 Projeto e desenvolvimento do permutador de calor da fonte quente

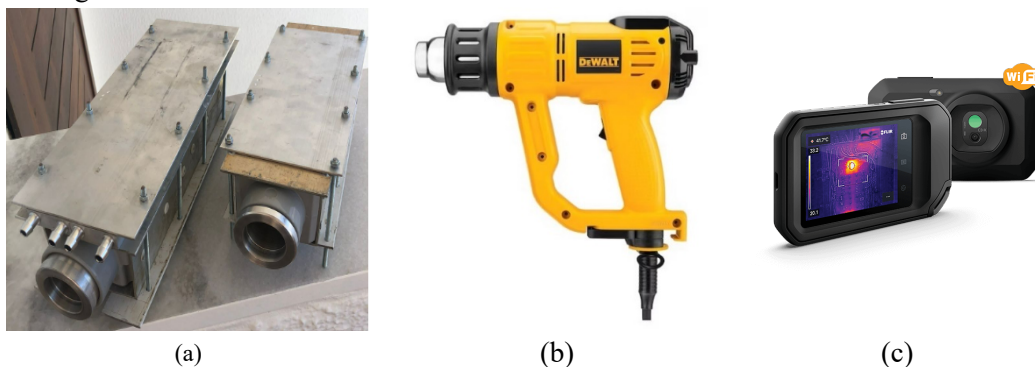
O projeto do permutador de calor da fonte quente (HHX) com aletas internas e minicanais paralelos ao fluxo de ar quente no canal de escoamento foi idealizado e desenvolvido a partir da simulação numérica no software ANSYS com o modelo multifísico fluido-térmico-elétrico (M-FTE) e testes experimentais com diferentes dissipadores aletados comerciais de alumínio.

Para avaliação e definição das dimensões básicas do permutador de calor da fonte quente (HHX) e das aletas internas no canal de escoamento de ar quente, após a etapa inicial de simulação foram realizados testes experimentais comparativos considerando os critérios de temperatura máxima da superfície quente em contato com os módulos termoeletrônicos, inércia térmica (taxa de aquecimento e/ou resfriamento) e distribuição de temperaturas na superfície quente.

Para tanto, foi construído inicialmente 02 protótipos de permutadores de calor da fonte quente (Figura 4.9) de seção transversal retangular para escoamento do ar quente e com tampa superior removível para fixação e teste de diferentes aletas comerciais de alumínio. Numa das extremidades do HHX foi incorporado um soprador térmico modelo DEWALT de 2000W da Figura 4.9, para aquecimento do fluxo de ar no intervalo de temperatura de 50°C a 600 °C.

A câmera termográfica da Figura 4.9-c, modelo FLIR C3, foi utilizada para comparação experimental do grau de inércia térmica e visualização preliminar dos gradientes de temperatura na superfície quente, para diferentes aletas internas retangulares em alumínio testadas nos protótipos de HHX.

Figura 4.9 (a) Foto dos 02 primeiros protótipos de HHX (b) Soprador térmico e (c) Câmera termográfica

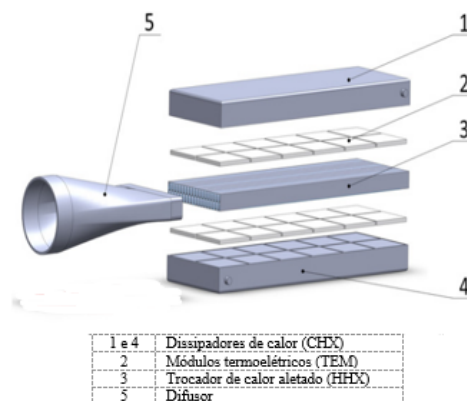


Fonte: Autor

Após testar várias aletas retangulares de alumínio com diferentes dimensões e comparar os perfis de temperatura da superfície quente de contato com os módulos termoeletricos considerando os critérios anteriormente descritos de inércia térmica, temperatura máxima e distribuição de temperatura da superfície quente, foram definidas as dimensões básicas (CxLxA) do permutador de calor de geometria retangular da fonte quente (HHX) e também as dimensões básicas (CxAxEx) e geometria retangular das aletas internas igualmente espaçadas no canal de escoamento de ar quente.

A Figura 4.10 mostra a vista explodida da seção de um gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) típico constituído de 01 permutador de calor da fonte quente, 02 dissipadores de calor ou permutadores de calor da fonte fria, módulos termoeletricos e o difusor (componente que conecta a tubulação de exaustão ao gerador termoeletrico).

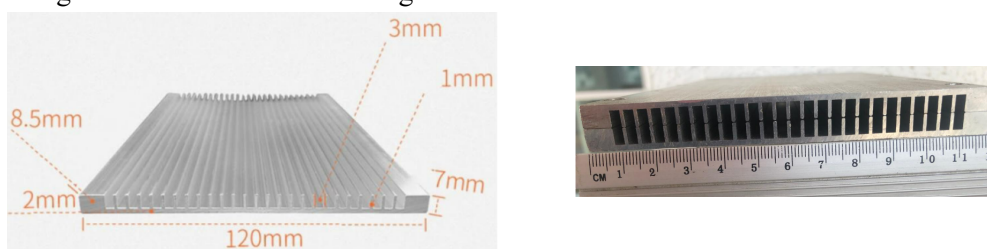
Figura 4.10 Modelo 3-D de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) típico.



Fonte: Adaptado de GAO et al (2012)

As Tabelas 4.2 e Tabelas 4.3 apresentam as características geométricas, topológicas e dimensionais dos três permutadores de calor da fonte quente com aletas internas retangulares sem minicanais (HHX-000) e com minicanais (HHX-150, HHX-150).

Tabela 4.2 Permutador de calor HHX-000 do protótipo de TEGea com aletas internas retangulares sem minicanais corrugados.



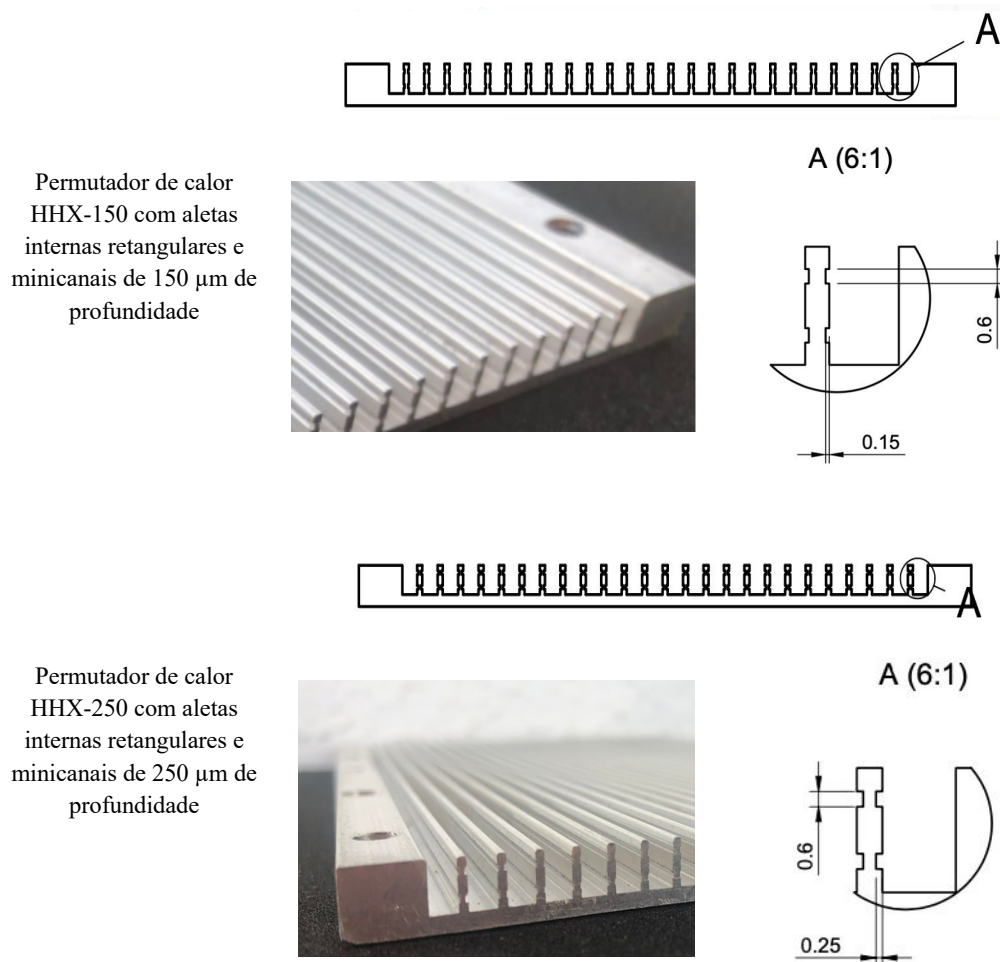
Fonte: Autor

Na etapa seguinte, com o propósito de intensificar a turbulência do escoamento do ar quente na seção do protótipo de TEGea, foi idealizado e usinado em máquina fresadora CNC, 02 minicanais retangulares, horizontais, paralelos ao escoamento de ar quente e espaçados uniformemente em cada face lateral das aletas internas retangulares de alumínio do permutador de calor HHX.

Os minicanais corrugados apresentam profundidade de 150 micrômetros (HHX-150) e de 250 micrômetros (HHX-250) respectivamente e que foram fabricados para testes experimentais em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea).

Estes permutadores de calor HHX-000, HHX-150 e HHX-150 são constituídos por 02 peças iguais unidas por parafusos localizados nas bordas laterais formando o canal de escoamento dos gases quentes no protótipo de TEGea.

Tabela 4.3 Permutador de calor HHX-150 e HHX-250 do protótipo de TEGea com minicanais corrugados para intensificação da turbulência do fluxo de ar aquecido.

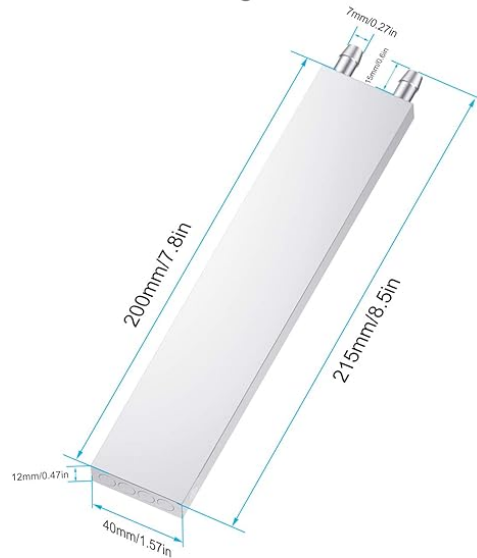


Fonte: Autor

4.1.4 Seleção do permutador de calor da fonte fria

O permutador de calor da fonte fria (CHX) em alumínio apresentado na Figura 4.11, foi selecionado para integrar o protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEG_{ea}) e é constituído por 02 módulos com geometria de um paralelepípedo e com dimensões de 40mm x 120mm x 12mm cada e possui canal interno para circulação de água em contracorrente proveniente de um chiller com temperatura controlada de -20°C a 160°C, para resfriamento e rejeição do excesso de calor que atravessa os módulos termoelétricos.

Figura 4.11 Modelo 3D do módulo comercial em alumínio que compõe o permutador de calor da fonte fria (CHX)



Fonte: adaptado do manual do fabricante DIYhz

Este permutador de calor da fonte fria é um componente importante uma vez que a eficiência do TEGea é fortemente dependente do gradiente de temperatura entre os lados quente e frio dos módulos termoelétricos. Além disso, o controle da temperatura do lado frio garante ainda a integridade estrutural dos módulos termoelétricos do TEGea, proporcionando maior vida útil do dispositivo de conversão termoelétrica.

A superfície externa de um dos lados dos módulos de alumínio que formam o permutador de calor da fonte fria foi polida em máquina fresadora CNC com o intuito de diminuir as asperezas (rugosidade superficial) e, por conseguinte, promover a redução da resistência térmica de contato superficial.

O dimensionamento do trocador de calor da fonte fria foi realizado com base na Equação 4.1 (ÇENGEL (2009) considerando as especificações e números de módulos termoelétricos do TEGea e o canal interno de escoamento de água proveniente de um chiller com temperatura e vazão mássica de entrada controladas.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (4.1)$$

Onde $\dot{Q}$ é a taxa de calor rejeitada, $\dot{m}$ a vazão mássica de água, C_p o calor específico a pressão constante da água e ΔT a diferença de temperatura entre a água de arrefecimento e a

temperatura da superfície fria.

Por razões econômicas e de otimização de tempo de fabricação, uma vez que existia no mercado uma grande variedade de permutadores de calor de alumínio arrefecidos à água com preços relativamente baixos e que atendiam aos requisitos do projeto dimensional do permutador de calor da fonte fria (CHX) para o gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea), fez-se a opção por sua aquisição ao invés da fabricação deste componente.

A Tabela 4.4 apresenta as especificações do permutador de calor da fonte fria (CHX) formado por 02 dissipadores comerciais de alumínio que dispõe de canal interno para circulação da água de arrefecimento.

Tabela 4.4 Especificação do permutador de calor da fonte fria (CHX) do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)

Material	Alumínio
Dimensão nominal (mm)	200x40x12
Diâmetro do canal interno de água (mm)	8
Módulos dissipadores de calor para cada face do HHX	02
Tratamento da superfície externa	Polimento
Fluido de resfriamento	Água

Fonte: Autor

A Figura 4.12 mostra a pré-montagem do permutador de calor da fonte fria (CHX) na estrutura protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) com o fluxo da água de arrefecimento em contra fluxo ao escoamento dos gases de exaustão.

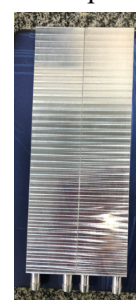
Figura 4.12 (a) Instalação do permutador de calor da fonte fria CHX na estrutura do protótipo de TEGea (b) Acabamento superficial extrudado (c) Acabamento polido.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor

A superfície fria em contato com o módulo termoeletrico tem acabamento polido usinado em fresadora CNC e a superfície oposta apresenta acabamento superficial do alumínio extrudado.

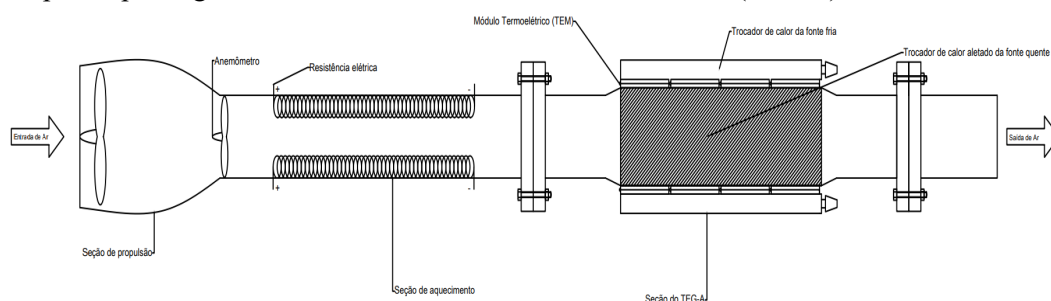
4.2 BANCADA EXPERIMENTAL DE TESTE DO PROTÓTIPO DE TEGea

Neste tópico são descritas as principais características e especificações da bancada experimental instrumentada que foi desenvolvida exclusivamente para avaliação em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) objeto desta pesquisa.

4.2.1 Projeto conceitual da bancada experimental

A Figura 4.13 mostra o projeto conceitual da bancada experimental para teste transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva que compreende basicamente 03 seções.

Figura 4.13 Projeto conceitual da bancada experimental para teste em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)



Fonte: Autor

A primeira seção denominada de “propulsão de ar” tem uma hélice que é acionada por motor elétrico para impulsionar a massa do ar atmosférico aquecido através da seção do TEGea.

A segunda seção tem uma resistência elétrica de aquecimento para simulação da carga térmica ou calor residual existente nos gases de exaustão nos diferentes regimes de funcionamento de um motor de combustão interna

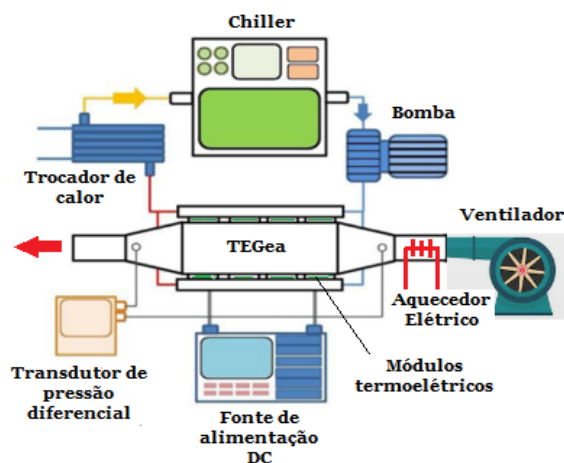
A bancada experimental de teste em regime transiente do protótipo de TEGea, objeto desta pesquisa, é essencialmente um túnel de ar aquecido contendo:

- Seção de propulsão de ar que promoverá o escoamento transiente e turbulento do ar;
- Seção de aquecimento do ar que permitirá variar a intensidade de calor;
- Seção do gerador termoeletrico para produção de energia elétrica contendo trocador de calor dos gases quentes, módulos termoeletricos e dissipadores de calor para o meio ambiente.

4.2.2 Bancada experimental para teste do protótipo de TEGea

A Figura 4.14 apresenta o diagrama esquemático da bancada experimental, em escala de laboratório, que foi desenvolvida para teste em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva com aletas e minicanais, que faz uso de um soprador de ar (ventilador) e uma resistência elétrica de aquecimento para simular a energia residual dos gases de exaustão do motor de combustão interna.

Figura 4.14 Diagrama esquemático da Bancada experimental para teste em regime transiente do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)



Fonte: Adaptado de WOJCIECHOWSKI et al. (2022) e KIM et al (2019)

De concepção simples, a bancada experimental objeto da pesquisa compreende essencialmente um túnel de ar aquecido contendo a seção de propulsão do fluxo de ar, a seção de aquecimento do fluxo de ar e a seção do gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea), conectada à bancada de testes por meio de difusores de entrada e saída que possibilitam a mudança da forma geométrica circular (característica da tubulação de

descarga de um motor de combustão interna) para forma retangular do permutador de calor da fonte quente (HHX) e vice-versa, respectivamente.

A Figura 4.15 mostra a vista parcial da bancada experimental desenvolvida para teste de TEG-a apresenta design original, construção modular e dispõe de recursos de automação, controles e sensores distribuídos estrategicamente na instalação.

Figura 4.15 – Vista parcial da bancada experimental para teste do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)



Fonte: BARBOSA JÚNIOR et al (2024)

A Figura 4.16 apresenta uma vista explodida com os principais componentes da seção de propulsão do ar (carcaça, motor elétrico e turbina com pás) da bancada experimental de teste do protótipo de TEGea.

Figura 4.16 Componentes da seção de propulsão do ar do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)



Fonte: Autor



Na Tabela 4.5 são apresentadas as especificações dos principais componentes da seção de propulsão de ar da bancada experimental para teste do protótipo de TEGea.

Tabela 4.5 – Especificações dos componentes da seção de propulsão de ar do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea)

Turbina com hélices termoplástica	7 pás e diâmetro de 120mm
Motor elétrico de aeromodelo	modelo emax2822
Carcaça do conjunto de propulsão	material termoplástico

Fonte: Autor

O banho termostático da BROOKFIELD modelo TC-550 da Figura 4.17 que dispõe de resistência elétrica para aquecimento com circuito eletrônico microprocessado, sistema de refrigeração por compressão de vapor simples com R134a e com bomba de circulação foi integrado à bancada experimental para resfriamento dos módulos termoeletricos (TEMs) do protótipo do TEGea, de modo a garantir o controle de temperatura da fonte fria e preservar a integridade deste componente.

Este dispositivo permite o controle da temperatura com resolução de 0,1 °C do fluido de arrefecimento (água + aditivo anticongelante) no intervalo de -20 °C a 160°C e da vazão volumétrica de escoamento do fluido de arrefecimento de 12 litros por minuto.

Figura 4.17 Banho termostático da BROOKFIELD modelo TC-550 para resfriamento do permutador de calor da fonte fria (CHX) do protótipo de (TEGea)



Especificações do chiller TC-550

- Reservatório de 7 litros
- Intervalo de temperatura -20 °C a 160 °C
- Resolução 0,1 °C
- Vazão da bomba 12 l/min
- Controle via software

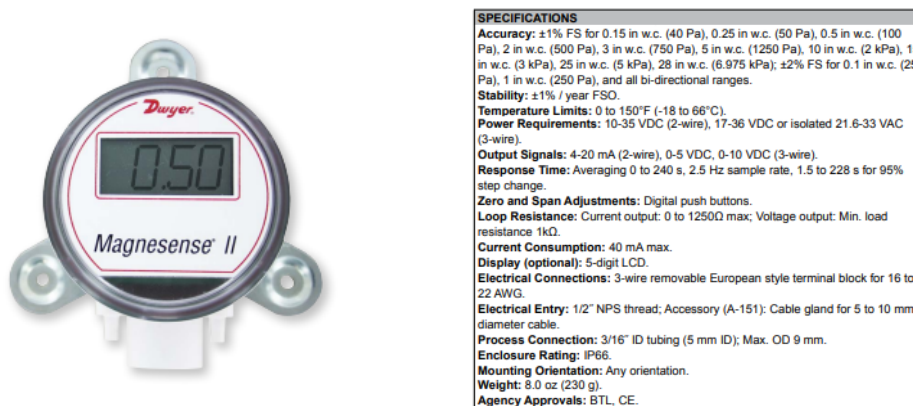
Fonte: Adaptado do manual do fabricante Brookfield

O instrumento de pressão diferencial Magnesense II DWYER da Figura 4.18 foi selecionado para medição da queda de pressão na seção do gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) tendo sido conectado às tomadas de pressão dos difusores na entrada e

saída da seção do protótipo de TEGea da bancada experimental para monitoramento e medição da queda de pressão promovida pelo escoamento do ar quente na seção do TEGea em diferentes regimes de operação.

O instrumento de pressão diferencial Magnesense II *DWYER* produz um sinal de corrente de 4-20mA conforme a diferença de pressão na entrada e saída da seção do protótipo de TEGea.

Figura 4.18 Características técnicas do instrumento de pressão diferencial Magnesense II *DWYER* utilizado para identifica a queda de pressão na seção do protótipo de TEGea



Fonte: Adaptado do fabricante Dwyer

A Figura 4.19 mostra o alicate wattímetro ET-4091 da MINIPA utilizado na bancada experimental de avaliação do TEGea para monitoramento e registros da potência elétrica consumida pela unidade de aquecimento do ar e tensão dos módulos termoeletrônicos.

Figura 4.19 Especificações do Wattímetro MINIPA ET-4091 e sensor de corrente ACS712 30A utilizados para medição de parâmetros elétricos no protótipo de TEGea



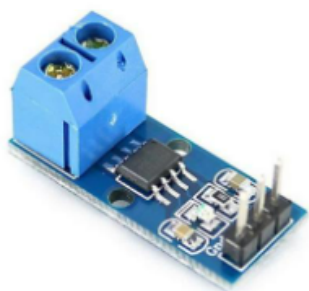
Display LCD/Contagem	4 Dígitos/10000 com iluminação
True RMS	True RMS AC
Potência Ativa	1kW/10kW/100kW/600kW (AC)
Potência Aparente	1kVA/10kVA/100kVA/600kVA (AC)
Potência Reativa	1kVar/10Var/100Var/600Var (AC)
Energia Ativa	100TWh (AC)
Fator de Potência	0,10-0,99
Distorção Harmônica Total	0-450% THD-F
Harmônica	-
Corrente AC	40/400/1000A
Tensão DC	600V
Tensão AC	600V
Resistência	999Ω
Frequência	5Hz-500Hz
Teste de Continuidade	✓
Data/Peak Hold	✓
Máx./Min./Méd.	-
Inrush	-
Autodesligamento	✓
Mudança de Faixa	Automática
Interface e Software	Interface USB
Adaptador Trifásico	Não necessita
Abertura de Garra	45mm
Diâmetro do Condutor	45mm
Precisão Básica	0,5%
Alimentação	2x1,5V AAA
Categoria de Segurança	CAT III 600V
Dimensões (mm)/Peso (g)	224x78x40/224

Fonte: Adaptado do manual do fabricante Minipa

O instrumento possui display LDC e ainda dispõe de software para aquisição e armazenamento de dados em computador via cabo de comunicação USB.

A Figura 4.20 mostra o sensor de corrente ACS712 30A da OEM utilizado na bancada experimental de avaliação do TEGea para monitoramento e registros da corrente elétrica gerada pela unidade do gerador termoeletrico ar.

Figura 4.20 Sensor de corrente alternada ACS712 30A OEM compatível com arduino e outras plataformas.



CARACTERÍSTICAS:

- Sensor de Corrente ACS712 30A;
- Sensor efeito hall de corrente;
- Medidor de corrente AC / DC;
- Mede o consumo de componentes elétricos;
- Compatível com Arduino, Raspberry PI, PIC, /
- Excelente relação custo x benefício;
- Compacto;

ESPECIFICAÇÕES:

- Marca: OEM
- Chip: ACS712;
- Tensão de alimentação: 5V;
- Corrente máxima: 30A;

Fonte: Adaptado do manual do fabricante OEM

A Figura 4.21 mostra o sensor de temperatura MAX6675 utilizado na bancada

experimental de avaliação do TEGea para monitoramento e registro de temperaturas.

Figura 4.21 Sensor de temperatura termopar tipo K compatível com arduino e outras plataformas.

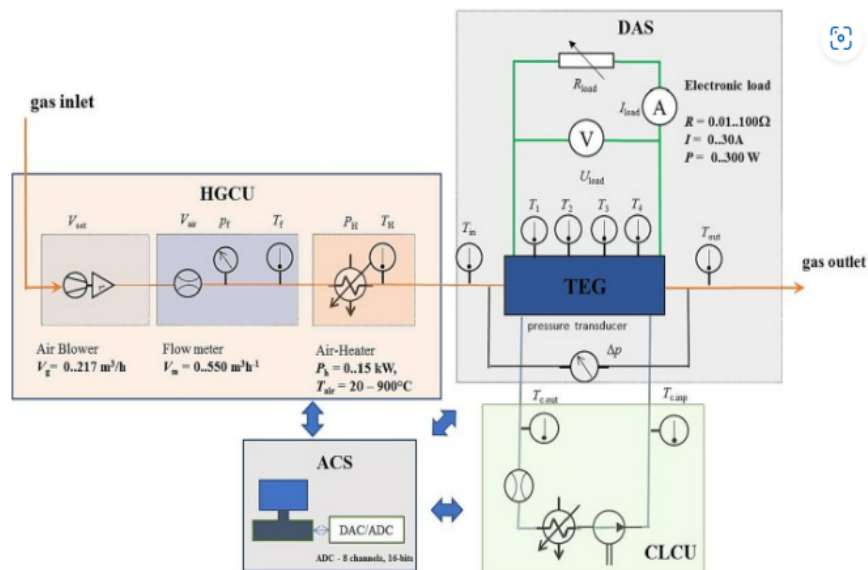


- CI: MAX6675
- Tensão de operação: 3 a 5,5VDC
- Corrente de operação: 50mA
- Faixa de medição: 0 a 800° celsius
- Precisão: $\pm 1,5^\circ \text{C}$
- Resolução de temperatura de: $0,25^\circ \text{C}$
- Faixa de compensação de junção fria: $-20^\circ \sim 80^\circ \text{celsius}$
- Interface de comunicação: SPI
- Rosca: M6
- Comprimento do termopar: 50cm

Fonte: Adaptado do manual do fabricante Maxim Integrated

A Figura 4.22 adaptada de WOJCIECHOWSKI et al. (2022) ilustra o diagrama esquemático da instrumentação da bancada experimental para teste de avaliação de performance de gerador termoeletrônico automotivo (TEG).

Figura 4.22 Diagrama esquemático da instrumentação da bancada experimental para testes em regime transiente do protótipo de TEGea



Fonte: Adaptado de WOJCIECHOWSKI et al. (2022)

A Tabela 4.6 extraída de WOJCIECHOWSKI et al. (2022) descreve as unidades e sistemas de controle, monitoramento e medição da Figura 4.20 e que normalmente integram o aparato experimental para testes de performance de geradores termoeletricos automotivos e que serviu de base para a concepção e desenvolvimento da bancada experimental instrumentada utilizada para teste do protótipo de TEGea desta pesquisa.

Tabela 4.6 Unidades e sistemas de controle, monitoramento e medição da bancada experimental de testes em regime transiente do TEGea.

UNIDADES ou SISTEMAS	DESCRIÇÃO DA FUNÇÃO
Unidade de controle de gás quente (HGPU)	Controla e monitora a vazão e aquecimento de ar na seção do TEGea
Unidade de controle de líquido de resfriamento (CLCU)	Controla e monitora o arrefecimento dos módulos termoeletricos do TEGea
Sistema de controle automatizado (ACS)	Controla o teste em regime transiente na plataforma Arduino;
Sistema de aquisição de dados (DAS)	Armazena dados térmicos, do fluido e elétricos da seção do TEGea

Fonte: Autor

4.3 METOLOGIA DOS TESTES DE PERFORMANCE DO TEGea

Os ensaios experimentais de avaliação da performance do protótipo de TEGea foram conduzidos em uma bancada desenvolvida exclusivamente para este fim. A bancada de teste descrita anteriormente possuía uma seção de propulsão (turbina de vento) para impulsionar o escoamento de ar quente através da seção do TEGea, uma seção com resistência elétrica de aquecimento que simulava a fonte de calor do sistema e a seção do TEGea formada pelo permutador de calor da fonte quente, módulos termoeletricos e permutador de calor da fonte fria (dissipador) para controle do gradiente de temperatura entre os lados quente e frio dos módulos termoeletricos, de modo a garantir sua integridade estrutural.

O lado quente do módulo termoeletrico (TEM) estava em contato direto com a superfície aquecida do permutador de calor (HHX), enquanto a superfície fria do permutador de calor (CHX) foi conectada no lado frio do TEGea e atuava controlando os gradientes de temperatura dos lados quente e frio do módulo TE.

Além disso, um sistema mecânico contendo parafusos, porcas e arruelas possibilitava a montagem dos componentes e aperto do sistema TEGea. O objetivo deste sistema mecânico de aperto era tão somente fixar adequadamente os permutadores de calor HHX e CHX aos módulos termoeletricos (TEM) de modo a reduzir a resistência de contato térmico entre os componentes do sistema TEGea.

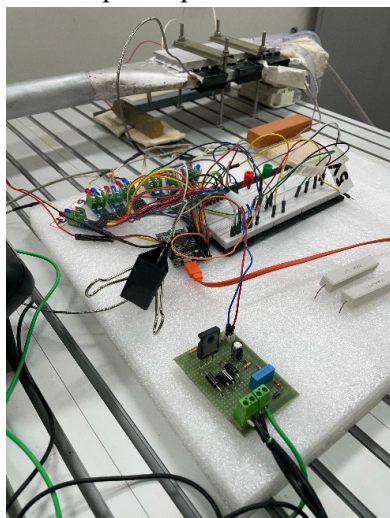
Em seguida, os terminais positivo e negativo dos módulos termoeletrônicos (TEM) foram, através de condutores de cobre com isolamento térmico de alta temperatura, conectados eletricamente em série e à resistência elétrica externa (R_{load}) conectada em paralelo com a resistência elétrica interna dos módulos TE.

Durante a realização dos testes de performance na bancada experimental em regime de plena carga ou carga parcial, o sistema de gerenciamento via Arduino ou instrumentos eletrônicos com software de comunicação com microcomputador realizada de forma automática a aquisição e armazenamento de dados elétricos e termo-fluidos de interesse a cada 1 segundo continuamente.

Além da placa de aquecimento, uma hélice acionada por motor de aeromodelo foi instalado e impulsionava o ar quente através do permutador de calor HHX. Os operacionais podiam ser alterados durante o experimento, incluindo a temperatura do ar aquecido por resistência elétrica, a velocidade do ar quente, a temperatura da água de arrefecimento dos TEM, a configuração do HHX do TEG com ou sem canais corrugados.

Os testes de performance do protótipo de TEGea foram realizados utilizando-se módulos termoeletrônicos pré-selecionados HZ-14 ou HZ-14HV para duas velocidades de escoamento do ar através da seção TEGea e com a potência de aquecimento do ar variável controlado por placa eletrônica desenvolvida em plataforma (Figura 4.23) do ambiente Arduíno.

Figura 4.23 Controles eletrônicos da bancada experimental para testes em regime transiente do protótipo de TEGea



Legenda:

1. TEGea
2. Sensores de temperatura
3. Placa protoboard de montagem de sensores e atuadores
4. Placa ESP de controle e monitoramento
5. Placa de controle da resistência elétrica de aquecimento

Fonte: Autor

A Tabela 4.7 apresenta as diferentes condições de teste em regime transiente estabelecidas na bancada experimental instrumentada para avaliação da performance de conversão termoeétrica do protótipo de TEGea desenvolvido na presente.

Tabela 4.7 Principais características e tipos de testes de avaliação da performance do protótipo de gerador termoeétrico de exaustão automotiva (TEGea)

TIPO DE TESTE	TEM	VAZÃO DE AR [m ³ /min]	PERMUTADOR DE CALOR	DURAÇÃO DO TESTE [min]
Plena Carga (1800W)	HZ-14 ou HZ-14HV	0,50	HHX-000 HHX-150 HHX-250	20
Carga Parcial (600W)	HZ-14 ou HZ-14HV	0,25	HHX-000 HHX-150 HHX-250	25

Fonte: Autor

Em todos os testes de performance do protótipo de TEGea no modo de aquecimento de plena carga, com potência máxima de aquecimento de aproximadamente 1800W, a resistência de aquecimento controlada na plataforma Arduino, era inicialmente acionada até atingir aproximadamente 1800W, permanecendo ligada nesta condição por 5 minutos, quando era diminuída para cerca de 1200W, permanecendo ligada por 3 minutos nesta condição e retornando para a potência aproximada de 1800W por 3 minutos.

Este ciclo de aquecimento se repetia por mais 2 vezes de forma automática por gerenciamento do *software* do Arduino, isto é, com a potência de aquecimento evoluindo entre 1200W e 1800W e vice-versa, permanecendo em cada um destes níveis de potência por 3 minutos, perfazendo assim 3 ciclos de aquecimento e totalizando aproximadamente 20 minutos de duração do teste.

De forma análoga, em todos os testes de performance do protótipo de TEGea no modo aquecimento denominado de carga parcial, com potência máxima de aquecimento de aproximadamente 600W, a resistência de aquecimento controlada no âmbito da plataforma Arduino, era inicialmente acionada até atingir cerca de 600W, permanecendo ligada nesta condição por 10 minutos, então reduzida para cerca de 250W, permanecendo ligada por 3 minutos nesta condição e retornando para a potência aproximada de 600W por 3 minutos.

Este ciclo de aquecimento se repetia por mais 2 vezes de forma automática por gerenciamento do *software* do Arduíno, isto é, com a potência de aquecimento evoluindo entre 250W e 600W e vice-versa, permanecendo em cada um destes níveis de potência por 5 minutos, perfazendo assim 3 ciclos de aquecimento e totalizando aproximadamente 25 minutos de duração do teste.

Por razões de segurança e em conformidade com as recomendações do fabricante dos módulos termoeletricos, a temperatura máxima em regime intermitente na superfície quente do permutador de calor HHX foi limitada em 450°C, visando não comprometer a integridade estrutural dos módulos termoeletricos.

Para avaliação comparativa da influência da inserção dos canais corrugados nas superfícies das aletas do permutador de calor HHX, foram estabelecidas duas velocidades de escoamento do ar aquecido através da seção do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea). Assim, os resultados obtidos nos testes de performance do protótipo de TEGea são comparados para identificação da influência da inserção do minicanal corrugado na eficiência de captação de calor do HHX e por conseguinte também na eficiência da conversão termoeletrica do protótipo de TEGea.

4.4 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Os permutadores de calor da fonte quente (HHX) e da fonte fria (CHX) foram desenvolvidos a partir de dissipadores de alumínio comerciais sem o conhecimento da composição dos elementos químicos constituintes das ligas de alumínio e do processo de fabricação destes dissipadores.

Para atender aos requisitos do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) desta pesquisa, foram usinados em máquina fresadora CNC 02 minicanais em cada superfície lateral das aletas do permutador de calor HHX do TEGea, com largura de 0,6 mm e profundidade de 150µm ou 250µm.

O conhecimento da composição da liga metálica de alumínio, da topologia e rugosidade das superfícies internas do permutador de calor HHX é essencial para estimativa das propriedades termo-físicas, em especial o coeficiente de condutividade térmica dos trocadores de calor, que tem influência direta na capacidade de captação de calor do protótipo de TEGea.

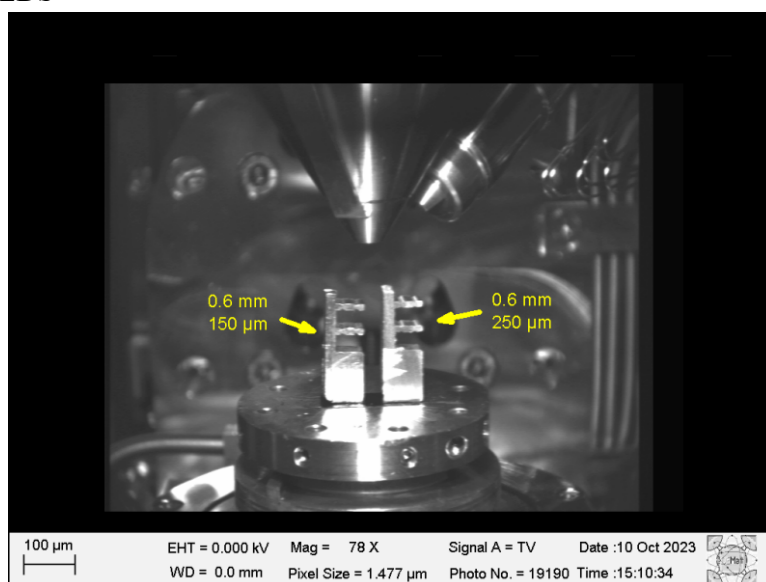
O processo de fabricação dos dissipadores de calor utilizado no desenvolvimento dos permutadores de calor (HHX e CHX) do protótipo de TEGea desta pesquisa define o grau

de aspereza ou rugosidade da superficial deste componente e que por sua vez exerce influência na resistência térmica de contato de vital importância para captação e/ou dissipação de calor das fontes quente e fria, respectivamente.

Alem disso, o processo de usinagem em máquina fresadora CNC para construção dos minicanais do permutador de calor (HHX) poderia modificar a microtopografia e composição da liga metálica superficial da área afetada, alterando o coeficiente de condutibilidade térmica e o coeficiente global de transferência de calor e por conseguinte influenciando a intensidade de captação de calor na superfície quente em contato direto com os módulos termoelétricos do gerador termoelétrico de exaustão automotiva.

Por outro lado, um outro fator relevante no processo de transferência de calor de um TEGe e que necessariamente deve ser levado em consideração é a topologia das superfícies externas do permutador de calor da fonte quente HHX e da fonte fria CHX em contato com os módulos termoelétricos, pois segundo os especialistas, superfícies com maior grau de rugosidade, isto é, menos polida apresentam maior resistência térmica de contato, interferindo por conseguinte na eficiência do processo de transferência de calor.

Figura 4.24 Amostras de material removidas dos permutadores de calor HHX para análise de MEV e EDS



Fonte: Autor

A Figura 4.24 apresenta amostras de materiais que foram removidas do permutador de calor da fonte quente (HHX), por processo de usinagem com serra manual, para análise

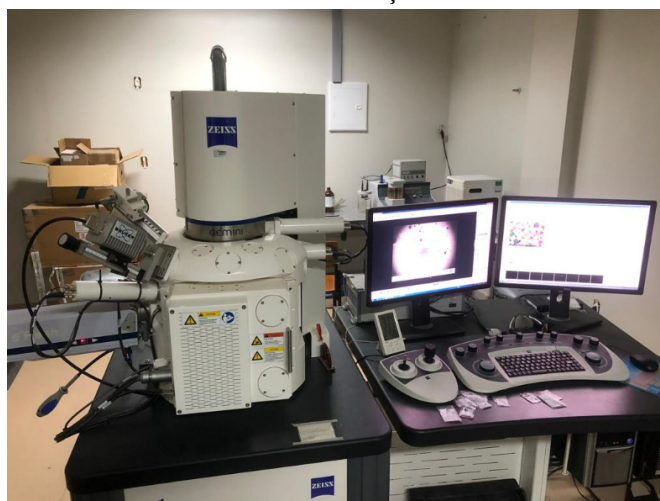
por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Por essas razões foi necessário a análise por MEV para identificação das características topográficas dessas superfícies e da composição dos materiais constituintes das ligas metálicas destes permutadores de calor nas regiões internas e externas com ou sem usinagem em CNC.

O processo de extração das amostras de alumínio do HHX para análise de MEV e EDS foi realizado com uso de serra manual de forma que a temperatura da microrregião do permutador de calor afetada não ultrapassasse 60° C, para não modificar a composição e estrutura cristalina dos materiais do HHX. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao processo de limpeza utilizando substâncias adequadas para esse propósito.

As amostras removidas dos permutadores de calor HHX representativa da região das aletas com/sem minicanais foram submetidas à análise microestrutural de superfície via *microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo* (MEV-FEG) em um equipamento *ZEISS Auriga 40* da Figura 4.25 com detector de EDS (caracterização por varredura de energia dispersiva).

Figura 4.25 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV-FEG) modelo *ZEISS Auriga 40* de alta resolução 5000x do laboratório de Caracterização de Materiais do DeMat/UFRN.



Fonte: Autor

As imagens de topografia da superfície foram obtidas via elétrons secundários e tensão de 10 KV, com as amostras em diferentes posições para a identificação qualitativa e quantitativa do perfil geométrico do componente de extração de calor (aletas de liga de alumínio) e das superfícies externas (original e usinada para alisamento) com o objetivo de

analisar as condições de textura (rugosidade) dessas superfícies.

Também foi utilizada caracterização de elementos químicos através do EDS acoplado no equipamento, visando a identificação da liga de alumínio para o rastreamento de suas propriedades intrínsecas, para a correlação da condutividade térmica dos componentes analisados.

4.5 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

O grau de acabamento superficial ou as asperezas das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente (HHX) e da fonte fria (CHX), com acabamento superficial de polimento obtido em máquina fresadora CNC ou com o acabamento superficial original extrudado, foram avaliadas através de ensaios de rugosidade superficial conforme norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), utilizando-se o rugosímetro portátil TAYLOR HOBSON modelo SURTRONIC 25 da Figura 4.26.

Figura 4.26 Rugosímetro portátil TAYLOR HOBSON modelo SURTRONIC 25 realizando teste de rugosidade transversal do permutador de calor HHX do TEGe



LEGENDA:

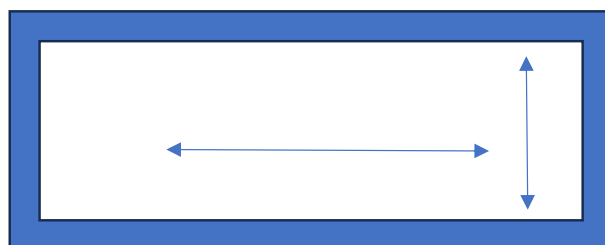
- 1 – Rugosímetro TAYLOR HOBSON
- 2 – Permutador de Calor HHX
- 3 – *Software* do rugosímetro
- 4 – Sensor de diamante do rugosímetro
- 5 – Bloco Padrão de calibração

Fonte: Autor

Este rugosímetro compacto dispõe de uma haste que se entende sobre a superfície analisada em que na extremidade existe um sensor de diamante com ponta cônica com ângulo entre 60 e 90 graus e raio de curvatura entre 2,5 a 10 micrômetros, conforme norma ISO 3274-1975.

A Figura 4.27 apresenta a área útil e as direções longitudinal e transversal do percurso realizado pelo sensor perfilométrico durante o teste de rugosidade das superfícies externas dos permutadores de calor HHX e CHX.

Figura 4.27 Teste de rugosidade na superfície externa dos permutadores de calor HHX com indicação da área dos módulos termoeletricos (circunscrita na cor branca) e direção longitudinal e transversal (setas azuis)



Fonte: Autor

A Figura 4.28 apresenta o bloco padrão de calibração do rugosímetro portátil da TAYLOR HOBSON modelo SURTRONIC 25 e a calibração do sensor perfilométrico realizado antes da realização dos testes de rugosidade superficial longitudinal e transversal das superfícies externas dos permutadores de calor HHX e CHX.

Figura 4.28 Bloco padrão de calibração do rugosímetro portátil da TAYLOR HOBSON modelo SURTRONIC 25 para calibração do sensor perfilométrico.



Fonte: Autor

4.6 ANÁLISE TERMOGRÁFICA DAS SUPERFÍCIES DO TEGea

A análise termográfica foi realizada com o propósito de identificar os gradientes de temperatura na superfície externa dos permutadores de calor da fonte quente (HHX), principalmente na área útil em contato com os módulos termoeletricos do protótipo do gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEG_{ea}).

Figura 4.29 – Especificações técnicas da câmera termográfica para avaliação dos gradientes de temperatura das superfícies quente e fria dos permutadores de calor em diferentes condições de funcionamento do TEGea.



Specifications

Overview		C3
IR Sensor		80 x 60
Thermal Sensitivity/NETD		< 0.10°C
Field of View (FOV)		41° x 31°
Minimum Focus Distance		Thermal: 0.15 m (0.49 ft) MSX®: 1 m (3.3 ft)
Image Frequency		9 Hz
Focus		Focus free
Spectral Range		7.5 - 14.0 µm
Digital Camera		640 x 480 pixel
Digital Camera Focus		Fixed focus
Image Presentation		
Image Modes		Thermal, visual, MSX®, Picture-in-Picture
Image Gallery		Yes
MSX®		Adds visual details to full resolution thermal image
Color Palettes		Iron, Rainbow, Rainbow HC, Gray
Auto Orientation		Yes
Touch Screen		Yes, capacitive
Measurement & Analysis		
Object Temperature Range		-10°C to 150°C (14°F to 302°F)
Accuracy		±2°C (±3.6°F) or ±2%, whichever is greater, at 25°C (77°F) nominal
Spotmeter		On/Off
Area		Box with max. or min.
Emissivity Correction		Yes; matte/semi-matte/semi-glossy + custom value
Measurement Correction		Emissivity, Reflected apparent temperature

Fonte: Adaptado do manual do fabricante Flir

Para registro dos mapas termográficos das superfícies dos permutadores de calor a câmera foi instalada em um suporte com a uma distância pré-estabelecida do foco e a taxa de emissividade foi ajustada de acordo com o acabamento superficial (polida ou extrudada) e material da liga metálica.

O ajuste da emissividade da câmera termográfica e medição dos diferentes níveis de temperatura na superfície externa do permutador de calor da fonte quente (HHX) somente foi possível com a aplicação de pasta térmica (cor branca) uma vez que a superfície de alumínio polida apresentava grande reflexão e distorcia os valores de temperatura capturados pelo sensor infravermelho da câmera termográfica.

Os mapas termográficos da superfície quente do permutador de calor (HHX) foram obtidos em regime transiente sem a instalação dos módulos termoeletrônicos no TEGea de modo que a câmera termográfica registrava os gradientes de temperatura em toda superfície útil destinada à conversão termoeletrônica.

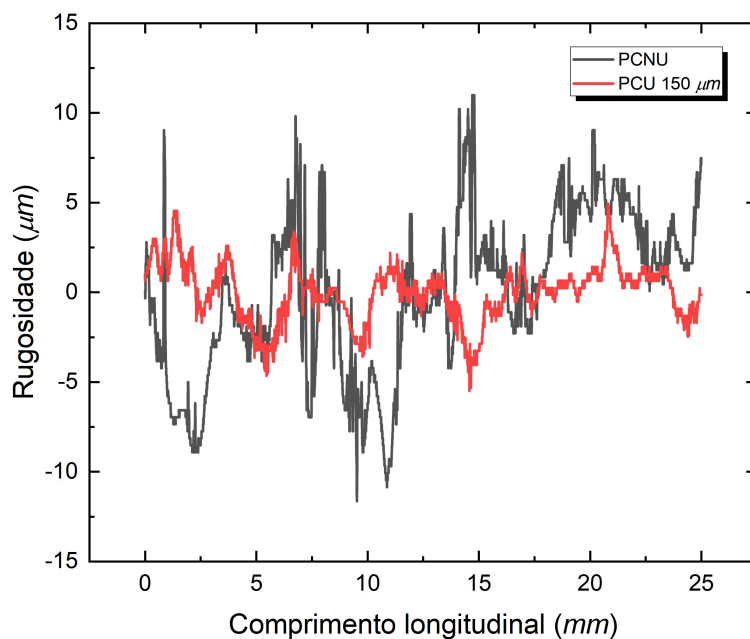
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do desenvolvimento do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea), a construção de uma bancada instrumentada de testes em escala de laboratório e a performance do protótipo do (TEGea) com/sem aletas e minicanais corrugados funcionando em condições de regime transiente.

5.1 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade superficial longitudinal e transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente (HHX) e da fonte fria (CHX) do protótipo de TEGea foram determinadas com rugosímetro portátil taylor hobson modelo Surtronic 25 e os resultados obtidos foram plotados nos gráficos das Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

Figura 5.1 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U150

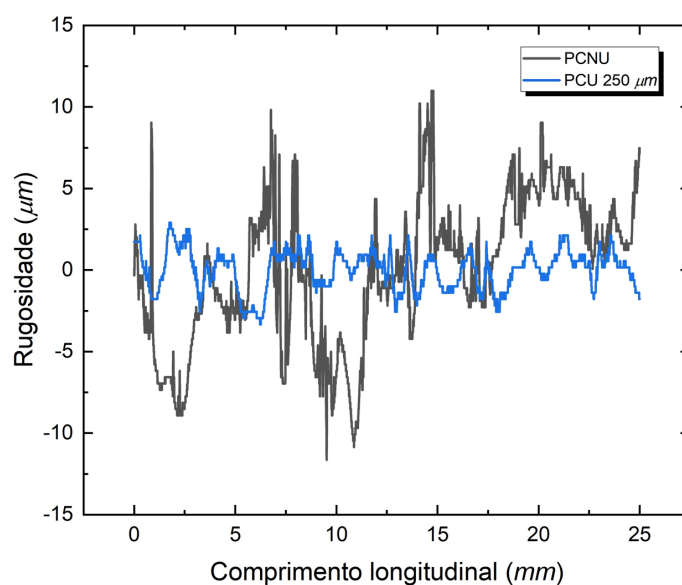


A Figura 5.1 mostra os perfis de rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor HHX-NU000 não usinado e da superfície externa do HHX-U150 polido em máquina CNC. Os valores de rugosidade longitudinal da superfície do HHX-NU000, ao longo de todo percurso amostral de 25mm, apresentam elevado $Ra = 0,857\mu m$, indicativo de uma superfície tipicamente sem polimento.

Analisando os perfis de rugosidade longitudinal da Figura 5.1 observa-se com muita clareza que a amplitude dos vales e picos de rugosidade da superfície polida do HHX-U150, ao longo de todo percurso do comprimento da amostra, são nitidamente inferiores à amplitude dos vales e picos de rugosidade de HHX-NU-000.

O permutador de calor HHX-U150 apresentou desvios de rugosidade média $Ra = 0.260\mu m$ que são característicos de superfícies polidas. Enquanto o desvio de rugosidade média do permutador de calor HHX-NU000 apresentou valores bem superiores, registrando o valor de $Ra = 0,857\mu m$, que é indicativo de superfície sem acabamento superficial de polimento. A Figura 5.2 apresenta os perfis de rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor não usinado HHX-NU000 e do permutador de calor HHX-U250 usinado em CNC.

Figura 5.2 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U250

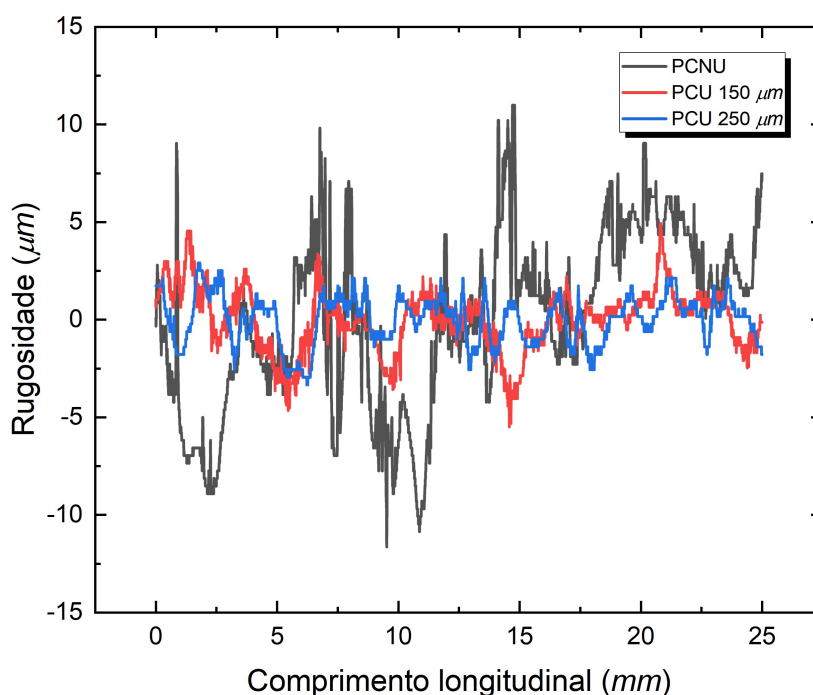


Examinando os perfis de rugosidade longitudinal apresentados na Figura 5.2, evidencia-se que a superfície polida do HHX-U250 exibe, ao longo de toda a extensão da amostra, amplitudes menores nos vales e picos de rugosidade em comparação com o HHX-NU000.

O permutador de calor HHX-U250 também apresentou desvios de rugosidade média $R_a = 0,270\mu\text{m}$ que são característicos de superfícies polidas, sendo que este valor é 31,50% inferior ao $R_a = 0,857\mu\text{m}$ do permutador de calor HHX-NU000.

A Figura 5.3 mostra os perfis de rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor não usinado HHX-NU000 e dos permutadores de calor HHX-U150 e HHX-U250 polidos em máquina CNC.

Figura 5.3 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000, HHX-U150 e HHX-U250

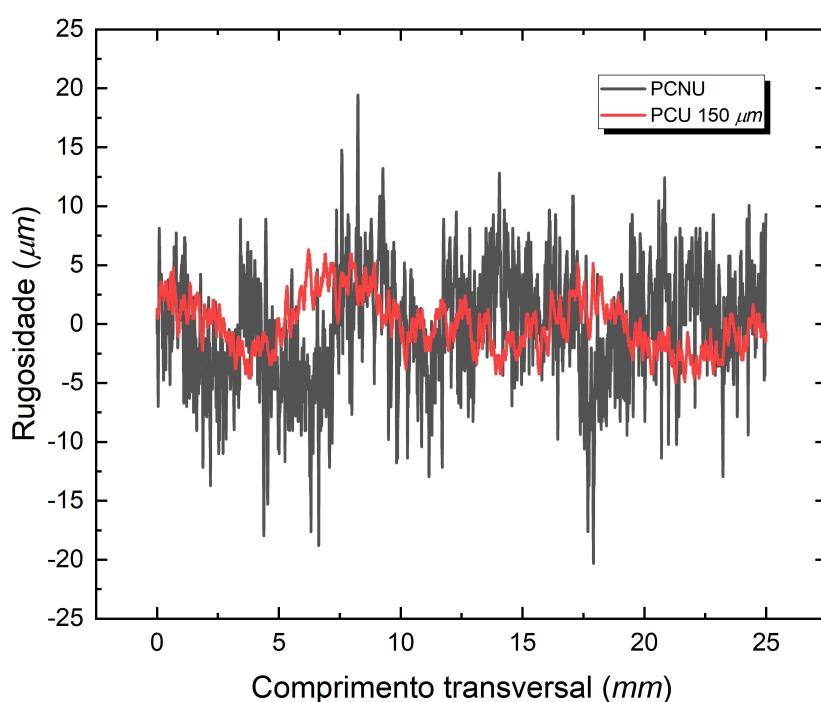


Os perfis de rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor polidos são muito semelhantes e inferiores àquele do permutador de calor HHX-NU000 não usinado.

A Figura 5.4 mostra os perfis de rugosidade superficial transversal da superfície externa do permutador de calor HHX não usinado. Os valores de rugosidade nesta superfície, ao longo de todo comprimento de amostra, apresentam um $Ra = 2,700\mu m$ indicativo de uma superfície tipicamente sem polimento.

Ao analisar os perfis de rugosidade longitudinal apresentados na Figura 5.4, torna-se evidente que, ao longo de todo o comprimento da amostra, a amplitude dos vales e picos na superfície polida do HHX-U150 é menor em comparação com a amplitude observada nos vales e picos de rugosidade do HHX-NU000.

Figura 5.4 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U150



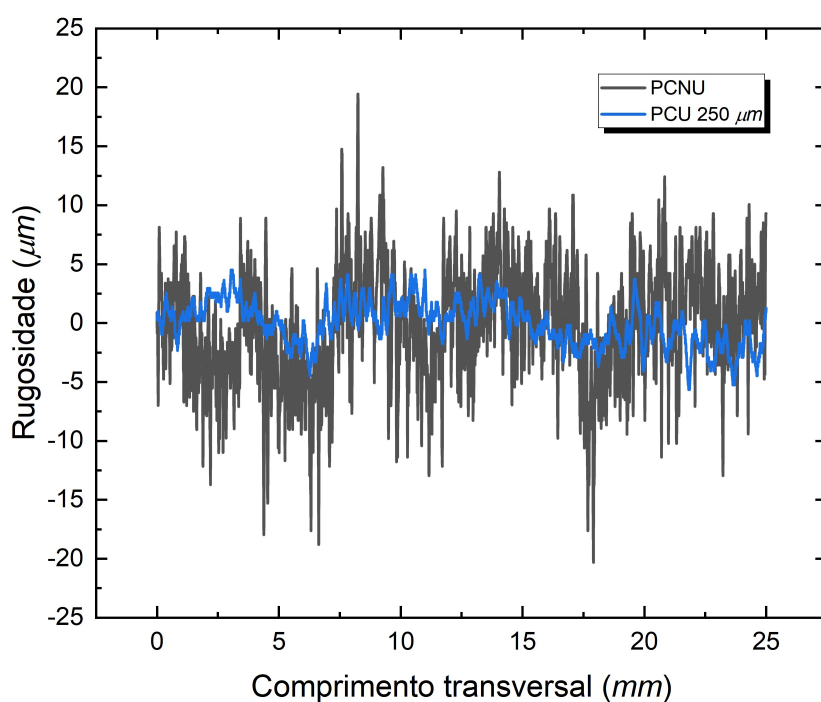
O permutador de calor HHX-U150 apresentou desvios de rugosidade média $Ra = 0,545\mu m$ que são característicos de superfícies polidas. Enquanto o desvio de rugosidade média do permutador de calor HHX-NU000 apresentou valores bem superiores, registrando o valor de $Ra = 2,700\mu m$, que é indicativo de superfície sem acabamento superficial de polimento.

A Figura 5.5 apresenta os perfis de rugosidade superficial transversal da superfície externa do permutador de calor não usinado HHX-NU000 e do permutador de calor HHX-U-250 usinado em máquina CNC.

Analisando os perfis de rugosidade transversal da Figura 5.5, também se observa que a amplitude dos vales e picos de rugosidade longitudinal da superfície polida do HHX-U250, ao longo de todo percurso do comprimento da amostra, são inferiores à amplitude dos vales e picos de rugosidade de HHX-NU000.

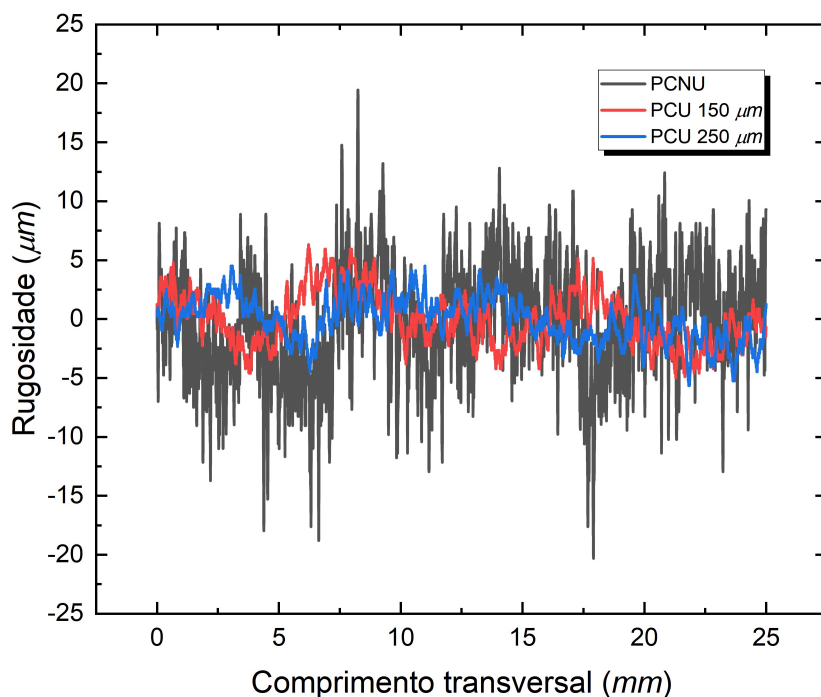
O permutador de calor HHX-U250 também apresentou desvios de rugosidade média $R_a = 0,270\mu\text{m}$ que são característicos de superfícies polidas, sendo que este valor é 90,00% inferior ao $R_a = 2,700\mu\text{m}$ do permutador de calor HHX-NU000.

Figura 5.5 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000 e HHX-U250



A Figura 5.6 mostra os perfis de rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor não usinado HHX-NU000 e dos permutadores de calor polidos HHX-U150 e HHX-U250.

Figura 5.6 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte quente HHX-NU000, HHX-U150 e HHX-U250



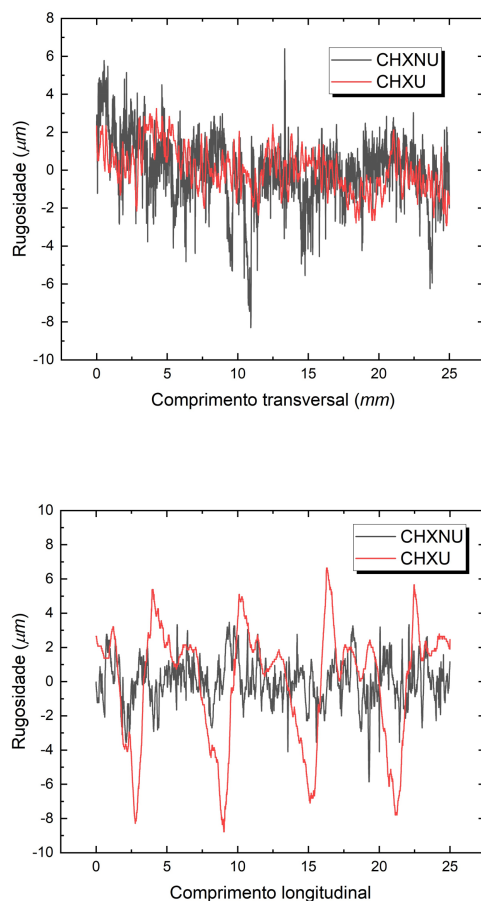
Os perfis de rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor polidos HHX-U150 e HHX-U250 são muito semelhantes e inferiores àquele do permutador de calor não usinado HHX-NU000.

A Figura 5.7 apresenta os perfis de rugosidade longitudinal da superfície externa do módulo 01 do permutador de calor da fonte fria do lado não usinado CHX-NU-M1 e do lado polido CHX-U-M1, usinado em máquina CNC.

Examinando os perfis de rugosidade longitudinal apresentados na Figura 5.7, é evidente que a superfície polida do CHX-U-M1 exibe, ao longo de toda a extensão da amostra, amplitudes menores nos vales e picos de rugosidade em comparação com o CHX-NU-M1.

A superfície do permutador de calor CHX-U-M1 também apresentou no sentido longitudinal desvios de rugosidade média $R_a = 0,301\mu\text{m}$ que são característicos de superfícies polidas, sendo que este valor é 35,79% inferior ao $R_a = 0,841\mu\text{m}$ do permutador de calor CHX-NU-M1.

Figura 5.7 Rugosidade longitudinal e transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M1 e CHX-U-M1

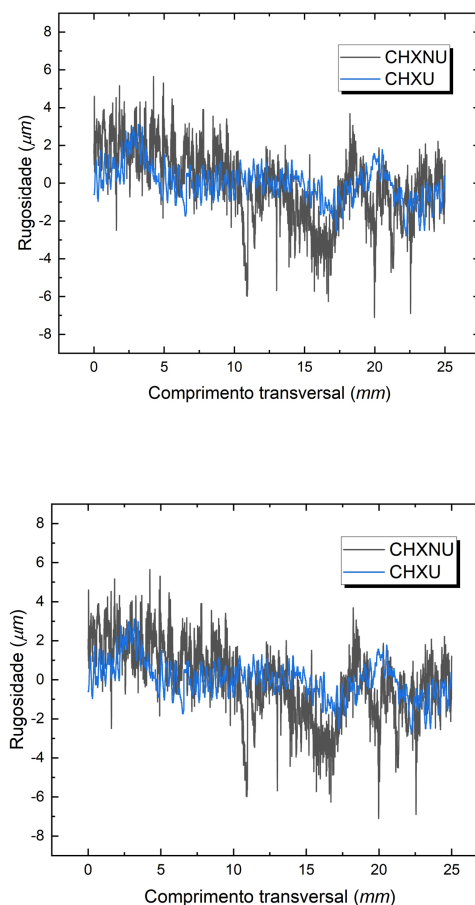


A Figura 5.8 apresenta os perfis de rugosidade transversal da superfície externa do módulo 01 do permutador de calor da fonte fria do lado não usinado CHX-NU-M1 e do lado polido CHX-U-M1, usinado em máquina CNC.

Analisando os perfis de rugosidade transversal da Figura 5.8, também se observa que a amplitude dos vales e picos de rugosidade transversal da superfície polida do CHX-U-M1, ao longo de todo percurso do comprimento da amostra, são inferiores à amplitude dos vales e picos de rugosidade de CHX-NU-M1.

A superfície do permutador de calor CHX-U-M1 também apresentou no sentido transversal desvios de rugosidade média $R_a = 0,466\mu\text{m}$ que são característicos de superfícies polidas, sendo que este valor é 65,26% inferior ao $R_a = 0,714\mu\text{m}$ do permutador de calor CHX-NU-M1.

Figura 5.8 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M1 e CHX-U-M1

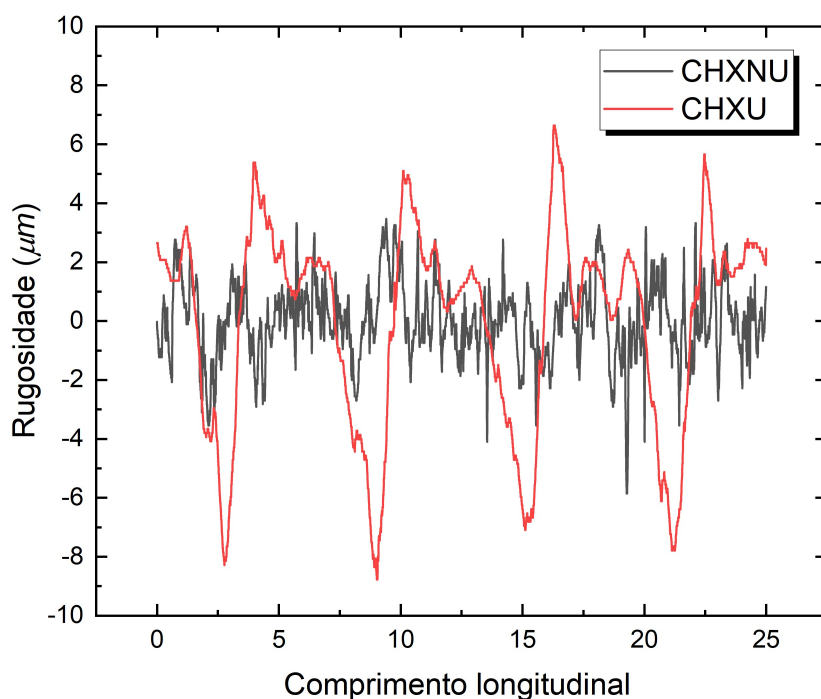


A Figura 5.9 apresenta os perfis de rugosidade longitudinal da superfície externa do módulo 02 do permutador de calor da fonte fria do lado não usinado CHX-NU-M2 e do lado polido CHX-U-M2, usinado em máquina CNC.

Analisando os perfis de rugosidade longitudinal da Figura 5.9, também se observa que a amplitude dos vales e picos de rugosidade longitudinal da superfície polida do CHX-U-M2, ao longo de todo percurso do comprimento da amostra, são nitidamente inferiores à amplitude dos vales e picos de rugosidade de CHX-NU-M2.

A superfície do permutador de calor CHX-U-M2 também apresentou no sentido longitudinal desvios de rugosidade média $R_a = 0,257\mu\text{m}$ que são característicos de superfícies polidas, sendo que este valor é 42,13% inferior ao $R_a = 0,610\mu\text{m}$ do permutador de calor CHX-NU-M2.

Figura 5.9 Rugosidade longitudinal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M2 e CHX-U-M2



A Figura 5.10 apresenta os perfis de rugosidade transversal da superfície externa do módulo 02 do permutador de calor da fonte fria do lado não usinado CHX-NU-M2 e do lado polido CHX-U-M2, usinado em máquina CNC.

Em análise dos perfis de rugosidade transversal na Figura 5.10, nota-se, ao longo de todo o comprimento da amostra, uma amplitude dos vales e picos de rugosidade transversal na superfície polida do CHX-U-M2 inferior à amplitude observada nos vales e picos de rugosidade do CHX-NU-M2.

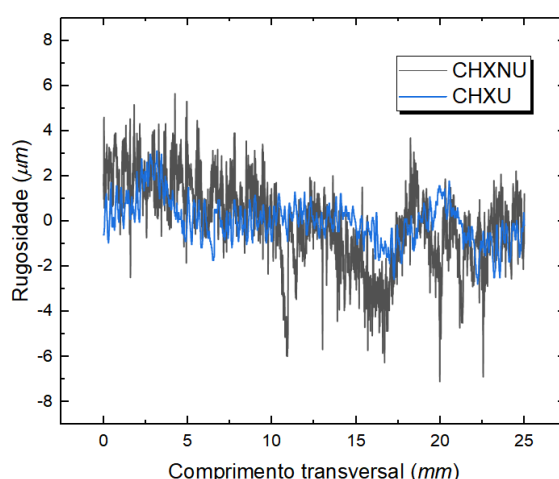
A superfície do permutador de calor CHX-U-M2 também apresentou no sentido transversal desvios de rugosidade média $R_a = 0,353\mu\text{m}$ que são característicos de superfícies polidas, sendo que este valor é 51,30% inferior ao $R_a = 0,688\mu\text{m}$ do permutador de calor CHX-NU-M2.

Enfim, todas as superfícies polidas em processo de usinagem por CNC dos permutadores de calor da fonte quente (HHX) e da fonte fria (CHX) do protótipo de gerador termoeletrônico de exaustão automotiva (TEGea) nos testes de rugosidade longitudinal e

transversal apresentaram valores do parâmetro Ra inferiores àqueles das superfícies destes permutadores de calor não usinados, confirmando naturalmente o melhor grau de acabamento superficial ou menor nível de asperezas das superfícies polidas.

De acordo com a literatura especializada, superfícies menos ásperas, ou seja, polidas apresentam menor resistência térmica de contato superficial, e, por conseguinte, intensificam a eficiência do processo de transferência de calor por condução entre as superfícies dos módulos termoeletrônicos e as superfícies externas do permutador de calor da fonte fria (CHX-U-M1 e CHX-U-M2).

Figura 5.10 Rugosidade transversal das superfícies externas dos permutadores de calor da fonte fria CHX-NU-M2 e CHX-U-M2



5.2 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES E COMPOSIÇÃO DO HHX

Nesta seção são analisados os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e dispersão de raio X (EDS) das superfícies internas e externas do permutador de calor da fonte quente (HHX) do protótipo de gerador termoeletrônico de exaustão automotiva (TEGea).

As análises composicionais por varredura de energia dispersiva (EDS) nas amostras das superfícies internas do permutador de calor (HHX) e apresentadas na Tabela 5.1 revelaram a presença de alumínio (Al), magnésio (Mg), silício (Si) e oxigênio (O) nas proporções médias (% em peso) de 1,68% Mg, 0,74% Si e 3,83% O.

Tabela 5.1 Análise por EDS da composição (% em peso) da liga de alumínio na superfície original interna da base do permutador de calor da fonte quente (HHX) incluindo o oxigênio.

Original (contado o oxigênio) (% em peso)				
	Al	Mg	Si	O
Área 1	93,04	1,46	0,93	4,57
Área 2	94,49	1,89	0,54	3,08
média	93,77	1,68	0,74	3,83

A Tabela 5.2 apresenta as análises composicionais por varredura de energia dispersiva (EDS) nas amostras das superfícies internas do permutador de calor (HHX), excluindo-se a presença de oxigênio, revelaram a presença de alumínio (Al), magnésio (Mg), silício (Si) e oxigênio (O) nas proporções médias (% em peso) de 1,68% Mg, 0,74% Si e 3,83% O.

Tabela 5.2 Análise por EDS da composição (% em peso) da liga de alumínio na superfície original interna da base do permutador de calor da fonte quente (HHX) excluindo o oxigênio.

Original (sem contar o oxigênio) (% em peso)			
	Al	Mg	Si
Área 1	97,48	1,51	1,01
Área 2	97,50	1,93	0,57
média	97,49	1,72	0,79

Considerando que o oxigênio faz parte apenas de uma fina camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) natural da liga metálica em sua superfície, a identificação da liga foi efetuada através de uma quantificação restringindo-se à análise dos elementos Al, Mg e Si, obtendo-se a média de 1,72% Mg, 0,79% Si, revelando que se trata de uma liga comercial da série 6xxx (Al-Mg-Si), conforme especificação da Aluminum Association (AA).

Essa série das ligas metálicas de alumínio é muito utilizada na fabricação de

componentes automotivos e aeronáuticos, tendo uma relação custo/benefício bastante atrativa pela facilidade de processamento na fabricação de produtos conformados mecanicamente.

A proporção dos teores de Mg e Si é definida para a promoção de um procedimento denominado “endurecimento por precipitação”, garantindo maior resistência mecânica e mantendo boa ductilidade do material (capacidade de deformar plasticamente antes da ruptura), condições importantes que previnem uma falha catastrófica em componentes estruturais.

A análise composicional da superfície também foi efetuada para a comparação do teor de oxigênio antes e após as usinagens, visando o melhor entendimento da camada de óxido da peça.

O teor médio de 3,83% de oxigênio na peça original indica a formação de uma pequena camada de óxido, típica de peças de alumínio. A usinagem da superfície nitidamente promoveu maior alisamento da superfície e apresentou menor teor de oxigênio (1,24 %).

Figura 5.11 Topografia da superfície interna original da base - área 1 - do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.

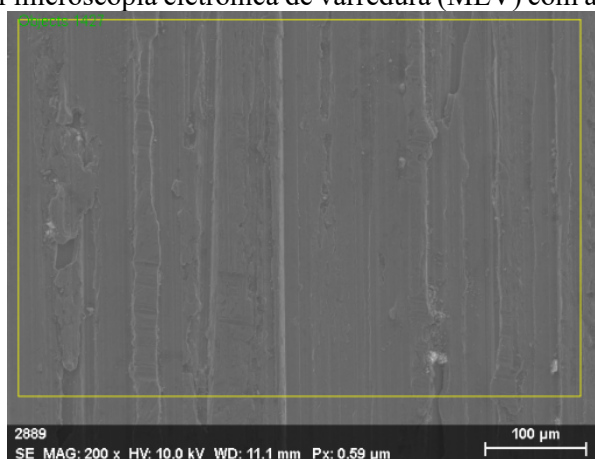
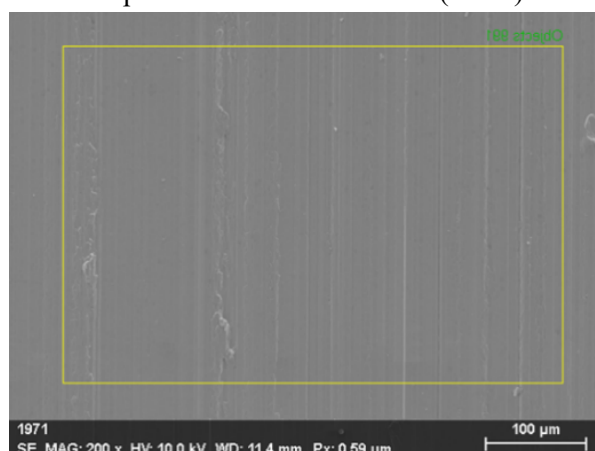
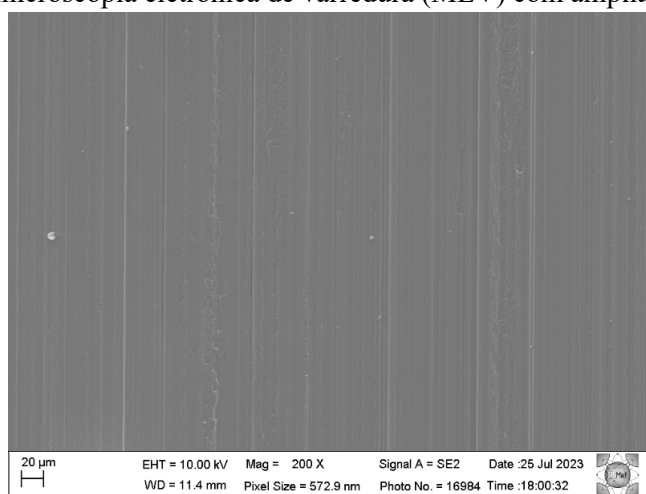


Figura 5.12 Topografia da superfície interna original da base - área 2 - do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.



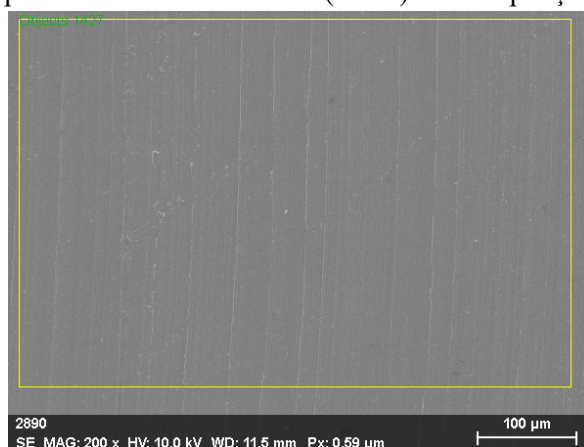
Pelas características geométricas e microestruturais analisadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície externa do permutador de calor da fonte quente (HHX) em contato com os módulos termoeletrônicos do protótipo de gerador termoeletrônico de exaustão automotiva (TEGea) e apresentadas na Figura 5.13, infere-se que o componente original destes permutadores de calor reuni condições típicas de processamento por extrusão a quente (material compacto, sem porosidade e com linhas suaves de deformação na superfície da peça).

Figura 5.13 Topografia da superfície externa original (sem usinagem) do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.



Pelas características geométricas e microestruturais analisadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície externa do permutador de calor da fonte quente (HHX) em contato com os módulos termoelétricos do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) e apresentadas na Figura 5.13, infere-se que o componente original destes permutadores de calor reuni condições típicas de processamento por extrusão a quente (material compacto, sem porosidade e com linhas suaves de deformação na superfície da peça).

Figura 5.14 Topografia da superfície externa usinada (polida) do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 200x.



Analisando as Figura 5.14 Apesar da diferença entre os teores de oxigênio, a baixa fração deste elemento químico em ambos os casos, sugere que não deve ocorrer interferência significativa na atuação do óxido de alumínio (que tem característica de isolante térmico) no processo de transferência de calor do meio para a superfície internas do permutador de calor da fonte quente (HHX) de liga de alumínio, que exibe comportamento oposto de excelente condutor de calor.

Figura 5.15 Topografia superfície externa usinada (polida) do permutador de calor HHX por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 2000x.

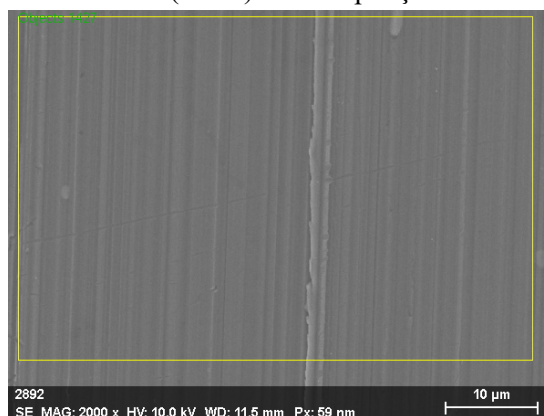


Tabela 5.3 Análise por EDS da composição (% em peso) da liga de alumínio na superfície original interna da base do permutador de calor da fonte quente (HHX) com ou sem o oxigênio.

Usinada (sem contar o oxigênio) (% em peso)			Usinada (contado o oxigênio) (% em peso)				
Al	Mg	Si		Al	Mg	Si	O
98,21	1,48	0,32	Área 1	96,91	1,50	0,35	1,24
			Área 2	96,90	1,44	0,37	1,29
			média	96,905	1,47	0,36	1,265

5.3 PERFORMANCE DO TEGea

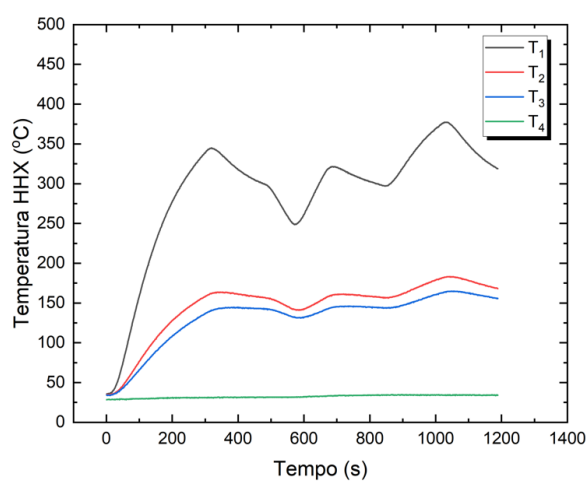
Neste tópico serão descritos e analisados os principais parâmetros de performance do protótipo de gerador termoeletrônico de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com módulos termoeletrônicos HZ-14V ou HZ-14HV sob diferentes condições de operação pré-estabelecidas na Tabela 4.7.

Inicialmente vale destacar que, o gerenciamento automático em ambiente Arduino da potência de aquecimento e da velocidade de escoamento do ar através da seção do protótipo de TEGea possibilitaram a fiel reprodução de todos os testes de performance do TEGea estabelecidos na Tabela 4.7, tanto para o regime de plena carga quanto para o regime de carga parcial, sem qualquer interferência humana, garantindo assim maior confiabilidade aos dados de performance adquiridos.

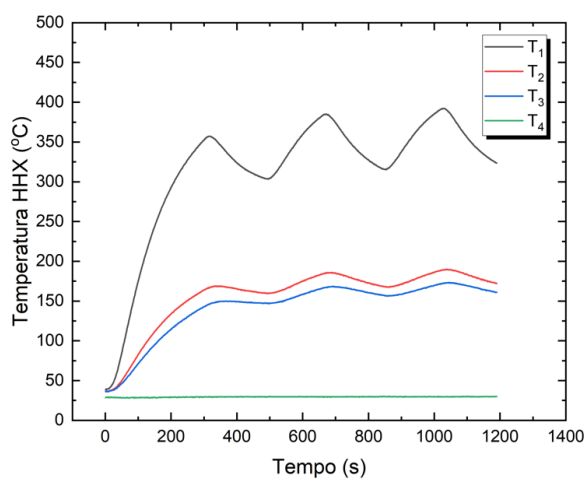
5.3.1 Perfis de temperatura no HHX

A Figura 5.17 apresenta os perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX-000 do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com potência de aquecimento de plena carga e velocidade de escoamento V_1 .

Figura 5.17 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-000 do TEGea em plena carga e módulos termoeletricos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



(a)



(b)

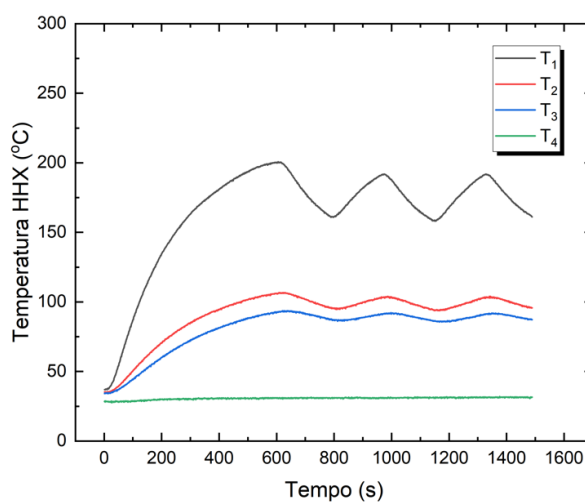
Analisando a Figura 5.17 observa-se que a queda de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX é cerca de $(T_1-T_2) = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $(T_2-T_3) = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoeletrônicos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme prescrito na literatura especializada.

A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-000 é cerca de $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoeletrônicos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

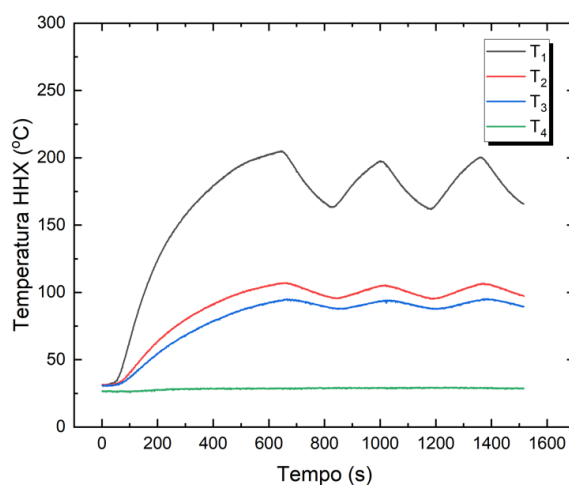
Fazendo-se uma análise comparativa das Figuras 5.17 (a) e 5.17 (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) exibem comportamentos semelhantes. Isso se justifica em razão de ser o mesmo teste aplicado em ambas configurações do protótipo de TEGea.

A Figura 5.18 mostra perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX-000 do protótipo de TEGea funcionando com potência de aquecimento em carga parcial e velocidade de escoamento V2.

Figura 5.18 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-000 do TEGea em carga parcial e módulos termoeletrônicos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



(a)



(b)

Analisando a Figura 5.18 observa-se que a queda de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-000 é cerca de $(T_1 - T_2) = 75\text{ °C}$ e $(T_2 - T_3) = 15\text{ °C}$, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoeletrônicos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme prescrito na literatura especializada.

Neste caso, o pico máximo de temperatura na superfície externa do HHX-000 é cerca de 210 °C , não superando o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoeletrônicos, sem comprometimento da sua integridade estrutural.

Em uma análise comparativa das Figuras 5.18 (a) e 5.18 (b), constata-se que os perfis de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) apresentam comportamentos similares, uma vez que foi aplicado o mesmo teste para as configurações do TEGea com TEM HZ-14HV e HZ-14.

Os perfis de temperatura da superfície externa do permutador de calor HHX-150 do TEGea são mostrados na Figura 5.19 para o regime de plena carga e velocidade de escoamento V_1 .

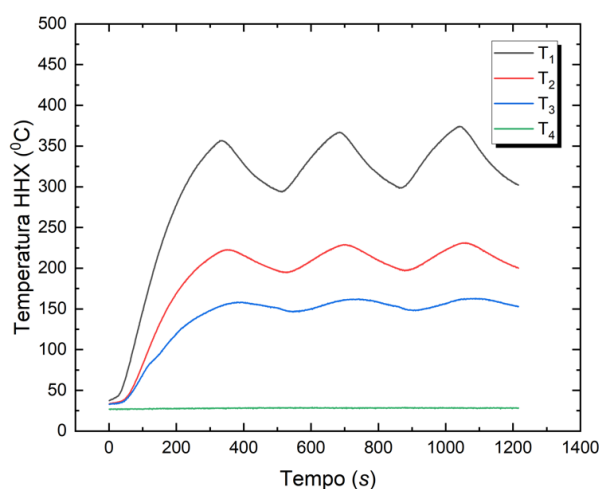
Das curvas da Figura 5.19 percebe-se que a diferença média de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-150 é cerca de $(T_1 - T_2) = 150\text{ °C}$ e $(T_2 - T_3) = 75\text{ °C}$, indicando que a potência elétrica gerada dos módulos termoeletrônicos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme consolidado na literatura especializada.

A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-150 é cerca de 375 °C , não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoeletrônicos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

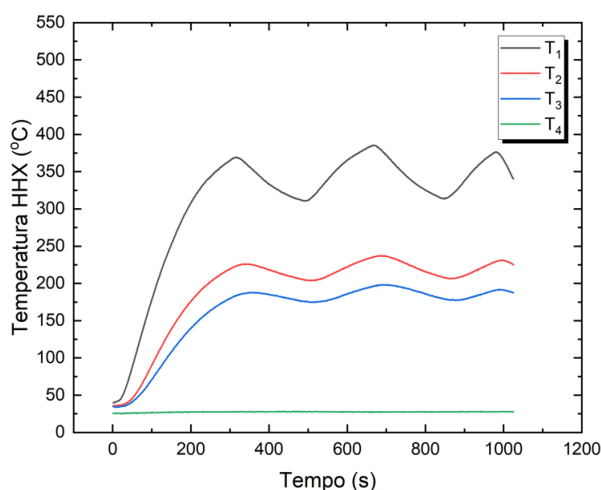
Fazendo-se uma análise comparativa das Figuras 5.19 (a) e 5.19 (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) são idênticos em quase toda extensão do teste do TEGea, exceto na faixa de tempo entre 400 e 700 segundos.

Neste intervalo de tempo, constata-se pequenas distorções no perfil de temperatura T_1 e isso pode ser atribuído à instabilidade momentânea da tensão elétrica da rede que alimenta a resistência de aquecimento da bancada experimental de teste do TEGea.

Figura 5.19 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-150 do TEGea em plena carga e módulos termoeletrônicos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



(a)



(b)

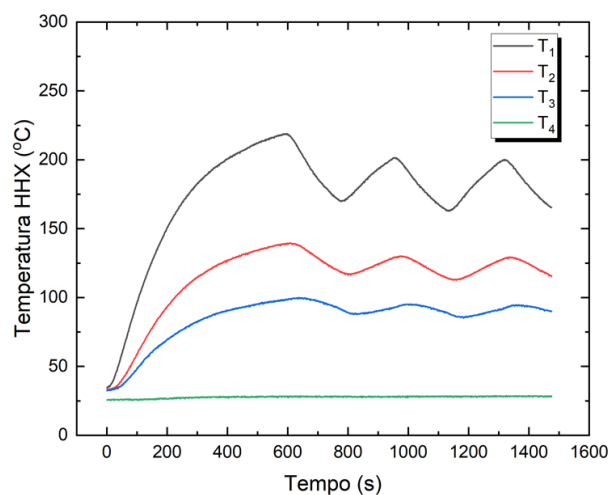
Portanto, uma variação nos parâmetros da rede elétrica que alimenta a resistência

elétrica de aquecimento do ar na bancada experimental de TEGea, tem reflexos nos perfis de temperatura do permutador de calor da fonte quente.

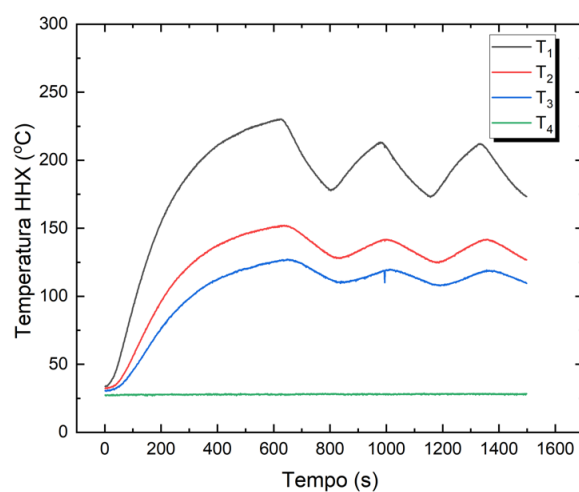
A Figura 5.20 apresenta os perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX-150 do protótipo de gerador termoeletrônico de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com potência de aquecimento de carga parcial e velocidade de escoamento V2.

Na Figura 5.20 verifica-se que a diferença média de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-150 é cerca de $(T_1 - T_2) = 100\text{ °C}$ e $(T_2 - T_3) = 30\text{ °C}$, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoeletrônicos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme consolidado na literatura especializada.

Figura 5.20 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-150 do TEGea em carga parcial e módulos termoeletrônicos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



(a)



(b)

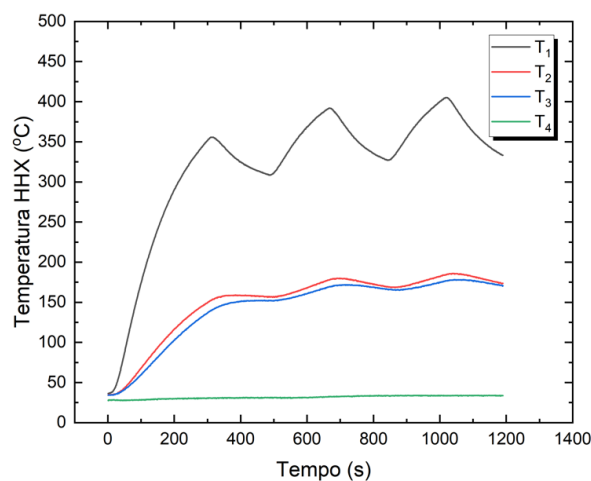
A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-150 é cerca de 200 °C, não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoeletricos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

Fazendo-se uma análise comparativa das Figuras 5.20 (a) e 5.20 (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T1, T2, T3 e T4) são idênticos em toda extensão do teste do TEGa uma vez que as condições de teste do TEGa são iguais, exceto os módulos termoeletricos que aplicado em cada caso que pode ser do tipo HZ-14V ou HZ-14HV.

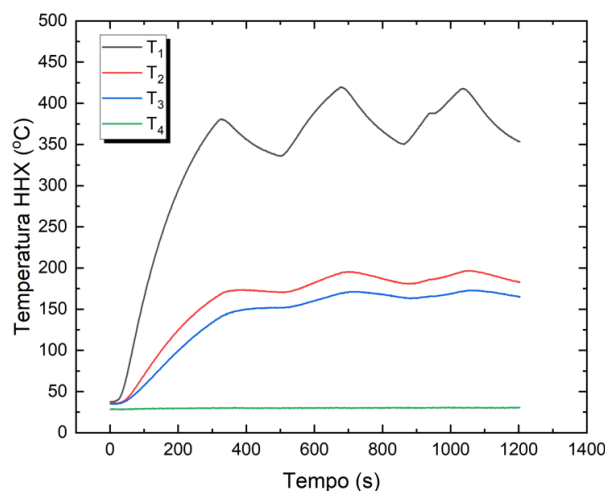
Esta forte semelhança dos perfis de temperatura (T1, T2, T3 e T4) do HHX150 também decorre da estabilidade de energia elétrica que alimenta a resistência de aquecimento da bancada de teste do TEGa e da qualidade do sistema de controle da potência de aquecimento do ar que consegue reproduzir fielmente os parâmetros operacionais de teste do TEGa.

A Figura 5.21 apresenta os perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX-250 do protótipo de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGa) funcionando com potência de aquecimento de plena carga e velocidade de escoamento V_1 .

Figura 5.21 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-250 do TEGa em plena carga e módulos termoeletricos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



(a)



(b)

Na Figura 5.21 a diferença média de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-250 é cerca de $(T_1 - T_2) = 200\text{ °C}$ e $(T_2 - T_3) = 30\text{ °C}$, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoeletrônicos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme consolidado na literatura especializada.

A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-250 é cerca de 400 °C , não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoeletrônicos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

Fazendo-se uma análise comparativa das Figuras 5.21 (a) e 5.21 (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) são muito semelhantes em toda extensão do teste do TEGea uma vez que as condições de teste do TEGea são iguais, a exceção dos módulos termoeletrônicos que aplicado em cada caso que pode ser do tipo HZ-14V ou HZ-14HV.

Esta forte semelhança dos perfis de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) do HHX250 também decorre da estabilidade de energia elétrica que alimenta a resistência de aquecimento da bancada de teste do TEGea e da qualidade do sistema de controle da potência de aquecimento do ar que consegue reproduzir fielmente os parâmetros operacionais de teste do TEGea.

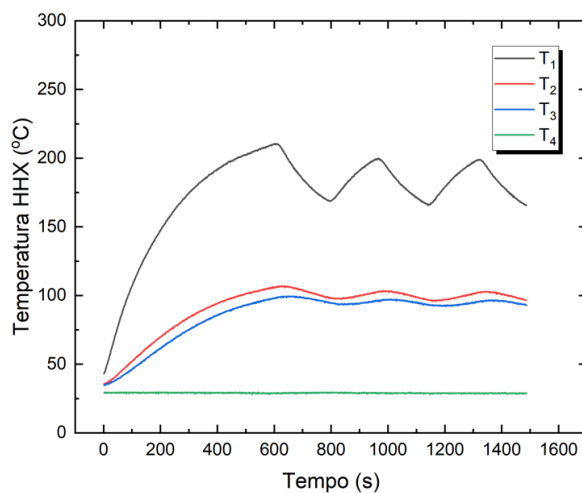
A Figura 5.22 apresenta os perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX-250 do protótipo de gerador termoeletrônico de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com potência de aquecimento de carga parcial e velocidade de escoamento V2.

Na Figura 5.22 observa-se que a diferença média de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-250 é cerca de $(T_1-T_2) = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $(T_2-T_3) = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoeletrônicos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme consolidado na literatura especializada. A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-250 é cerca de $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoeletrônicos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

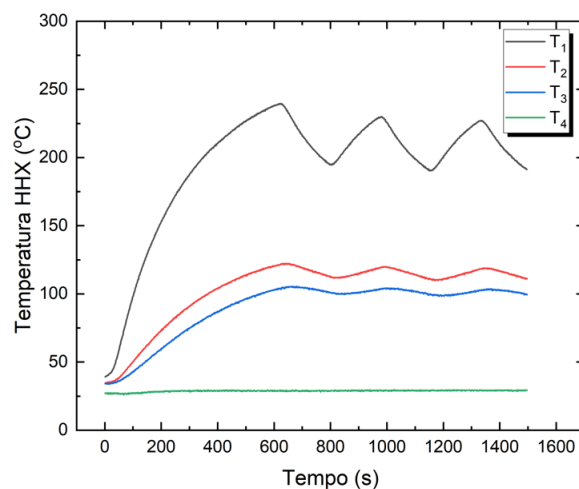
Fazendo-se uma análise comparativa das Figuras 5.22 (a) e 5.22 (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) são muito semelhantes em toda extensão do teste do TEGa uma vez que as condições de teste do TEGa são iguais, exceto os módulos termoeletrônicos que aplicado em cada caso que pode ser do tipo HZ-14V ou HZ-14HV.

Esta forte semelhança dos perfis de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) do HHX250 também decorre da estabilidade de energia elétrica que alimenta a resistência de aquecimento da bancada de teste do TEGa e da qualidade do sistema de controle da potência de aquecimento do ar que consegue reproduzir fielmente os parâmetros operacionais de teste do TEGa.

Figura 5.22 Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-250 do TEGa em carga parcial e módulos termoeletrônicos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



(a)



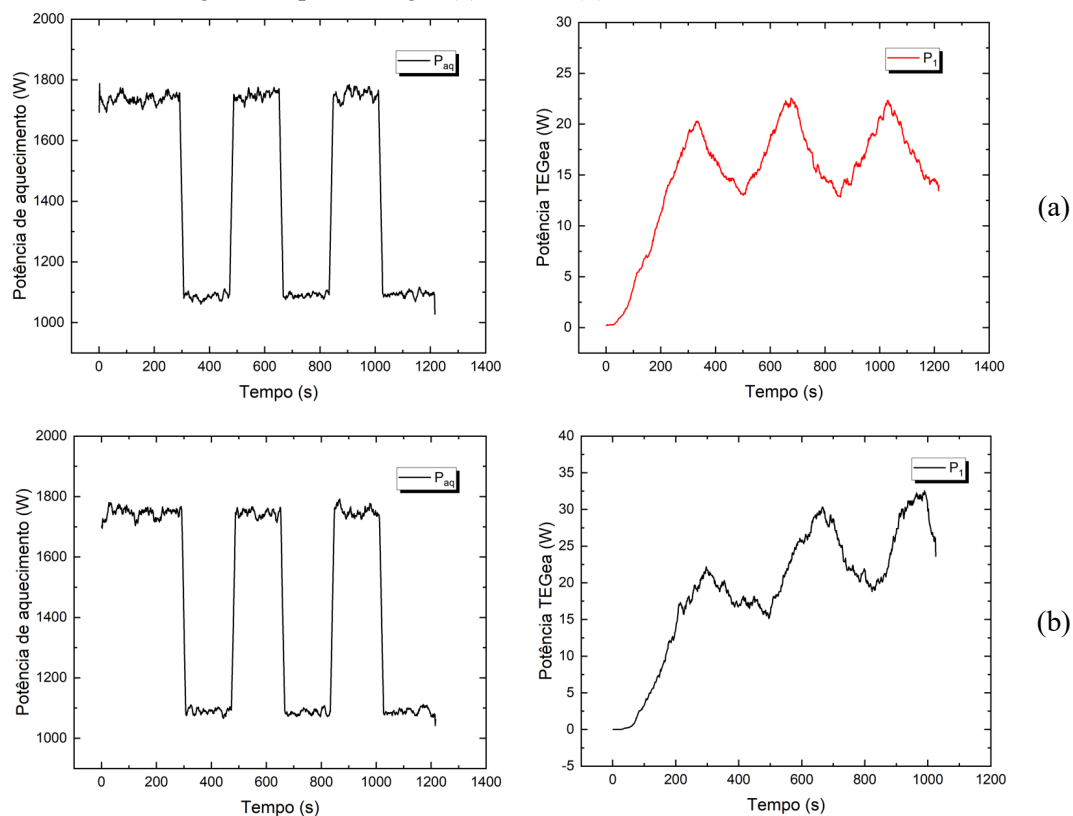
(b)

Em análise comparativa da eficiência de captação de calor das diferentes configurações do permutador de calor da fonte quente (HHX-000, HHX-150 e HHX250), verifica-se que o HHX-250 apresenta temperaturas médias ligeiramente superiores às configurações HHX150 e HHX-000 alcançando temperatura máxima da ordem de 400 °C. A eficiência de captação de calor de HHX-000 e HHX-150 são praticamente iguais para as condições de testes mostradas na tabela 4.7.

5.3.2 Potências de aquecimento e do TEGea

A Figura 5.23 mostra a potência de aquecimento e a potência termoelétrica do protótipo de TEGea em regime de plena carga funcionando com permutador de calor HHX-000 e velocidade de escoamento V1.

Figura 5.23 Potências de aquecimento e termoeétrica do protótipo de TEGea com HHX-000 em regime de plena carga: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV

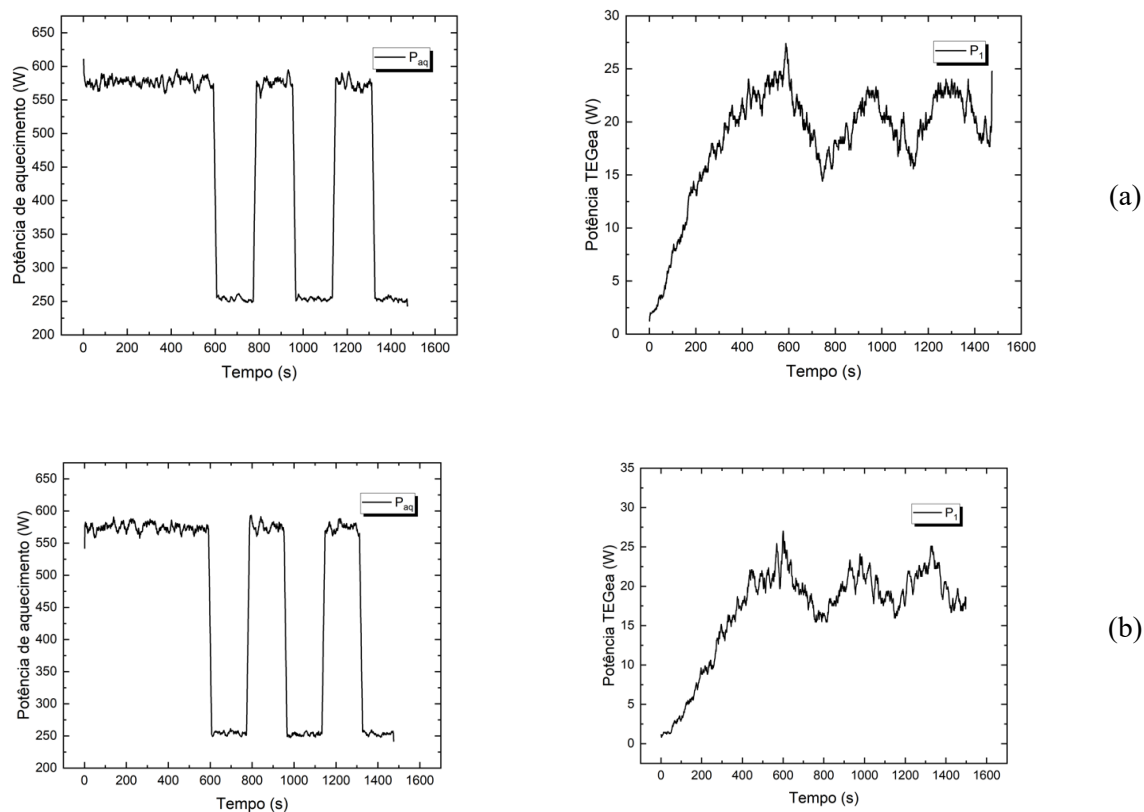


As Figura 5.23 (a) e (b) revelam que as curvas de potência de aquecimento apresentam um comportamento similar com pequenas variações nos níveis de potência máximo e mínimo que pode ser atribuído à flutuação da tensão da rede elétrica.

Das Figura 5.23 (a) e (b) observa-se que a potência termoeétrica produzida pelo protótipo de TEGea tem melhor performance em regime de plena carga funcionando com os módulos termoeétricos HZ-14HV com pico de 32 W do que com os módulos termoeétricos HZ-14 que apresenta pico de 22 W.

A Figura 5.24 apresenta a potência de aquecimento e a potência termoeétrica do protótipo de TEGea em regime de carga parcial funcionando com permutador de calor HHX-000 e velocidade de escoamento V2.

Figura 5.24 Potências de aquecimento e termoeétrica do protótipo de TEGe com HHX-000 em regime de carga parcial: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV

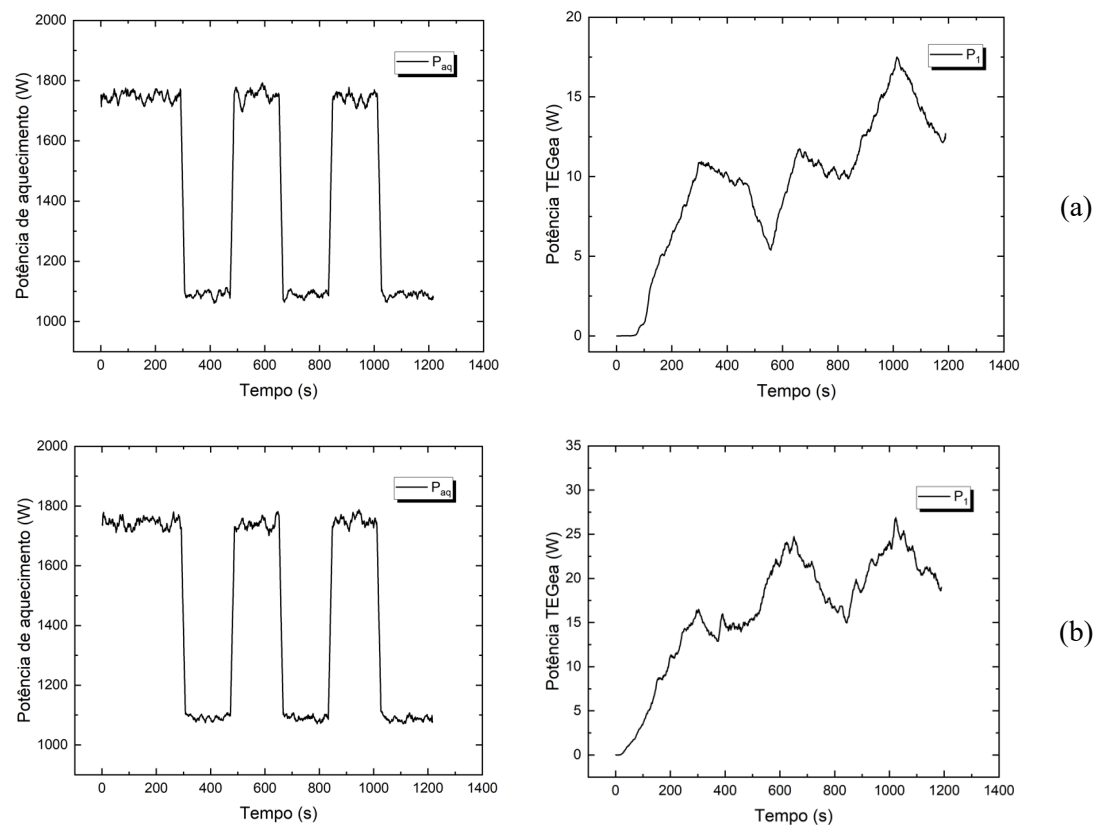


Examinando as Figuras 5.24 (a) e (b), nota-se que as curvas de potência de aquecimento são semelhantes, com pequenas variações nos níveis de potência máxima e mínima, o que pode ser atribuído à flutuação da tensão da rede elétrica.

Observando as Figuras 5.24 (a) e (b), verifica-se, neste caso, que o protótipo de TEGe com HZ-14HV apresenta potência termoeétrica gerada semelhante aos módulos termoeétricos HZ-14 sob mesmas condições de teste. Os picos máximos de potência do TEGe são cerca de 27,5W em ambos os casos.

A Figura 5.25 ilustra as potências de aquecimento e termoeétrica do protótipo de TEGe em regime de plena carga operando com permutador de calor HHX-150 e velocidade de escoamento V1.

Figura 5.25 Potências de aquecimento e termoeétrica do protótipo de TEGea com HHX-150 em regime de plena carga: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV

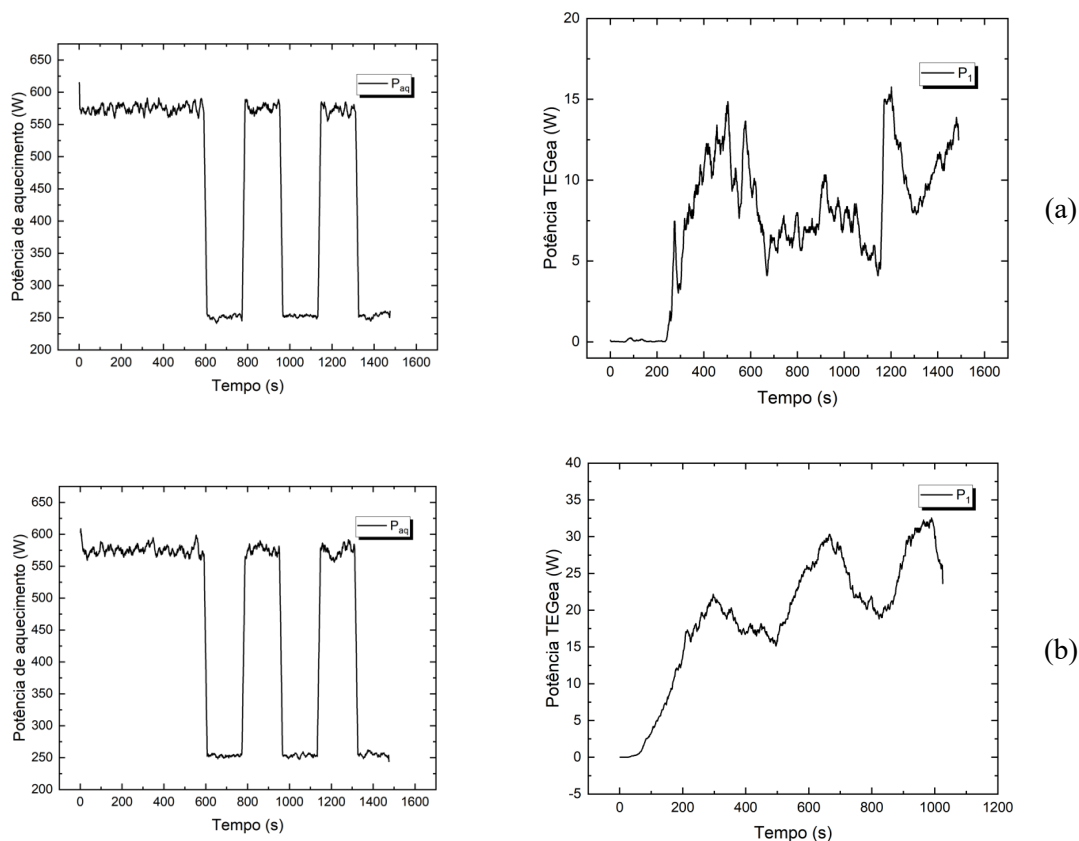


Analisando as Figura 5.25 (a) e (b) é possível identificar que as curvas de potência de aquecimento são quase que idênticas apresentando pequenas variações nos níveis de potência máximo e mínimo que pode ser atribuído à flutuação da tensão da rede elétrica.

Neste caso, é possível observar que a potência termoeétrica produzida pelo protótipo de TEGea tem melhor performance em regime de plena carga funcionando com os módulos termoeétricos HZ-14HV, com picos aproximados de 25 W e 27 W, enquanto para TE HZ-14 o pico máximo não supera 20 W.

A Figura 5.26 apresenta a potência de aquecimento e a potência termoeétrica do protótipo de TEGea em regime de carga parcial funcionando com permutador de calor HHX-150 e velocidade de escoamento V2.

Figura 5.26 Potências de aquecimento e termoeétrica do protótipo de TEGea com HHX-150 em regime de carga parcial: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV

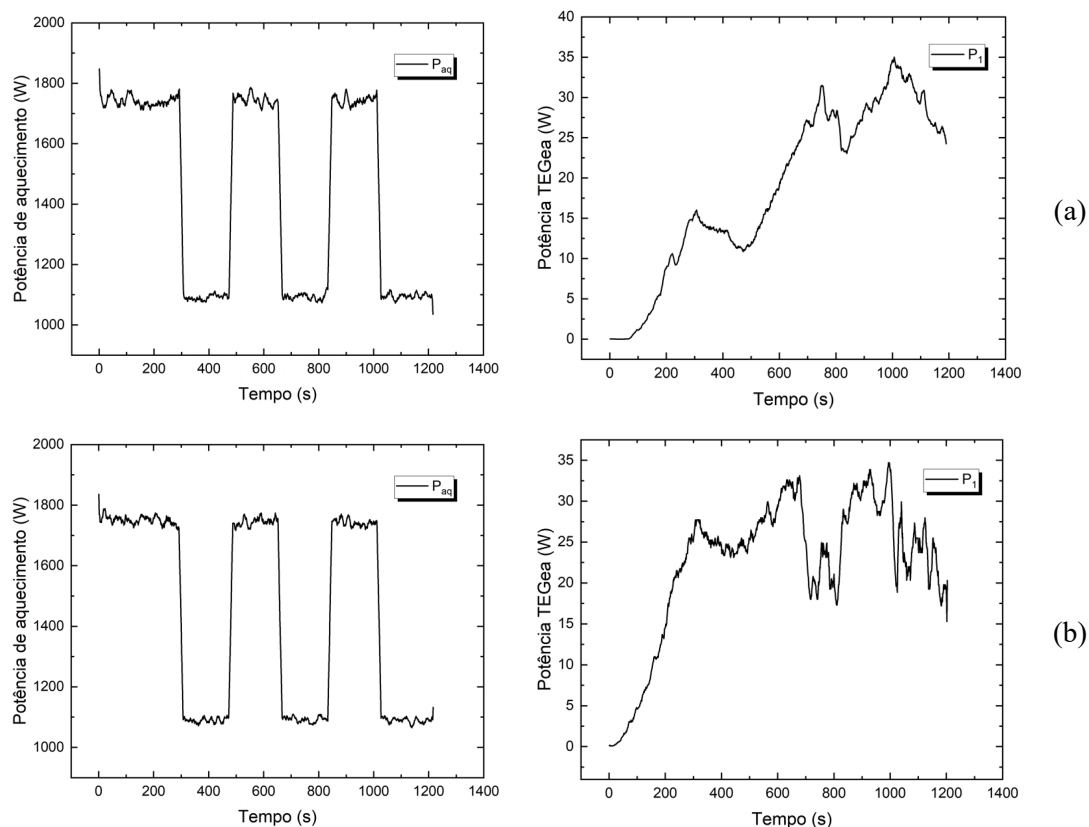


As Figuras 5.26 (a) e (b) revelam comportamento das curvas de potência de aquecimento muito próximas, exibindo pequenas variações nos níveis de potência máximo e mínimo que pode ser atribuído à flutuação da tensão da rede elétrica.

Neste caso, uma análise comparativa das Figuras 5.26 (a) e (b) mostra um desempenho do TEGea com HZ-14HV do que com HZ-14, apresentando picos de potência termoeétrica cerca de 32 W e 15 W, respectivamente.

A Figura 5.27 exibe a potência de aquecimento e a potência termoeétrica do protótipo de TEGea em regime de plena carga funcionando com permutador de calor HHX-250 e velocidade de escoamento V1.

Figura 5.27 Potências de aquecimento e termoelétrica do protótipo de TEGea com HHX-250 em regime de plena carga: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV

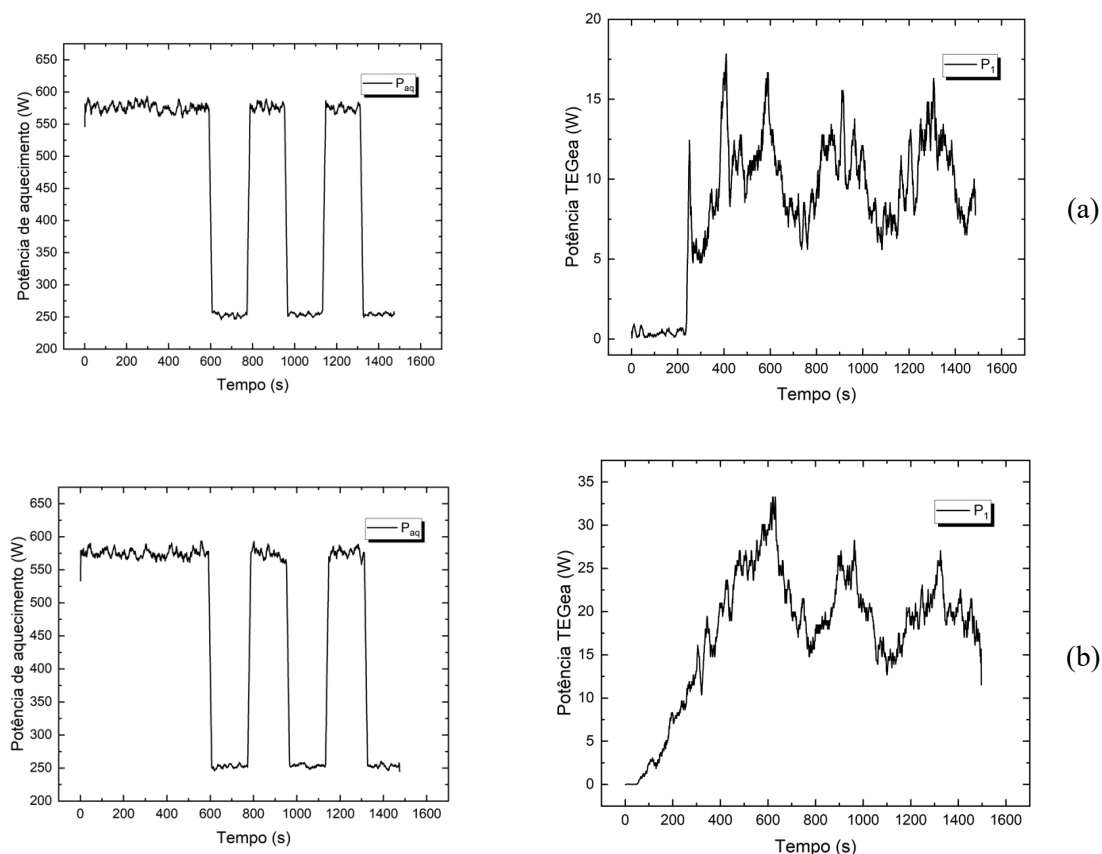


Ao examinar as Figuras 5.27 (a) e (b), fica evidenciado que as curvas de potência de aquecimento apresentam pouca divergência, com pequenas variações nos níveis de potência máxima e mínima, possivelmente devido à flutuação da tensão da rede elétrica.

Das Figuras 5.27 (a) e (b), torna-se evidente que o protótipo de TEGea apresenta melhor desempenho em plena carga quando equipado com os módulos termoelétricos HZ-14HV, atingindo uma potência TEGea elevada em cerca de 250 segundos em diante, em comparação com os módulos HZ-14, que desenvolve uma evolução crescente da potência atingindo o pico em aproximadamente 700 segundos.

A Figura 5.28 mostra a potência de aquecimento e a potência termoelétrica do protótipo de TEGea em regime de carga parcial operando com permutador de calor HHX-250 e velocidade de escoamento V2.

Figura 5.28 Potências de aquecimento e termoeétrica do protótipo de TEGeA com HHX-250 em regime de carga parcial: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



Analisando as Figura 5.28 (a) e (b) é possível identificar que as curvas de potência de aquecimento são similares, apresentando pequenas variações nos níveis de potência máximo e mínimo que pode ser atribuído à flutuação da tensão da rede elétrica.

Das Figura 5.28 (a) e (b) é possível observar que a potência termoeétrica produzida pelo protótipo de TEGeA tem melhor performance em regime de plena carga funcionando com os módulos termoeétricos HZ-14HV com picos máximos de aproximadamente 45% superior do que com TE HZ-14. Também se evidencia em ambos os casos a flutuação dos níveis de potência termoeétrica produzida pelo TEGeA, característico do seu funcionamento em regime transiente.

5.3.3 Mapas termográficos do HHX

As Figuras 5.29 e 5.30 apresentam mapas termográficos da superfície externa do permutador de calor HHX-000 adjacente aos módulos termoeletrônicos do protótipo de TEGea.

Figura 5.29 Mapas termográficos do permutador de calor HHX-000 até 156,4 °C

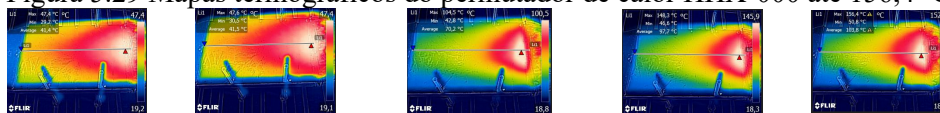
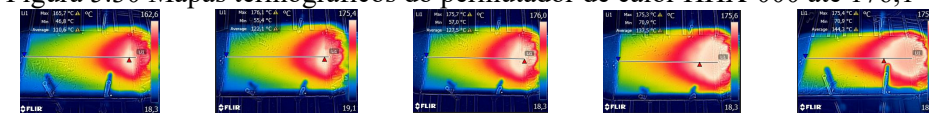


Figura 5.30 Mapas termográficos do permutador de calor HHX-000 até 176,1 °C



Em razão da limitação câmera termográfica FLIR C3, os picos máximos de temperatura nos mapas termográficos das Figuras 5.29 e 5.30 são limitados, não sendo possível capturar na íntegra, todos os níveis de temperatura que foram mensurados com outros sensores de temperatura da bancada experimental do TEGea.

Os picos máximos de temperatura observados nos mapas termográficos das Figuras 5.29 e 5.30 são respectivamente de 156,4 °C a 176,1 °C, ocorrendo até 1/3 do comprimento do permutador de calor HHX-000 a jusante da borda de entrada do ar quente.

Analisando estes mapas termográficos observa-se que os gradientes de temperatura na superfície do permutador de calor HHX-000 são muito mais intensos na direção paralela ao escoamento do ar quente do que na direção transversal.

A intensidade dos gradientes de temperatura na superfície externa dos permutadores de calor (HHX-000, HHX-150 e HHX-250) do TEGea e na direção paralela ao escoamento do ar quente também pode ser observada através dos perfis de temperatura das Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22.

No dimensionamento do protótipo de TEGea desta pesquisa, a análise de mapas termográficos foi uma etapa muito importante para definição das dimensões e topologias dos permutadores de calor HHX.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esta pesquisa experimental comprovou a hipótese inicial investigativa de que a inserção de minicanais corrugados nas superfícies das aletas do permutador de calor HHX contribui para maior captação de calor residual dos gases de exaustão na superfície quente em contato com os módulos termoeletrônicos em razão dos efeitos sinérgicos de (i) aumento da área de contato dos gases quentes (ii) redução da massa da aleta (iii) incremento da turbulência no canal do HHX.

Estes efeitos favorecem ainda o aumento da potência termoeletrônica gerada pelo protótipo de TEGe, uma vez a potência de conversão termoeletrônica é fortemente influenciada pelo aumento do gradiente de temperatura entre as fontes quente e fria.

Outras conclusões alicerçadas nos resultados obtidos desta pesquisa são:

- I. A bancada experimental desenvolvida apresenta design modular e flexível, podendo ser facilmente adaptada para testes em regime transiente de diferentes potências e configurações de protótipos de TEGe;
- II. A bancada experimental instrumentada e com gerenciamento via plataforma Arduino, permite avaliar a performance de protótipos de TEGe com diferentes taxas de aquecimento e velocidades de escoamento dos gases quentes;
- III. Os sistemas de controle e monitoramento da potência de aquecimento e vazão mássica do ar, desenvolvidos na plataforma do Arduino, permitem a realização de testes de geradores termoeletrônicos de exaustão automotiva em regime transiente de forma automática, sem nenhuma interferência do operador, garantindo excelente reprodutividade dos testes e mais confiabilidade dos resultados de performance do protótipo de TEGe;
- IV. As seções de propulsão e de aquecimento do ar da bancada experimental podem ser facilmente adaptadas para outras faixas de potências de geradores termoeletrônicos de exaustão automotiva;
- V. A simulação de TEGe em regime permanente com o modelo numérico Multifísico Fluido-Térmico-Elétrico (M-FTE) no software ANSYS demonstrou que a potência termoeletrônica do TEG aumenta com a elevação da temperatura da fonte quente e com o aumento da vazão dos gases quentes;
- VI. Pelas características geométricas e microestruturais analisadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície externa do permutador de calor da fonte quente (HHX) em contato com os módulos termoeletrônicos TEGe, infere-se que o componente original destes permutadores de calor reuni condições típicas de processamento por extrusão a quente (material compacto, sem porosidade e com linhas suaves de deformação na superfície da peça;

- VII. O projeto conceitual do permutador de calor HHX bipartido de aletas internas retangulares com espaçamento equidistante e minicanais corrugados de geometria retangular na direção preferencial do escoamento dos gases quentes é de fácil fabricação em grande escala por processo de extrusão e apresenta ainda manutenção simples para remoção de partículas acumuladas proveniente dos gases residuais de exaustão de motores de combustão interna;
- VIII. Os testes do rugosímetro possibilitaram mensurar a diminuição da rugosidade superficial (asperezas) das superfícies dos permutadores de calor HHX e HHC promovida pelo polimento em máquina fresadora CNC, contribuindo para menor resistência térmica de contato e maior eficiência do processo de transferência de calor por condução;
- IX. A análise termográfica foi uma ferramenta muito útil para definição do permutador de calor HHX uma vez que permitia identificar rapidamente variações dos gradientes térmicos na superfície do permutador de calor da fonte quente (HHX) para diferentes dimensões básicas em testes de performance preliminares realizados com auxílio de soprador térmico com fonte de calor;
- X. Através da análise comparativa dos resultados obtidos nos testes de performance dos protótipos de TEGea foi possível concluir que a inserção de minicanais corrugados na superfície das aletas internas do permutador de calor HHX promoveu pequeno aumento da temperatura da fonte quente contribuindo para maior geração de potência termoelétrica do protótipo de TEGea.
- XI. Finalmente, para a continuidade desta pesquisa e amplificação do conhecimento, recomenda-se fortemente o desenvolvimento de software capaz de reproduzir, em escala de laboratório para avaliação experimental da performance de TEGea, o ciclo de condução real tipo estrada ou urbano de um motor veicular automotivo.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI G. JR. ARMANDO, ANDRÉ R. DE SOUSA, Fundamentos de Metrologia científica e industrial. 1ª edição, editora Manole, 407p. 2008, ISBN 978-85-204-2116-1
- ALFRED OLOO OCHIENG, TAMER F. MEGAHED, SHINICHI OOKAWARA, HAMDY HASSAN, Comprehensive review in waste heat recovery in different thermal energy-consuming processes using thermoelectric generators for electrical power generation, Process Safety and Environmental Protection, Volume 162, 2022, Pages 134-154, ISSN 0957-5820.
- AMIN TAHERI, MOHAMMADAMIR GHASEMIAN MOGHADAM, MAJID MOHAMMADI, MOHAMMAD PASSANDIDEH-FARD, MOHAMMAD SARDARABADI, A new design of liquid-cooled heat sink by altering the heat sink heat pipe application: Experimental approach and prediction via artificial neural network, Energy Conversion and Management, Volume 206, 2020, 112485, ISSN 0196-8904
- ARIDI, R.; FARAJ, J.; ALI, S.; LEMENAND, T.; KHALED, M. Thermoelectric Power Generators: State-of-the-Art, Heat Recovery Method, and Challenges. Electricity 2021, 2, 359–386.
- BARBOSA JÚNIOR, C. R. F., DOS SANTOS, C. A. C., BARBOSA, C. R. F., DAS NEVES, E. E., & DAS NEVES, J. C. DE C. S. (2023). Simulação da performance de gerador termoelétrico para recuperação da energia dos gases de exaustão automotiva. Brazilian Journal of Development, 9(10), 27762–27779. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n10-020>
- BARBOSA JÚNIOR, C. R. F., DOS SANTOS, C. A. C., BARBOSA, C. R. F., DA SILVA JÚNIOR, E. M., & DE FRANÇA, R. L. V. (2024). Desenvolvimento de bancada experimental para avaliação em regime transiente de gerador termoelétrico de exaustão automotiva. Brazilian Journal of Development, 10(1), 2106–2120. <https://doi.org/10.34117/bjdv10n1-128>
- DANIEL CHAMPIER, Thermoelectric generators: A review of applications, Energy Conversion and Management, Volume 140, 2017, Pages 167-181, ISSN 0196-8904.
- DE OLIVEIRA, R.L., 2018, Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil. 250 p.
- DING LUO, RUOCHEN WANG, WEI YU, Comparison and parametric study of two theoretical modeling approaches based on an air-to-water thermoelectric generator system, Journal of Power Sources, Volume 439, 2019, 227069, ISSN 0378-7753.

- DING LUO, RUOCHEN WANG, WEI YU, WEIQI ZHOU, A novel optimization method for thermoelectric module used in waste heat recovery, *Energy Conversion and Management*, Volume 209, 2020, 112645, ISSN 0196-8904.
- DING LUO, RUOCHEN WANG, WEI YU, WEIQI ZHOU, Performance evaluation of a novel thermoelectric module with BiSbTeSe - based material, *Applied Energy*, Volume 238, 2019, Pages 1299-1311, ISSN 0306-2619.
- DING LUO, RUOCHEN WANG, WEI YU, ZEYU SUN, XIANGPENG MENG, Modelling and simulation study of a converging thermoelectric generator for engine waste heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, Volume 153, 2019, Pages 837-847, ISSN 1359-4311,
- DING LUO, RUOCHEN WANG, WEI YU, ZEYU SUN, XIANGPENG MENG, Theoretical analysis of energy recovery potential for different types of conventional vehicles with a thermoelectric generator, *Energy Procedia*, Volume 158, 2019, Pages 142-147, ISSN 1876-6102,
- DING LUO, RUOCHEN WANG, YUYING YAN, ZEYU SUN, WEIQI ZHOU, RENKAI DING, Comparison of different fluid-thermal-electric multiphysics modeling approaches for thermoelectric generator systems, *Renewable Energy*, Volume 180, 2021, Pages 1266-1277, ISSN 0960-1481,
- DING LUO, YUYING YAN, YING LI, XUELIN YANG, HAO CHEN, Exhaust channel optimization of the automobile thermoelectric generator to produce the highest net power, *Energy*, Volume 281, 2023, 128319, ISSN 0360-5442.
- DING LUO, ZEYU SUN, RUOCHEN WANG, Performance investigation of a thermoelectric generator system applied in automobile exhaust waste heat recovery, *Energy*, Volume 238, Part B, 2022, 121816, ISSN 0360-5442.
- DING LUO, ZEYU SUN, RUOCHEN WANG, Performance investigation of a thermoelectric generator system applied in automobile exhaust waste heat recovery, *Energy*, Volume 238, Part B, 2022, 121816, ISSN 0360-5442,
- DING LUO, ZIHAO WU, YUYING YAN, DONGXU JI, ZIMING CHENG, RUOCHEN WANG, YING LI, XUELIN YANG, Optimal design of a heat exchanger for automotive thermoelectric generator systems applied to a passenger car, *Applied Thermal Engineering*, Volume 227, 2023, 120360, ISSN 1359-4311.
- FARIA, M.A.A., 2016, Conexão elétrica de planta de geração termoelétrica baseada no efeito Seebeck. Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás. Goiania, Brasil. 129 p.
- FARIAS, S.R.A., 2009, Protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido: cogeração a gás. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. 98 p.

- FARZAD TOHIDI, SHAHRIYAR GHAZANFARI HOLAGH, ATA CHITSAZ, Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications, *Applied Thermal Engineering*, Volume 201, Part A, 2022, 117793, ISSN 1359-4311.
- FITRIANI, R. OVIK, B.D. LONG, M.C. BARMA, M. RIAZ, M.F.M. SABRI, S.M. SAID, R. SAIDUR, A review on nanostructures of high-temperature thermoelectric materials for waste heat recovery, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 64, 2016, Pages 635-659, ISSN 1364-0321,
- GIELENA, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D.; BAZILIAN, M.D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Rev.* 2019, 24, 38–50.
- HAN, L., 2014, High temperature thermoelectric properties of ZnO based materials. PhD Thesi. Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark.106p
- <https://hi-z.com/product/hz-14-thermoelectric-module/> acessado em 15.07.2023
- HUSSAM JOUHARA, ALINA ŻABNIENSKA-GÓRA, NAVID KHORDEHGAH, QUSAY DORAGHI, LUJEAN AHMAD, LES NORMAN, BRIAN AXCELL, LUIZ WROBEL, SHENG DAI, Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications, *International Journal of Thermofluids*, Volume 9, 2021, 100063, ISSN 2666-2027.
- J. P. HOLMAN. *Experimental Methods for Engineers*, 8^a edição. Editora McGraw-Hill, 739 p. 2011, ISBN 978-0073529301
- J. XIMINIS, A. MASSAGUER, E. MASSAGUER, Towards compliance with the prospective EUROVII NO_x emissions limit using a thermoelectric aftertreatment heater, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 36, 2022, 102182, ISSN 2214-157X,
- JIFU HE, KEWEN LI, LIN JIA, YUHAO ZHU, HONGYANG ZHANG, JIANSHE LINGHU, Advances in the applications of thermoelectric generators, *Applied Thermal Engineering*, Volume 236, Part D, 2024, 121813, ISSN 1359-4311
- JOHN B. HEYWOOD 2018. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education. ISBN 9781260116106
- KRZYSZTOF T. WOJCIECHOWSKI, MARCIN BORCUCH, MICHAŁ MUSIAŁ, PAWEŁ WYZGA, A testbed for performance studies of gas–liquid thermoelectric generators for waste heat harvesting, *Measurement*, Volume 203, 2022, 111933, ISSN 0263-2241.

KUNAL SANDIP GARUD, JAE-HYEONG SEO, YOU-MA BANG, YOUNG-DUG PYO, CHONG-PYO CHO, MOO-YEON LEE, DONG-YEON LEE, Energy, exergy, environmental sustainability and economic analyses for automotive thermoelectric generator system with various configurations, Energy, Volume 244, Part A, 2022, 122587, ISSN 0360-5442.3

MALIK, S.A., 2018, Contacts and Interface Evolution in Thermoelectric Modules. PhD Thesi. Department of Energy Conversion and Storage, Technical University of Denmark. 106p.

MANABENDRA SAHA, OWEN TREGENZA, JEMMA TWELFTREE, CHRIS HULSTON, A review of thermoelectric generators for waste heat recovery in marine applications, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 59, 2023, 103394, ISSN 2213-1388.

MINGHUI GE, ZHENHUA LI, YUNTONG ZHAO, ZHIWEI XUAN, YANZHE LI, YULONG ZHAO, Experimental study of thermoelectric generator with different numbers of modules for waste heat recovery, Applied Energy, Volume 322, 2022, 119523, ISSN 0306-2619.

MUHAMMAD SAJID, IBRAHIM HASSAN, AZIZ RAHMAN, An overview of cooling of thermoelectric devices, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 78, 2017, Pages 15-22, ISSN 1364-0321

NESRINE JAZIRI, AYDA BOUGHAMOURA, JENS MÜLLER, BRAHIM MEZGHANI, FARES TOUNSI, MOHAMMED ISMAIL, A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications, Energy Reports, Volume 6, Supplement 7, 2020, Pages 264-287, ISSN 2352-4847.

NICOLAE VLAD BURNETE, FLORIN MARIASIU, CHRISTOPHER DEPCIK, ISTVAN BARABAS, DAN MOLDOVANU. Review of thermoelectric generation for internal combustion engine waste heat recovery. Progress in Energy and Combustion Science, Volume 91, 2022.

NORMA ABNT NBR ISO 4287, Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade, 2002.

O.H. ANDO JUNIOR, A.L.O. MARAN, N.C. HENAO, A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 91, 2018, Pages 376-393, ISSN 1364-0321.

OLIVEIRA, J.P.D., 2015, Development of a thermoelectric generator for the exhaust of a vehicle. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho. Portugal, 163 p.

- R. SAIDUR, M. REZAEI, W.K. MUZAMMIL, M.H. HASSAN, S. PARIA, M. HASANUZZAMAN, Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 8, 2012, Pages 5649-5659, ISSN 1364-0321,
- SHUBHANGI GONDANE, PRIYANSHU WATARI, NIRAJ BORKAR, NITESHGIREE PARAMANANDIGIREE, PAVAN DHONGADE, PAWAN NAGPURE, ROHIT WANJARI, Analysis of Power Generation using Waste Heat in Industries using Thermoelectric Generator, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Volume 10, 2023, Pages 114-119, ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O)
- TAE YOUNG KIM, JINWOO KWAK, BYUNG-WOOK KIM, Application of compact thermoelectric generator to hybrid electric vehicle engine operating under real vehicle operating conditions, *Energy Conversion and Management*, Volume 201, 2019, 112150, ISSN 0196-8904.
- WENLONG YANG, WENCHAO ZHU, YANG LI, CHANGJUN XIE, BINYU XIONG, YING SHI, WEI LIN, Global structural optimization of annular thermoelectric generators based on a dual-finite-element multiphysical model, *Applied Thermal Engineering*, Volume 220, 2023, 119797, ISSN 1359-4311
- X. LIU, Y.D. DENG, K. ZHANG, M. XU, Y. XU, C.Q. SU, Experiments and simulations on heat exchangers in thermoelectric generator for automotive application, *Applied Thermal Engineering*, Volume 71, Issue 1, 2014, Pages 364-370, ISSN 1359-4311.
- X.F. ZHENG, C.X. LIU, Y.Y. YAN, Q. WANG. A review of thermoelectrics research – recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 32 (2014), pp. 486-503.
- XIN GAO, SOREN JUHL ANDREASEN, MIN CHEN, SOREN KNUDSEN KOER, Numerical model of a thermoelectric generator with compact plate-fin heat exchanger for high temperature PEM fuel cell exhaust heat recovery, *international journal of hydrogen energy*, Volume 37, 2012, 8490-8498.
- YEYUN CAI, A. REZANIA, FANG DENG, L. ROSENDAHL, JIE CHEN, Comprehensive experimental study of thermoelectric generators under transient boundary conditions, *Energy Conversion and Management*, Volume 245, 2021, 114561, ISSN 0196-8904,
- YING LI, XUEHUI WANG, DING LUO, YONG SHI, YONG REN, YUYING YAN, Recent development in structural designs and thermal enhancement technologies of thermoelectric generator with different types of heat sources: A review, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Volume 4, 2023, 100180, ISSN 2772-6711.

YUNUS A. ÇENGEL, Transferencia de calor e massa – Uma abordagem prática. 3ª edição, editora McGrawHill, 905 p. 2009, ISBN 978-8577260751

ZHIQIANG NIU, HAI DIAO, SHUHAI YU, KUI JIAO, QING DU, GEQUN SHU, Investigation and design optimization of exhaust-based thermoelectric generator system for internal combustion engine, Energy Conversion and Management, Volume 85, 2014, Pages 85-101, ISSN 0196-8904,

ZU-GUO SHEN, LIN-LI TIAN, XUN LIU, Automotive exhaust thermoelectric generators: Current status, challenges and future prospects, Energy Conversion and Management, Volume 195, 2019, Pages 1138-1173, ISSN 0196-8904.

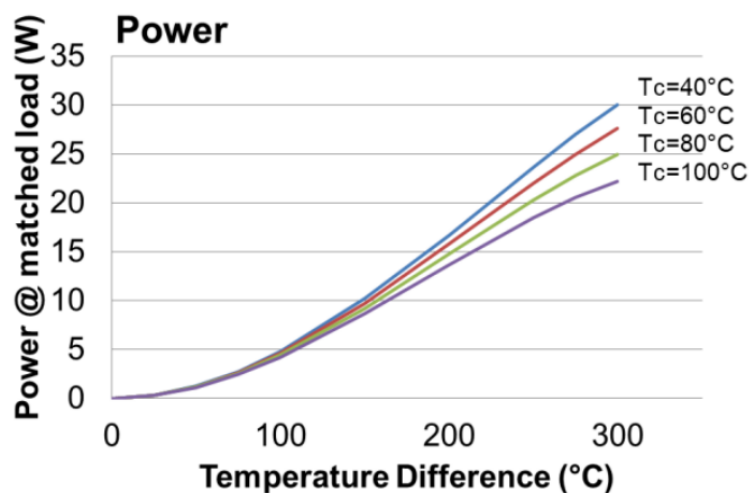
APÊNDICES

APENDICE A – Especificações técnicas dos módulos termoeletrônicos de telureto de bismuto (HZ-14HV, HZ-14 e HZ-2) utilizados no desenvolvimento do protótipo do gerador termoeletrônico de exaustão automotiva (TEG_{ea})

Figura A-1 Características térmicas e elétricas (a) Módulo HZ-14 (b) Módulo HZ-14HV e (c) Módulo HZ-2					
Thermal and Electrical Characteristics					
Parameter	Conditions	min	typ	max	units
Power	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	14.0	15	16	Watts
Open Circuit Voltage	Th=250°C, Tc=50°C	2.8	3.0	3.2	Volts
Matched load Voltage	Th=250°C, Tc=50°C	1.4	1.5	1.6	Volts
Internal Resistance	Th=250°C, Tc=50°C	0.15	0.16	0.17	Ω
	T = 25°C	0.09	0.1	0.11	Ω
Current	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	8.0	9.0	10.0	Amps
	Th=250°C, Tc=50°C @short circuit	16	18	20	Amps
Heat Flux	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	330	350	370	Watts
	Th=250°C, Tc=50°C open circuit	200	210	220	Watts
Heat Flux Density	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	9	10	11	W/cm ²
(a)					
Thermal and Electrical Characteristics					
Parameter	Conditions	min	typ	max	units
Power	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	14.0	15.5	17.0	Watts
Open Circuit Voltage	Th=250°C, Tc=50°C	7.6	8.0	8.4	Volts
Matched load Voltage	Th=250°C, Tc=50°C	3.8	4.0	4.2	Volts
Internal Resistance	Th=250°C, Tc=50°C	0.9	1.0	1.1	Ω
	T = 25°C	0.55	0.6	0.65	Ω
Current	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	3.8	4.0	4.2	Amps
	Th=250°C, Tc=50°C @short circuit	7.6	8.0	8.4	Amps
Heat Flux	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	410	430	450	Watts
	Th=250°C, Tc=50°C open circuit	200	210	220	Watts
Heat Flux Density	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	12	13	14	W/cm ²
Mass		64	65	66	grams
(b)					
Thermal and Electrical Characteristics					
Parameter	Conditions	min	typ	max	units
Power	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	2.1	2.25	2.4	Watts
Open Circuit Voltage	Th=250°C, Tc=50°C	5.7	6.0	6.3	Volts
Matched load Voltage	Th=250°C, Tc=50°C	2.85	3.0	3.15	Volts
Internal Resistance	Th=250°C, Tc=50°C	3.8	4.0	4.2	Ω
	T = 25°C	2.4	2.5	2.6	Ω
Current	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	0.71	0.75	0.79	Amps
	Th=250°C, Tc=50°C @short circuit	1.4	1.5	1.6	Amps
Heat Flux	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	47	50	53	Watts
	Th=250°C, Tc=50°C open circuit	35	38	41	Watts
Heat Flux Density	Th=250°C, Tc=50°C @matched load	6	7	8	W/cm ²
Mass		14	14.5	15	grams
(c)					
Fonte: https://hi-z.com/product/					

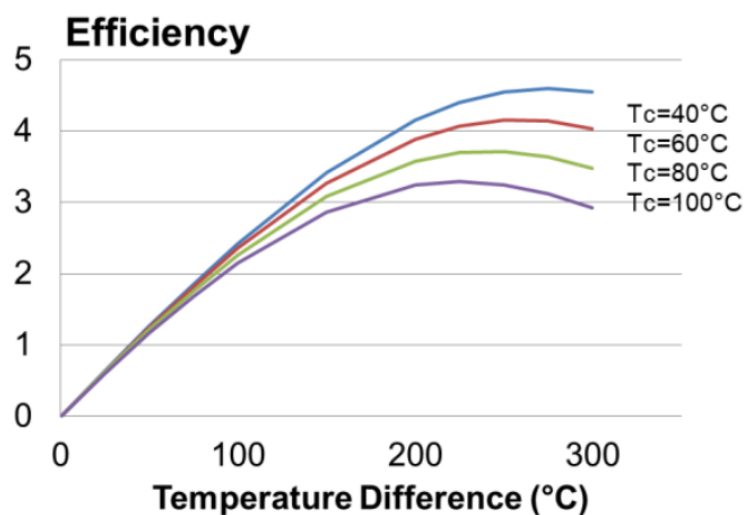
APENDICE B – Curvas de potência termoeétrica e eficiência versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria e dos TEM HZ-14HV e HZ-14.

Figura B-1 Curvas de potência termoeétrica versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria e dos TEM HZ-14HV



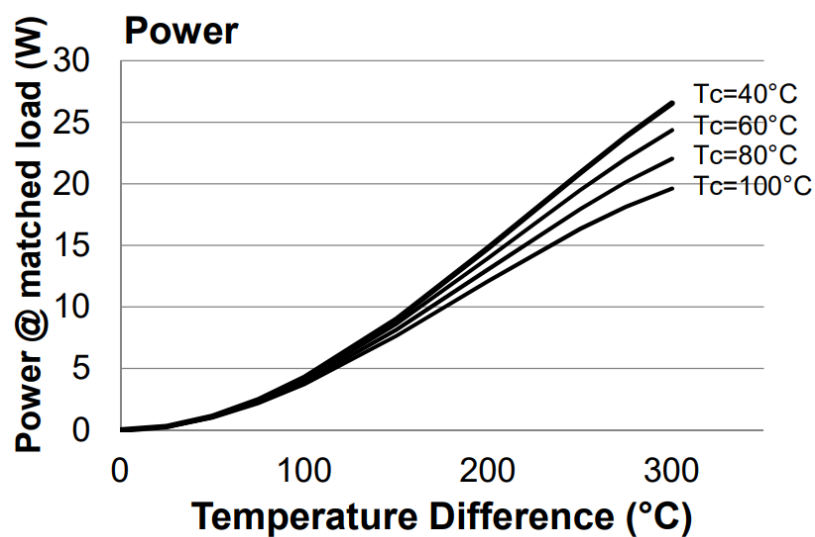
Fonte: <https://hi-z.com/product/hz-14hv-thermoelectric-module/>

Figura B-2 Curvas de eficiência versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria dos módulos termoeétricos HZ-14HV



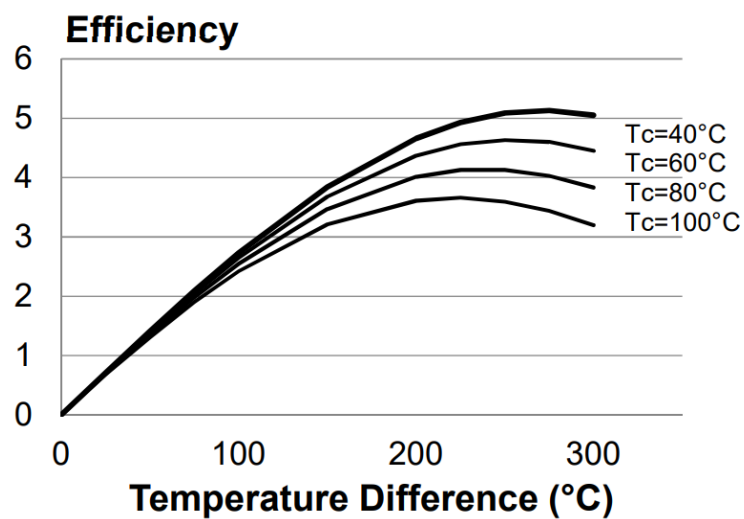
Fonte: <https://hi-z.com/product/hz-14hv-thermoelectric-module/>

Figura B-3 Curvas de potência termoeétrica versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria e dos TEM HZ-14



Fonte: <https://hi-z.com/product/hz-14-thermoelectric-module/>

Figura B-4 Curvas de eficiência versus diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria dos módulos termoeétricos HZ-14



Fonte: <https://hi-z.com/product/hz-14-thermoelectric-module/>

APENDICE C – Mapas Termográficos da superfície externa do permutador de calor da fonte quente (HHX) do protótipo de TEGea obtidos com câmera FLIR C3 durante processo de aquecimento do ar por resistência elétrica.

Figura C-1 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 29,2°C a 47,4°C

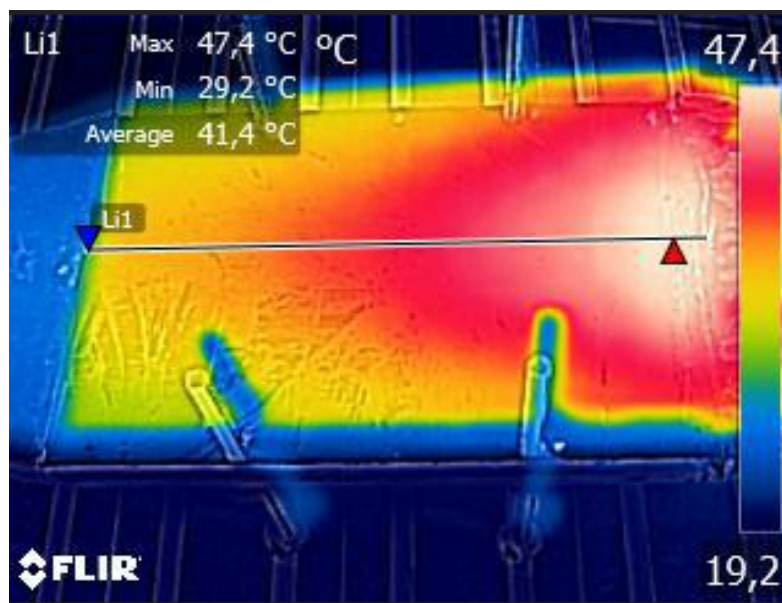


Figura C-2 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 30,5,2°C a 47,6°C

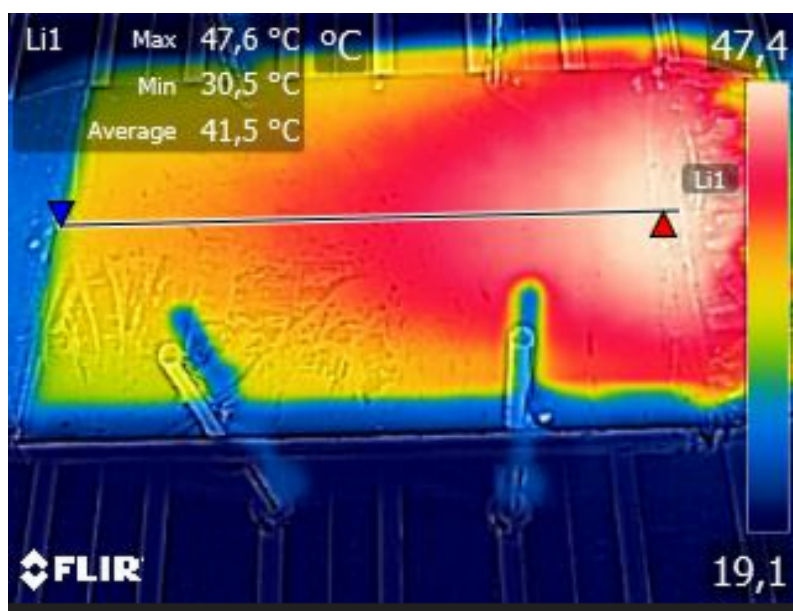


Figura C-3 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 42,8°C a 104,5°C

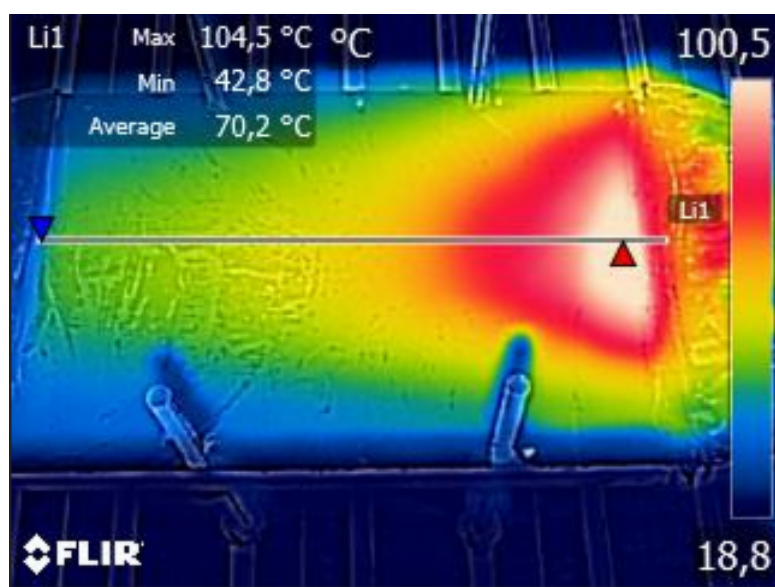


Figura C-4 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 46,6°C a 148,3°C

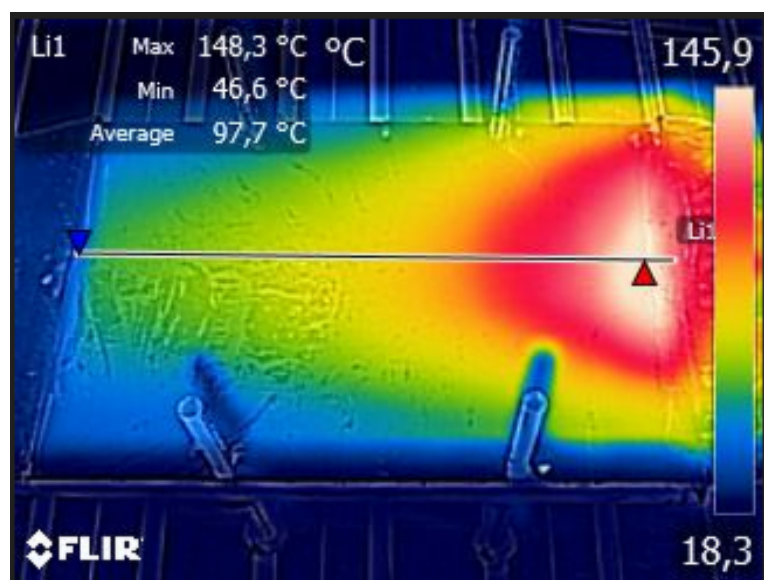


Figura C-5 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 50,8°C a 156,4°C

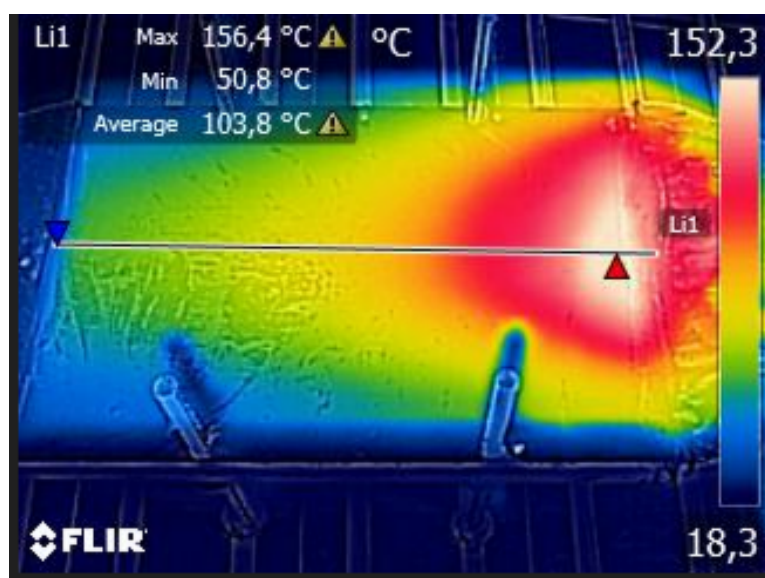


Figura C-6 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 46,8°C a 165,7°C

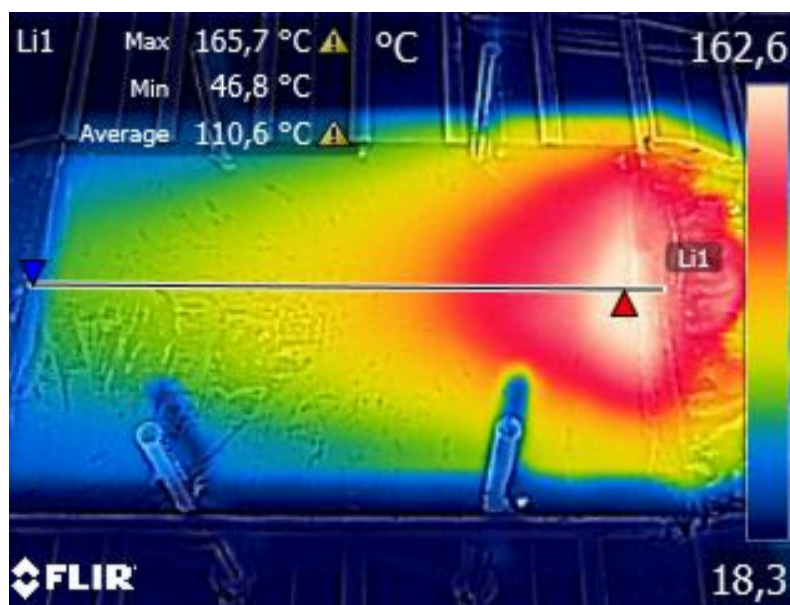


Figura C-7 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 55,7°C a 176,1°C

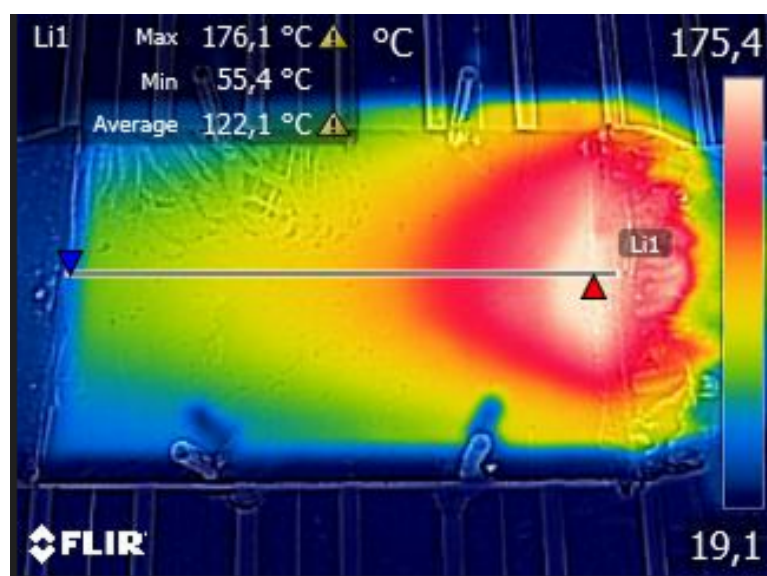


Figura C-8 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 57,0°C a 175,7°C

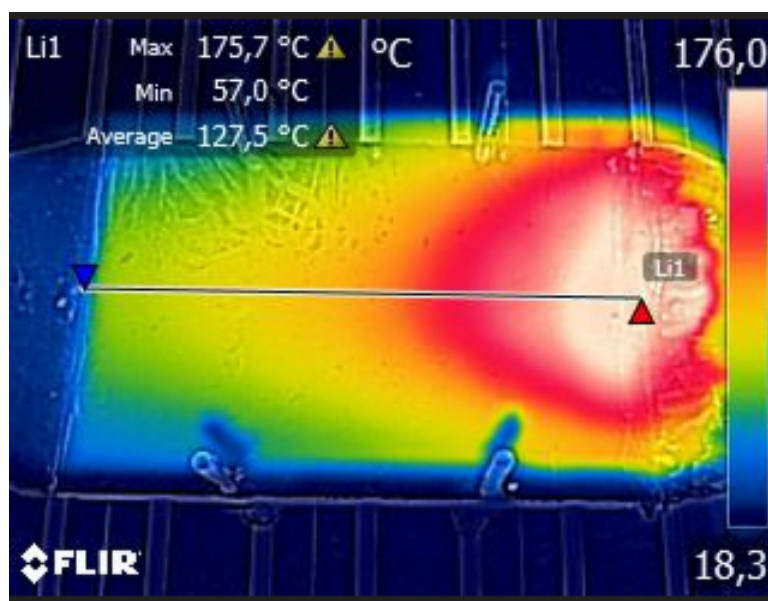


Figura C-9 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 70,9°C a 175,3°C

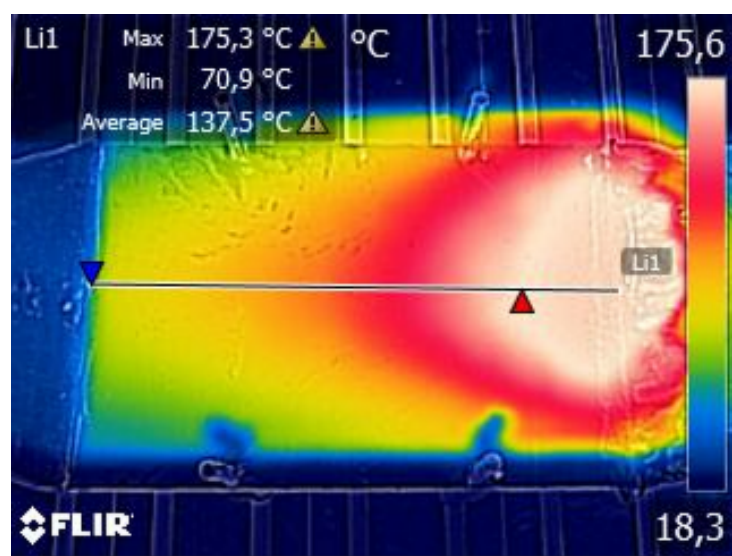
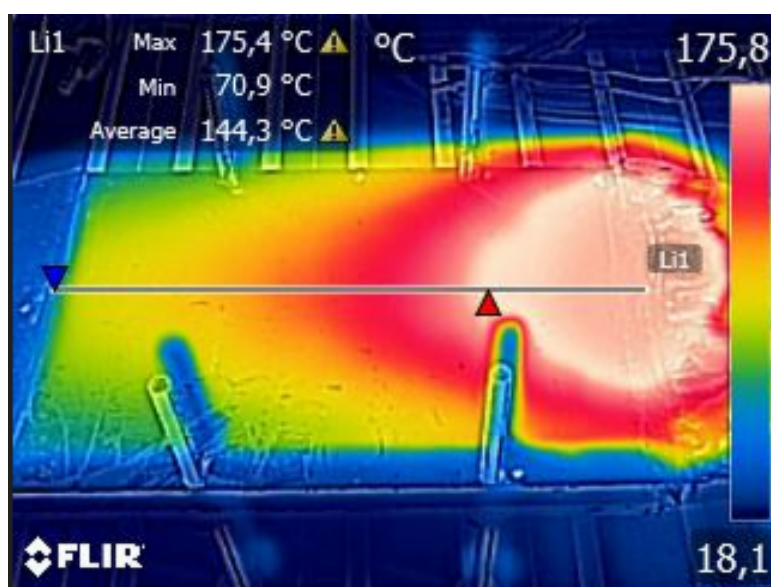


Figura C-10 Mapa termográfico do permutador de calor HHX-000 do TEGea durante aquecimento do ar na faixa de temperatura de 70,9°C a 175,3°C



APENDICE D – Procedimento científico para o cálculo das incertezas de medição

Os principais parâmetros comumente utilizados para avaliação experimental da performance de protótipos de gerador termoeletrico de exaustão automotiva (TEGea) são expressos em termos das variáveis independentes mostradas na Tabela D-1.

Tabela D-1 Características das principais variáveis independentes para avaliação experimental da performance de TEGea.

VARIÁVEL INDEPENDENTE	INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO
Potência elétrica AC da resistência de aquecimento	Wattmetro Minipa
Potência elétrica DC produzida pelo TEGea	Wattmetro Minipa
Corrente elétrica DC	Placa ACS712 digital OEM
Tensão elétrica	Multímetro Minipa
Velocidade de escoamento	Anemômetro digital
Temperatura	Sensor resistivo ou termopar
Pressão diferencial	Manômetro diferencial digital

Fonte: Autor

As faixas de incertezas de cada variável independente da Tabela D-1, são normalmente obtidas por processo de calibração do instrumento, seguindo uma norma regulamentadora específica (ABNT, ASME, SAE, NIST etc.) ou diretamente das especificações técnicas do fabricante dos instrumentos de medição.

A Tabela D-2, apresenta alguns dos parâmetros utilizados na avaliação da performance do protótipo do TEGea, os quais são calculados a partir das variáveis independentes apresentadas na Tabela D-1.

Tabela D-2 Principais parâmetros de avaliação da performance do protótipo de TEGea

PARÂMETRO	VARIÁVEIS
Potência elétrica AC	Corrente elétrica e tensão elétrica AC
Potência elétrica DC	Corrente elétrica e tensão elétrica DC

Fonte: Autor

Os pesquisadores Kline e McClintock propôs um método que tem sido muito utilizado pela comunidade científica para análise das incertezas de variáveis dependentes.

De acordo com GARUD et al (2022), TAHERI et al (2020), HOLMAN (2011), ALBERTAZZI e DE SOUZA (2008), no método proposto por Kline e McClintock, as incertezas das variáveis dependentes são calculadas com base nas incertezas das variáveis

independentes que são mensuradas experimentalmente, empregando a Equação (D-1):

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [\text{D-1}]$$

onde os termos da Equação (A-1) são respectivamente:

w_R = incerteza da variável dependente;

$w_{1,2,3...n}$ = incerteza da variável independente;

R = variável dependente;

x_i = variável independente;

w_k = incerteza da variável independente;

n = número de variáveis independentes

APENDICE E – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos permutadores de calor da fonte quente (HHX-000, HHX-150 e HHX-250)

Figura E-1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies internas permutador de calor HHX-000

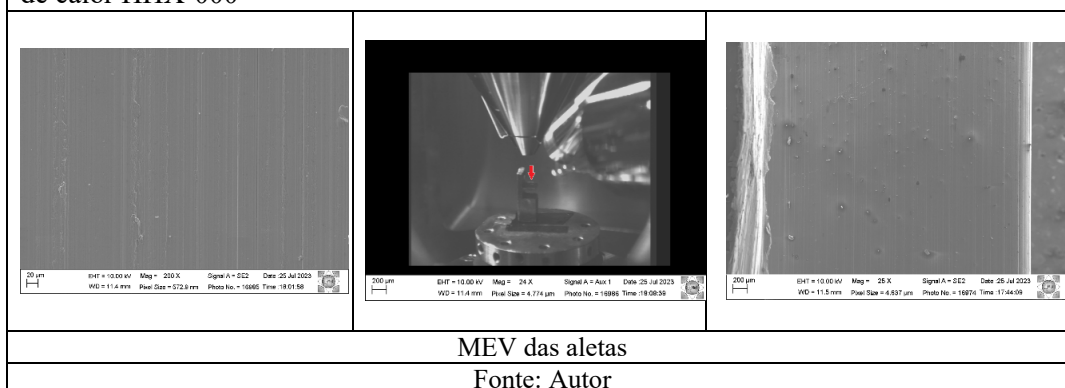


Figura E-2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies internas permutador de calor HHX-150

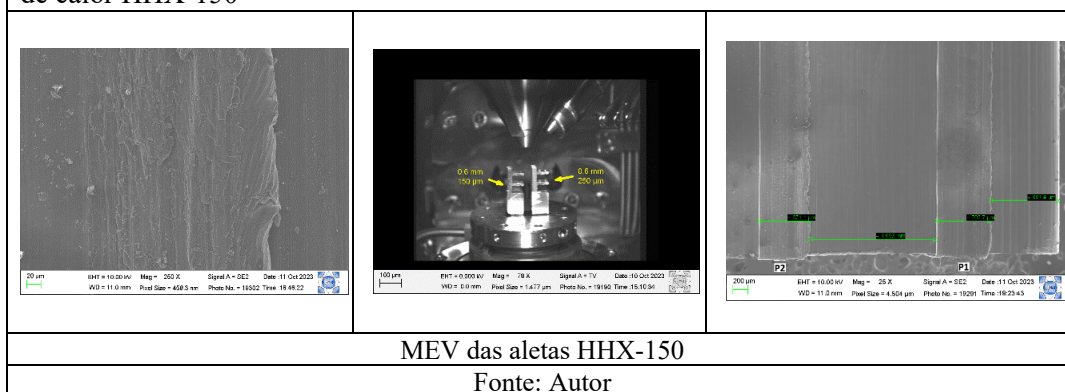
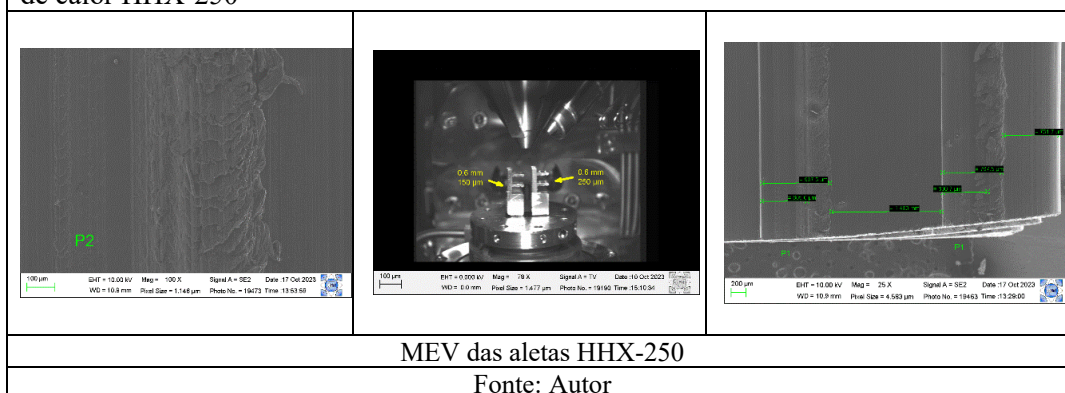


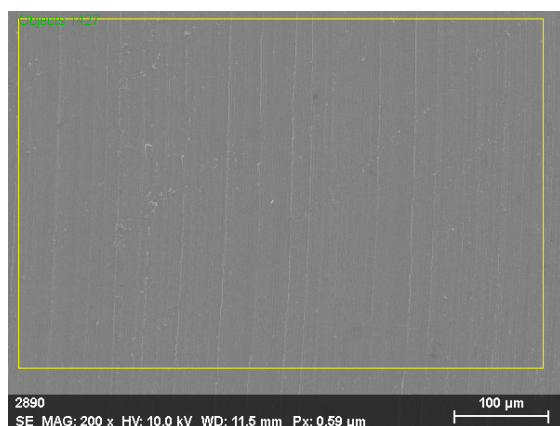
Figura E-3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies internas permutador de calor HHX-250



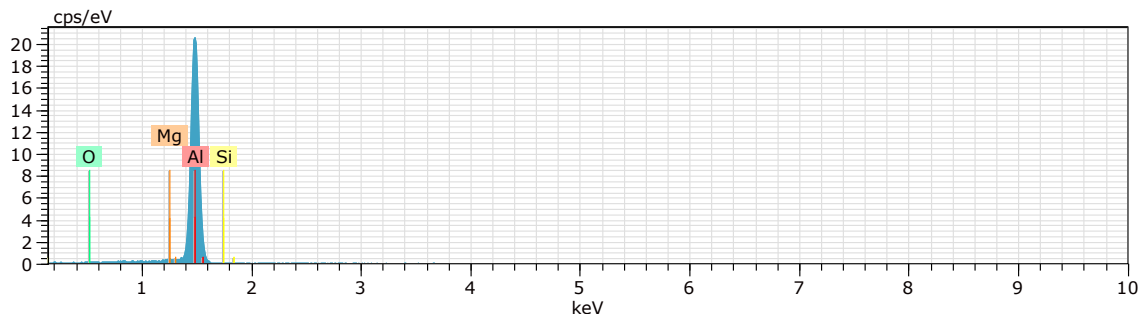
APENDICE F – Espectroscopia de energia dispersiva de raio X (EDS) dos permutadores de calor da fonte quente (HHX-000, HHX-150 e HHX-250)

Application Note

Company / Department



2890Date:10/24/2023 3:20:42 PMImage size:1000
x 750Mag:200xHV:10.0kV



Objects 1427 Date:10/24/2023 3:21:04 PM HV:10.0kV Puls th.:2.81kcps

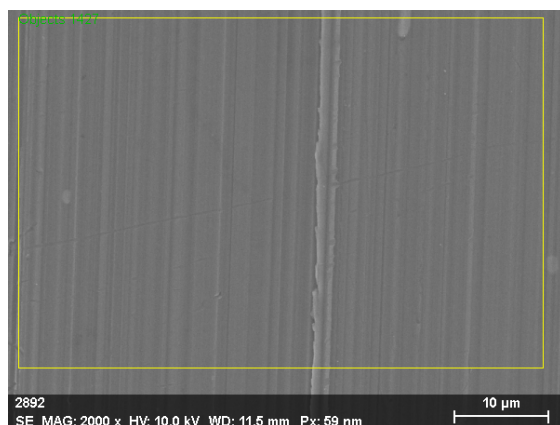
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	78.02	96.91	95.95	3.54
Mg	12	K-series	1.21	1.50	1.65	0.10
O	8	K-series	1.00	1.24	2.07	0.33
Si	14	K-series	0.28	0.35	0.33	0.06
Total:			80.50	100.00	100.00	

Spectrum: Objects 1427

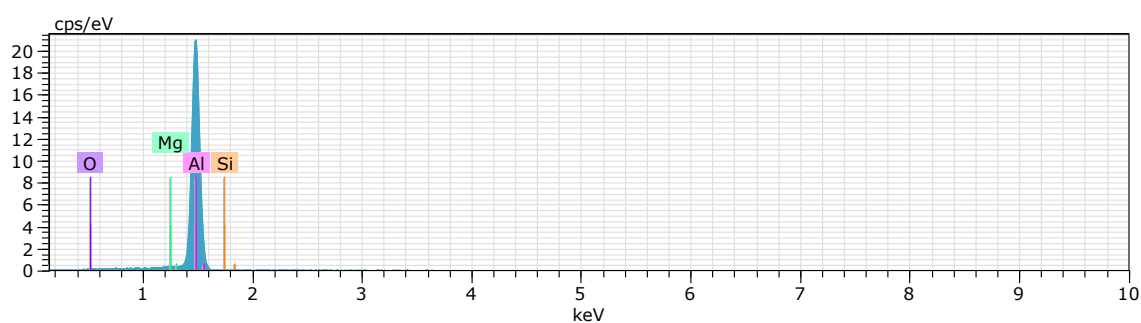
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	78.02	96.91	95.95	3.54
Mg	12	K-series	1.21	1.50	1.65	0.10
O	8	K-series	1.00	1.24	2.07	0.33
Si	14	K-series	0.28	0.35	0.33	0.06
Total:			80.50	100.00	100.00	

Application Note

Company / Department



2892Date:10/24/2023 3:47:02 PMImage size:1000
x 750Mag:2000xHV:10.0kV



Objects 1427 Date:10/24/2023 3:47:11 PM HV:10.0kV Puls th.:2.77kcps

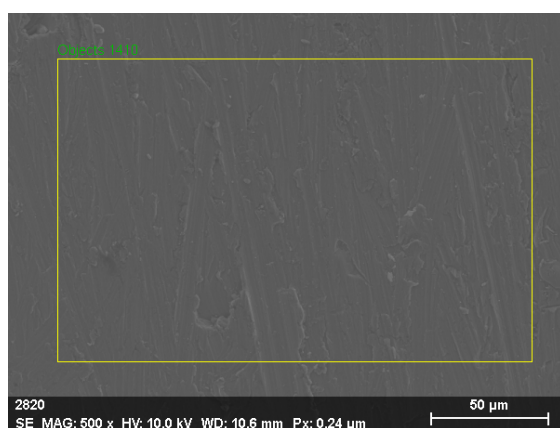
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	79.96	96.90	95.92	3.63
Mg	12	K-series	1.19	1.44	1.59	0.10
O	8	K-series	1.06	1.29	2.15	0.34
Si	14	K-series	0.30	0.37	0.35	0.06
Total:			82.51	100.00	100.00	

Spectrum: Objects 1427

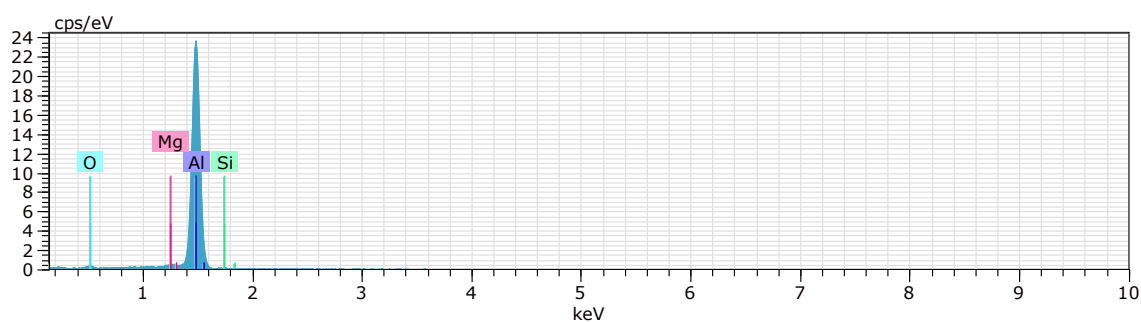
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	79.96	96.90	95.92	3.63
Mg	12	K-series	1.19	1.44	1.59	0.10
O	8	K-series	1.06	1.29	2.15	0.34
Si	14	K-series	0.30	0.37	0.35	0.06
Total:			82.51	100.00	100.00	

Application Note

Company / Department



2820Date:10/19/2023 2:28:56 PMImage size:1000 x
750Mag:500xHV:10.0kV



Objects 1410 Date:10/19/2023 2:29:14 PM HV:10.0kV Puls th.:3.16kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	74.60	94.61	92.43	3.38
O	8	K-series	2.56	3.25	5.36	0.58
Mg	12	K-series	1.16	1.47	1.60	0.10
Si	14	K-series	0.52	0.66	0.62	0.07
Total:			78.85	100.00	100.00	

Spectrum: Objects 1410

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	74.60	94.61	92.43	3.38
O	8	K-series	2.56	3.25	5.36	0.58
Mg	12	K-series	1.16	1.47	1.60	0.10
Si	14	K-series	0.52	0.66	0.62	0.07
Total:			78.85	100.00	100.00	

APENDICE G – Rugosidade das superfícies externas do permutador de calor da fonte quente (HHX-000, HHX-150, HHX-250) e da fonte fria (CHX-000) em contato com os módulos termoeletrônicos.

Figura G-1 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-NU.

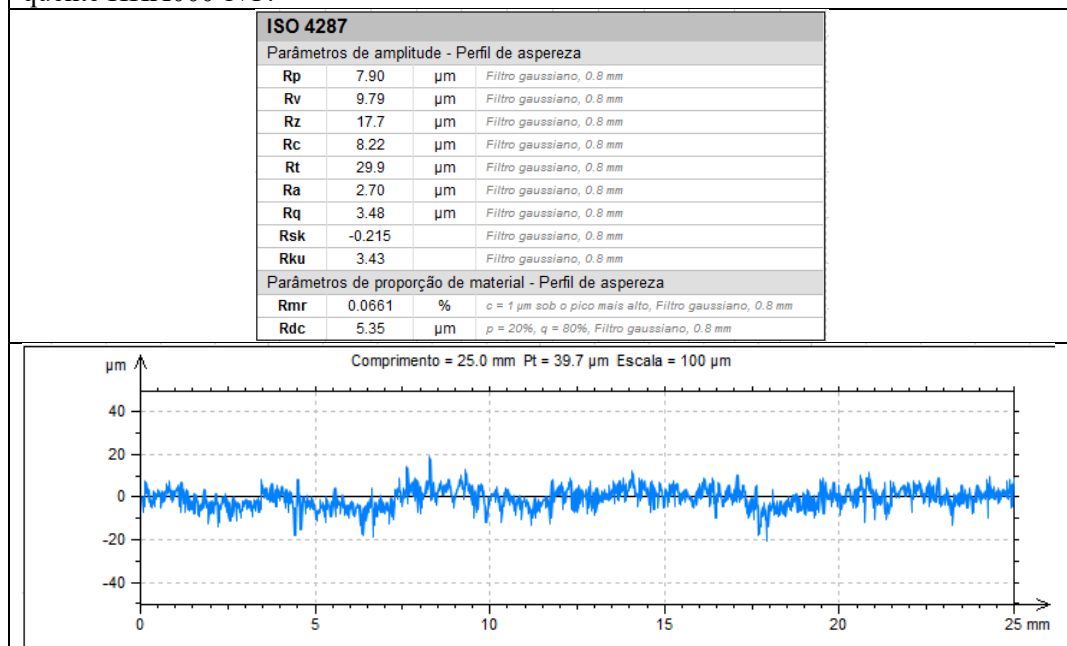


Figura G-2 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-NU.

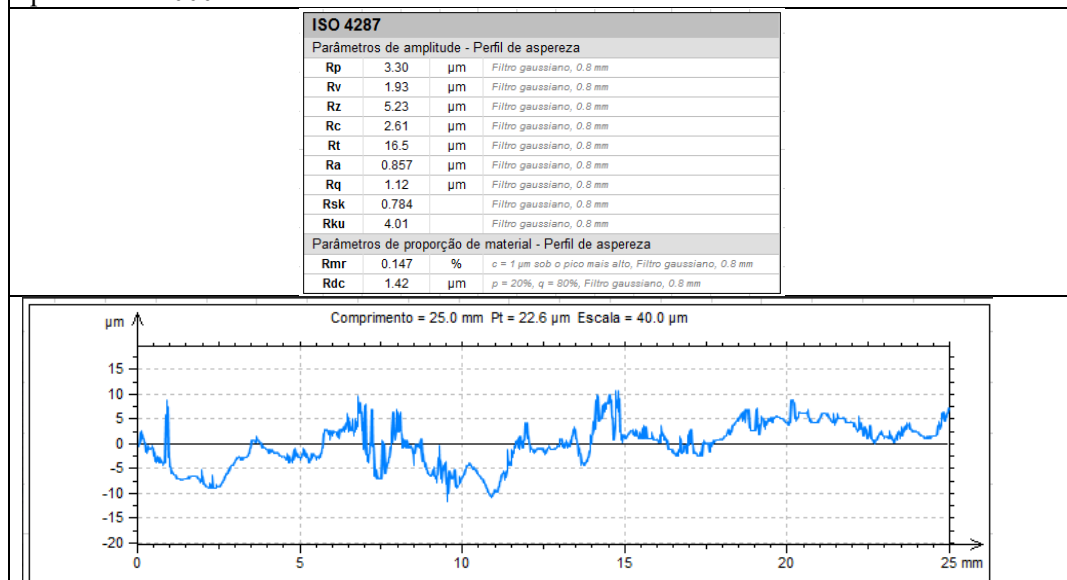


Figura G-3 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-U.

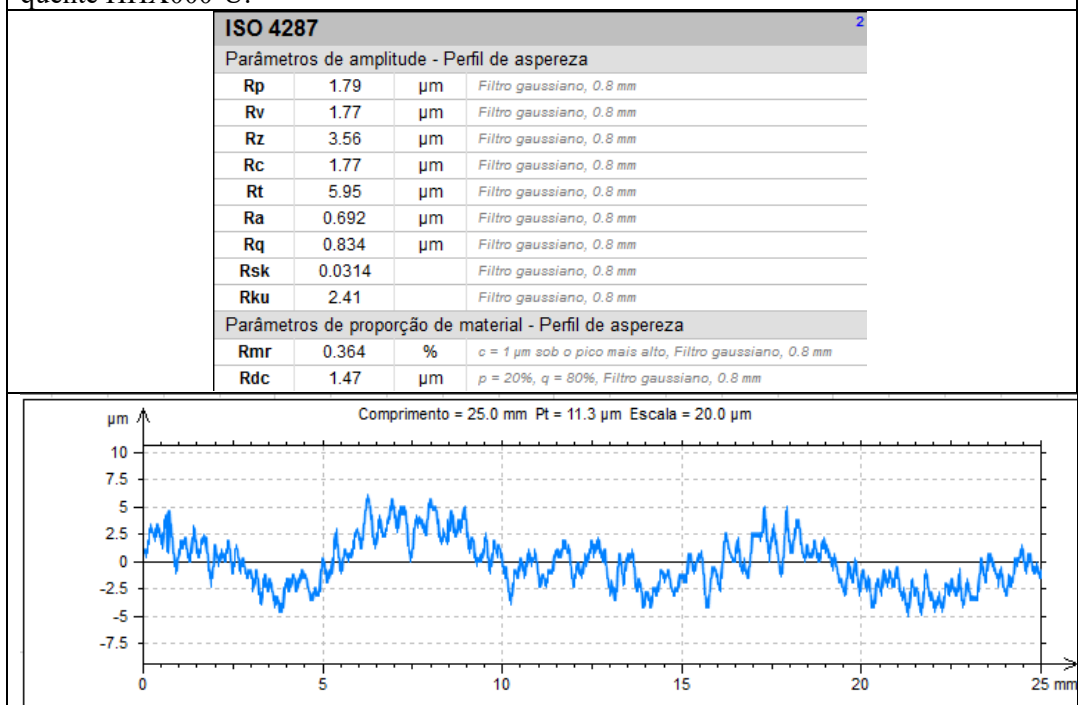


Figura G-4 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX000-U.

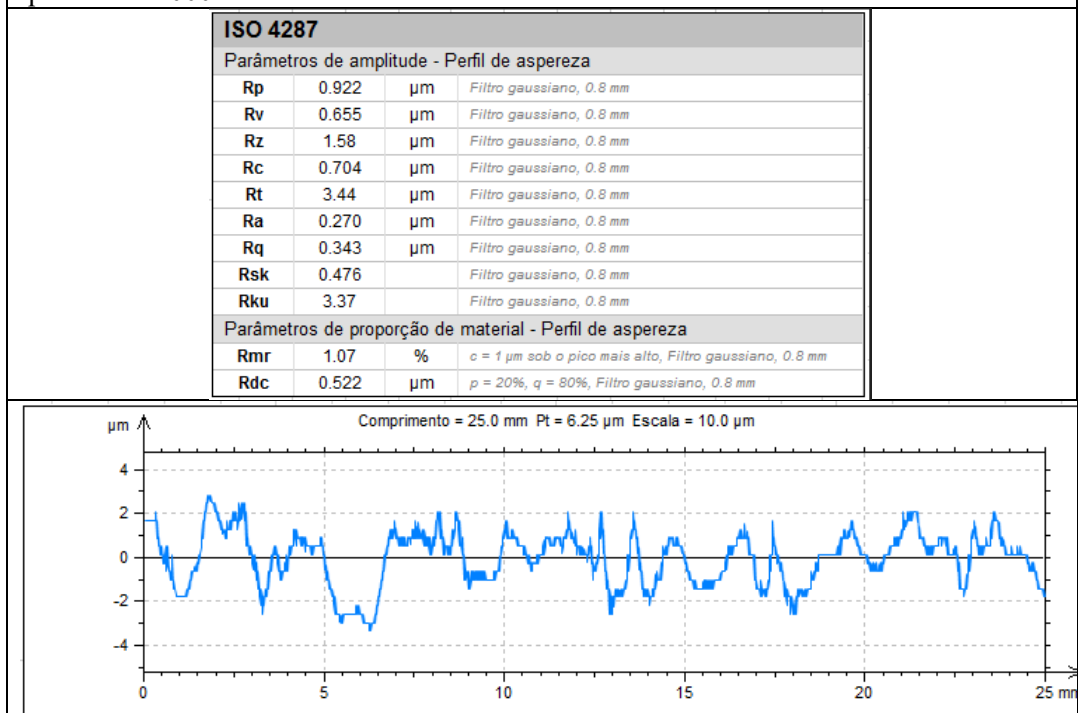


Figura G-5 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-150-U.

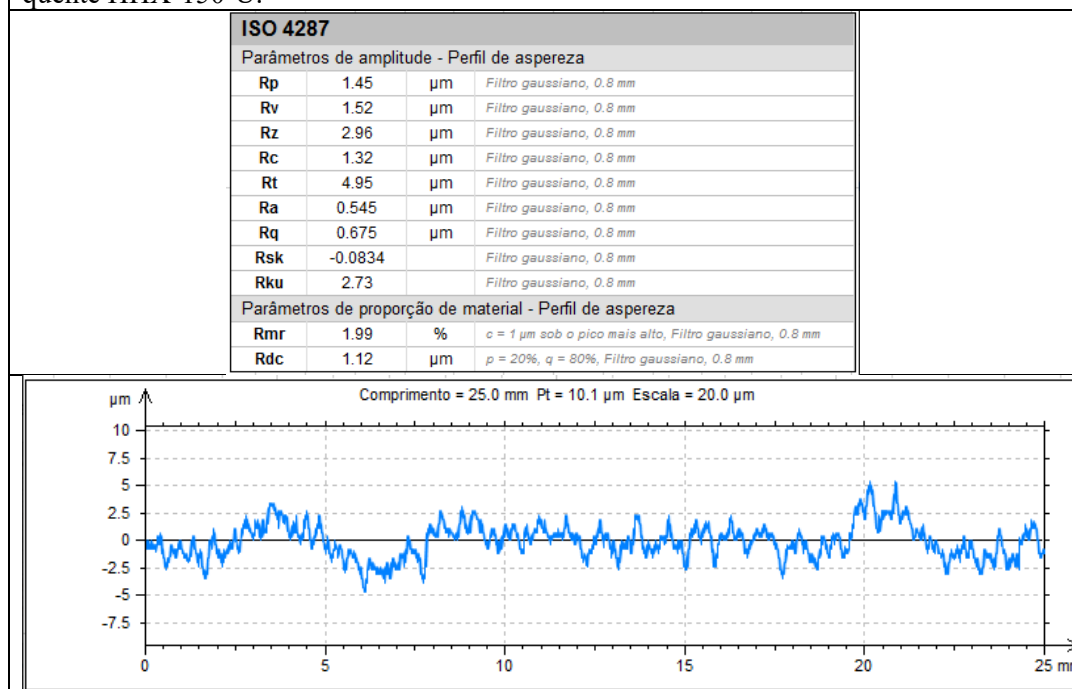


Figura G-6 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-150-U.

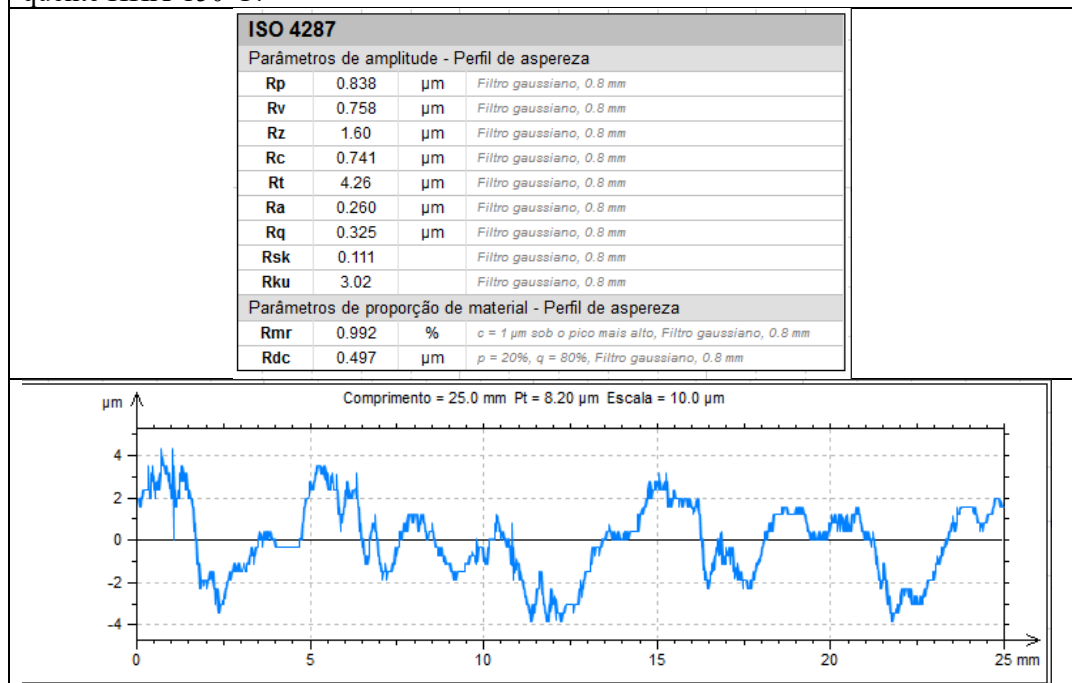


Figura G-7 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-250-U.

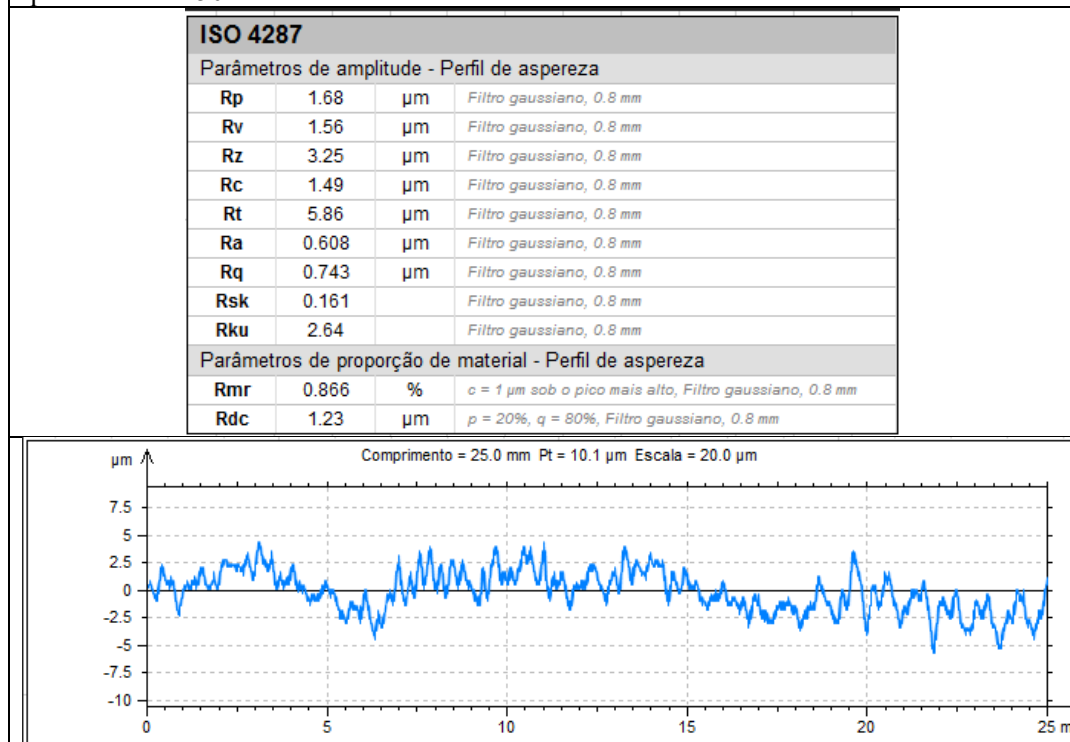


Figura G-8 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte quente HHX-250-U.

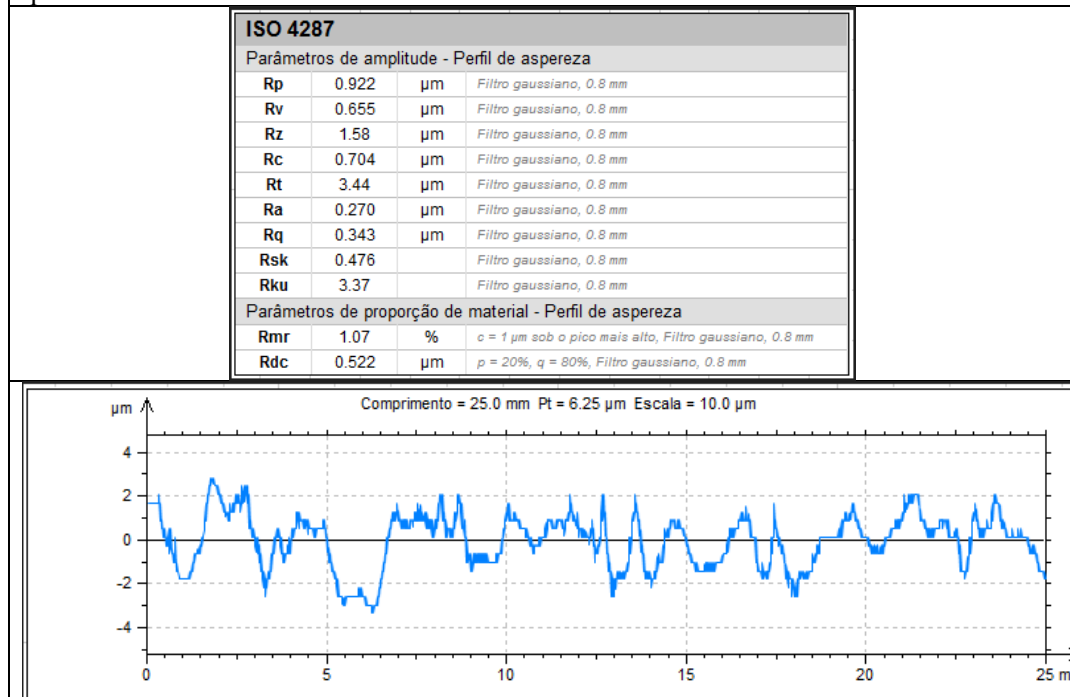


Figura G-9 Rugosidade transversal da superfície externa do permutador de calor da fonte fria CHX000-NU.

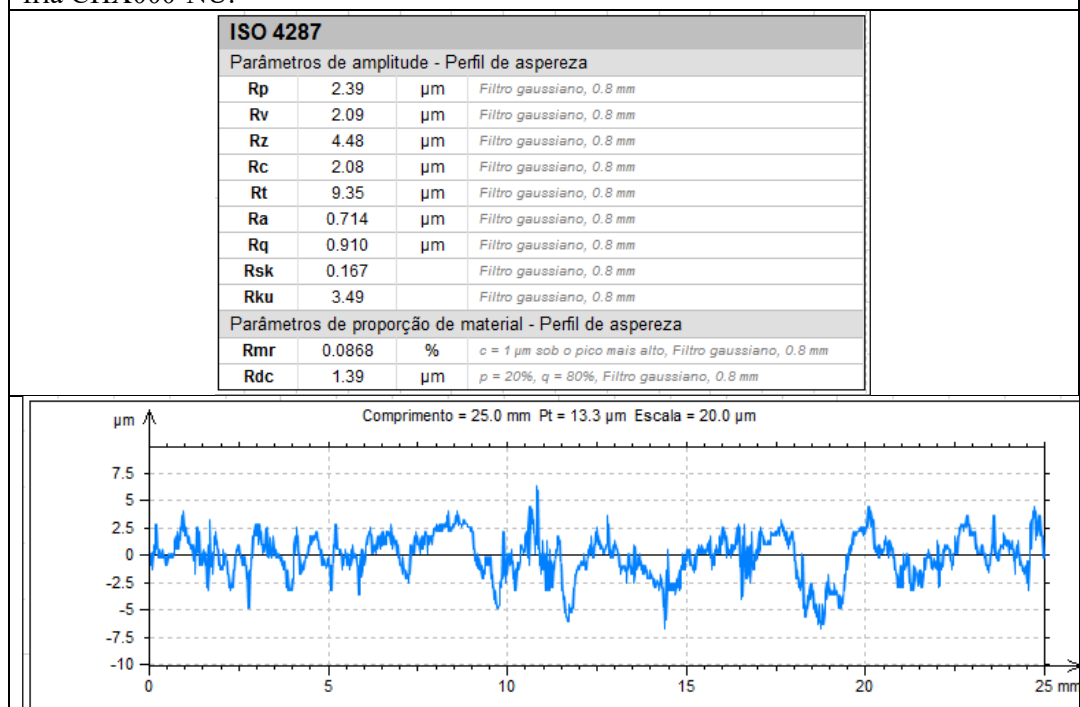


Figura G-10 Rugosidade longitudinal da superfície externa do permutador de calor da fonte fria CHX000-NU.

