

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LUIS VITORIO GULNELI FACHINI**

**RECUPERAÇÃO DE CALOR UTILIZANDO GERADORES TERMOELÉTRICOS DE  
TELURETO DE BISMUTO ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) ASSISTIDOS POR TERMOSSIFÕES**

**PONTA GROSSA**

**2023**

**LUIS VITORIO GULINELI FACHINI**

**RECUPERAÇÃO DE CALOR UTILIZANDO GERADORES TERMOELÉTRICOS  
DE TELURETO DE BISMUTO ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) ASSISTIDOS POR TERMOSSIFÕES**

**WASTE HEAT RECOVERY USING BISMUTH TELLURIDE ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )  
THERMOELECTRIC GENERATORS ASSISTED BY THERMOSYPHONS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Ponta Grossa.  
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*  
Coorientador: Prof. Dr. *Romeu Miqueias Szmoski*

**PONTA GROSSA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite *download* e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



LUIS VITORIO GULINELI FACHINI

**RECUPERAÇÃO DE CALOR UTILIZANDO GERADORES TERMOELÉTRICOS DE TELURETO DE BISMUTO (BI<sub>2</sub>TE<sub>3</sub>) ASSISTIDOS POR TERMOSSIFÕES**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Térmica E Fluidos.

Data de aprovação: 30 de Novembro de 2023

Dr. Thiago Antonini Alves, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Carlos Henrique Illa Font, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Luis Alonso Betancur Arboleda, Doutorado - Unidades Tecnológicas de Santander

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/11/2023.

Dedico este trabalho a minha família.

## AGRADECIMENTOS

Quero dedicar este trabalho aos meus pais, cujo constante apoio e incentivo me permitiram buscar a educação. Seus sacrifícios e encorajamento ao longo dos anos foram a base para minha vida acadêmica e pessoal, sem vocês não seria possível o alcance desse e de outros objetivos que foram e estão sendo primordial na minha vida.

Agradeço imensamente ao Professor *Thiago Antonini Alves* e ao Professor *Romeu Miqueias Szmoski*, pelos ensinamentos e a paciência que tiveram nessa orientação e fizeram ser possível a existência desse trabalho.

Aos meus amigos de faculdade, *Felipe Mercês Biglia*, *Guilherme Antonio Bartmeyer*, *Pedro Leineker Ochoski Machado*, *Carlos Henrique Diedrich* e *Victor Vaurek Dimbarre*, pelas conversas e troca de conhecimento.

Agradeço aos esforços da minha noiva em sempre me incentivar a conclusão desse trabalho e querer ver a felicidade em mim.

Ao meu amigo Paulo, por compartilhar o seu conhecimento e memórias.

Gostaria de expressar minha gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa, por me proporcionarem a oportunidade de realizar esse estudo. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Aos Laboratórios de Usinagem e de Soldagem do DAMEC, por permitirem a utilização dos equipamentos. Agradeço profundamente à instituição e aos seus departamentos acadêmicos pela infraestrutura, orientação e recursos que tornaram possível a realização desse trabalho.

No dia em que a Universidade me atestou, em pergaminho, uma ciência que eu estava longe de trazer arraigada no cérebro, confesso que me achei de algum modo logrado, ainda que orgulhoso. Explico-me: o diploma era uma carta de alforria; se me dava a liberdade, dava-me a responsabilidade. Guardei-o, deixei as margens do Mondego, e vim por ali fora assaz desconsolado, mas sentindo já uns ímpetos, uma curiosidade, um desejo de acotovelar os outros, de influir, de gozar, de viver, — de prolongar a Universidade pela vida adiante.  
(Brás CUBAS, 1869)

## RESUMO

O reaproveitamento de energia térmica está se tornando cada vez mais importante devido aos seus inúmeros benefícios, tais como a redução significativa dos impactos ambientais, o aumento da eficiência térmica dos sistemas e a diminuição dos custos. A conversão de energia térmica em energia elétrica ocorre por meio do Efeito *Seebeck* em geradores termoelétricos. Esse efeito está relacionado à geração de uma diferença de potencial elétrico quando dois materiais diferentes são colocados em contato em temperaturas distintas. Essa relação entre a temperatura e as propriedades elétricas dos materiais é conhecida como termoeletricidade. O objetivo deste estudo experimental é obter as curvas características de operação de geradores termoelétricos de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) visando promover o uso consciente de energia e minimizar ao máximo os desperdícios. Para simular uma situação industrial, foi desenvolvido um sistema de túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto capaz de reproduzir gases aquecidos provenientes de processos fabris. Para transferir o calor dos gases aquecidos para os geradores termoelétricos, foi utilizado um conjunto de termossifões aletados, que são dispositivos passivos altamente eficientes na transferência de calor. Dessa forma, foi possível criar a diferença de temperatura necessária para o funcionamento dos geradores termoelétricos e obter a curva característica da potência produzida. Além disso, foram realizados estudos sobre o pré-aquecimento do ar de entrada, causado pelo sistema passivo de transferência de calor, e sobre a eficiência térmica do conjunto. Essas investigações experimentais contribuem para a compreensão e aperfeiçoamento do processo de conversão direta de energia térmica em energia elétrica, impulsionando a utilização consciente e eficiente dos recursos energéticos.

Palavras-chave: recuperação de calor residual; geradores termoelétricos; efeito *Seebeck*; energia térmica; termossifões.

## ABSTRACT

The reuse of thermal energy is becoming increasingly important due to its numerous benefits, such as significant reduction of environmental impacts, increased system efficiency, and cost reduction. The conversion of thermal energy into electrical energy occurs through the Seebeck Effect in thermoelectric generators. This effect is associated with the generation of an electric potential difference when two different materials are in contact at different temperatures. This relationship between temperature and the electrical properties of materials is known as thermoelectricity. The objective of this experimental study is to obtain the operating characteristic curves of Bismuth Telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) thermoelectric generators, aiming to promote conscious energy use and minimize waste. To simulate an industrial situation, an open-circuit blower-type wind tunnel system capable of reproducing heated gases from industrial processes was developed. A set of finned thermosyphons, which are highly efficient passive heat transfer devices, was used to transfer the heat from the heated gases to the thermoelectric generator. In this way, it was possible to create the temperature difference necessary for the operation of the thermoelectric generators, as well as obtain the characteristic curve of the generated power. Furthermore, studies were conducted on the preheating of the inlet air caused by the passive heat transfer system, and on the thermal efficiency of the set. These experimental investigations contribute to the understanding and improvement of the direct conversion process from thermal energy to electrical energy, driving the conscious and efficient utilization of energy resources.

Keywords: waste heat recovery; thermoelectric generators; Seebeck effect; thermal energy; thermosyphons.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático de um gerador termoelétrico.....	17
Figura 2 – Diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão.....	18
Figura 3 – Efeito <i>Seebeck</i> .....	22
Figura 4 – Deslocamento dos elétrons de uma fonte quente para uma fonte fria .....	24
Figura 5 – Movimentação dos elétrons entre diferentes materiais.....	24
Figura 6 – Gerador termoelétrico.....	27
Figura 7 – Funcionamento de um módulo TEG.....	28
Figura 8 – Diagrama esquemático do aparato experimental.....	42
Figura 9 – Sistema de aletas e termossifões.....	52
Figura 10 – Dimensões e posição de termopares no bloco de alumínio.....	54
Figura 11 – Vista explodida dos componentes para realizar a recuperação do calor.....	55
Figura 12 – Aspectos geométricos vista superior.....	56
Figura 13 – Aspectos geométricos vista lateral.....	57
Figura 14 – Detalhes construtivos da placa de orifício.....	60
Figura 15 – Esquemático para o domínio de modelagem do sistema.....	62
Figura 16 – Etapas do procedimento experimental.....	64

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Aparato experimental .....	39
Fotografia 2 – Visão lateral do aparato experimental .....	40
Fotografia 3 – Detalhe da locação dos geradores termoelétricos .....	41
Fotografia 4 – Cordões de solda realizados para testes de penetração .....	43
Fotografia 5 – Cordões de solda para teste de penetração.....	44
Fotografia 6 – Sistema de deslocamento automático de tocha .....	44
Fotografia 7 – Túnel de vento montado.....	45
Fotografia 8 – Componentes de um termossifão .....	46
Fotografia 9 – Banho ultrassônico contendo os componentes imersos .....	47
Fotografia 10 – Processo de brasagem do tubo.....	47
Fotografia 11 – Termossifões brasados.....	48
Fotografia 12 – Verificação da estanqueidade.....	48
Fotografia 13 – Geração de vácuo no interior do tubo de cobre .....	49
Fotografia 14 – Preenchimento do fluido de trabalho.....	50
Fotografia 15 – Brasagem do capilar.....	51
Fotografia 16 – Processo de fabricação dos blocos de alumínio .....	54
Fotografia 17 – Processo de brasagem das aletas .....	55
Fotografia 18 – Gerador termoelétrico TEG1-PB-12611-6.0.....	56
Fotografia 19 – Sistema de aquisição de potência gerado pelos geradores termoelétricos.....	58
Fotografia 20 – Sistema de medição de vazão do ar de entrada.....	60
Fotografia 21 – Sistema de controle de rotação do ventilador centrífugo .....	61

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação de Figura de Mérito em função da temperatura para algumas ligas.....	25
Gráfico 2 – Faixa de temperatura de operação de fluidos de trabalho para termossifões.....	31
Gráfico 3 – Figura de Mérito em função da temperatura para diversos fluidos de trabalho.....	32
Gráfico 4 – Comportamento térmico do sistema considerando $Re_{Dh} = 13.468$ ..	67
Gráfico 5 – Comportamento térmico do sistema considerando $Re_{Dh} = 8.238$ ...	69
Gráfico 6 – Comportamento térmico do sistema considerando $Re_{Dh} = 4.279$ ...	70
Gráfico 7 – Pré-aquecimento do ar de entrada.....	71
Gráfico 8 – Transferência de calor para o ar de entrada pelo Número de <i>Reynolds</i> .....	72
Gráfico 9 – Eficiência de transferência de calor pelo Número de <i>Reynolds</i> .....	73
Gráfico 10 – Diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoeletrônicos.....	75
Gráfico 11 – Tensão gerada em [mV] por corrente elétrica gerada em [mA]: 1,7m/s .....	76
Gráfico 12 – Potência gerada em [mW] por tensão gerada em [mV]: 1,7m/s.....	77
Gráfico 13 – Potência gerada em [mW] por corrente gerada em [mA]: 1,7m/s..	78
Gráfico 14 – Tensão gerada em [mV] por corrente gerada em [mA]: 1,1m/s .....	79
Gráfico 15 – Potência gerada em [mW] por tensão gerada em [mV]: 1,1m/s.....	80
Gráfico 16 – Potência gerada em [mW] por corrente gerada em [mA]: 1,1m/s..	81
Gráfico 17 – Tensão gerada em [mV] por corrente gerada em [mA]: 0,6m/s .....	82
Gráfico 18 – Potência gerada em [mW] por tensão gerada em [mV]: 0,6m/s.....	83
Gráfico 19 – Potência gerada em [mW] por corrente gerada em [mA]: 0,6m/s..	84
Gráfico 20 – Tensão de circuito aberto [mV] e fechado [mV] versus $\Delta T$ [°C] ....	85
Gráfico 21 – Potência elétrica gerada em [mW] por diferença de temperatura $\Delta T$ [°C].....	87
Gráfico 22 – Potência elétrica gerada em [mW] pelo calor recuperado .....	88
Gráfico 23 – Regressão linear para calibração de um termopar.....	99

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Faixa de temperatura para tipos de calor residual .....	29
Quadro 2 – Incertezas experimentais .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de <i>Seebeck</i> para metais, ligas e semicondutores .....	23
Tabela 2 – Parâmetros de máquina .....	42
Tabela 3 – Parâmetros de velocidade de avanço .....	43
Tabela 4 – Características físicas dos termossifões.....	46
Tabela 5 – Valores de resistência elétrica para obtenção de potência .....	59
Tabela 6 – Pré-aquecimento do ar de entrada .....	74
Tabela 7 – Dados de Temperatura e resistência interna dos geradores: 1,7m/s .....	76
Tabela 8 – Dados de Temperatura e resistência interna dos geradores: 1,1m/s .....	79
Tabela 9 – Dados de Temperatura e resistência interna dos geradores: 0,6m/s .....	83
Tabela 10 – Potência gerada por área em relação a diferença de temperatura .	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
MTEP	Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
TEG	Gerador termoelétrico, do inglês <i>Thermoelectric Generator</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$A$	Área	$[m^2]$
$D$	Diâmetro	$[m]$
$I$	Corrente elétrica	$[A]$
$k$	Condutividade térmica	$[W/m.K]$
$\dot{m}$	Vazão mássica	$[kg/s]$
$M'$	Número de Mérito	$[W/m^2]$
$P$	Pressão	$[Pa]$
$Pot$	Potência	$[W]$
$T$	Temperatura	$[K]$
$U$	Tensão elétrica	$[V]$
$V$	Volume	$[m^3]$

### Letras Gregas

$\mu$	Viscosidade dinâmica	$[Pa.s]$
$\rho$	Massa específica	$[kg/m^3]$
$\alpha_{ab}$	Coefficientes de <i>Seebeck</i>	$[\mu V/K]$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>19</b>
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos .....	19
<b>1.2</b>	<b>Motivação e Justificativa</b> .....	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho</b> .....	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Termoeletricidade</b> .....	<b>22</b>
2.1.1	Efeito Seebeck .....	22
2.1.2	Geradores Termoelétricos (TEG) .....	26
<b>2.2</b>	<b>Calor Residual</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistemas Passivos de Recuperação de Calor</b> .....	<b>29</b>
2.3.1	Termossifões.....	29
<u>2.3.1.1</u>	<u>Invólucro</u> .....	<u>30</u>
<u>2.3.1.2</u>	<u>Fluido de Trabalho</u> .....	<u>30</u>
2.3.2	Limites Operacionais de Termossifões.....	32
<b>2.4</b>	<b>Revisão da Literatura</b> .....	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Aparato Experimental</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Processo de Fabricação do Túnel De Vento</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>Construção dos Termossifões</b> .....	<b>45</b>
3.3.1	Características Dos Termossifões.....	45
3.3.2	Limpeza.....	46
3.3.3	Brasagem dos Termossifões.....	47
3.3.4	Verificação da Estanqueidade .....	48
3.3.5	Evacuação de Ar Contido Dentro do Tubo De Cobre.....	49
3.3.6	Preenchimento do Tubo de Cobre Com o Fluido De Trabalho.....	49
<b>3.4</b>	<b>Sistema de Acoplamento Para Geradores Termoelétricos</b> .....	<b>51</b>
<b>3.5</b>	<b>Geradores Termoelétricos</b> .....	<b>56</b>
<b>3.6</b>	<b>Sistema de Aquisição de Curva Características de Geradores Termoelétricos</b> .....	<b>57</b>
<b>3.7</b>	<b>Sistema de Medição e Controle da Vazão Ar</b> .....	<b>59</b>
<b>3.8</b>	<b>Análise da Troca de Calor no Sistema</b> .....	<b>62</b>



<b>3.9</b>	<b>Procedimento Experimental .....</b>	<b>63</b>
<b>3.10</b>	<b>Análise de Incertezas Experimentais.....</b>	<b>65</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1</b>	<b>Comportamento do Sistema de Transferência de Calor Passivo.. ..</b>	<b>66</b>
<b>4.2</b>	<b>Pré-Aquecimento do Ar De Entrada.....</b>	<b>70</b>
<b>4.3</b>	<b>Conversão de Energia Térmica em Energia Elétrica.....</b>	<b>74</b>
4.3.1	Diferença de Temperatura Entre as Faces Dos Geradores Termoelétricos.....	74
4.3.2	Potência Gerada na Condição de Velocidade Média de Escoamento de 1,7m/s.....	75
4.3.3	Potência Gerada na Condição de Velocidade Média de Escoamento de 1,1m/s.....	78
4.3.4	Potência Gerada na Condição de Velocidade Média de Escoamento de 0,6m/s.....	81
4.3.5	Construção da Curva Característica dos Geradores Termoelétricos .....	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>90</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>90</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestão Para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES DO TIPO T .....</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE B - PROJETO MECÂNICO DO TÚNEL DE VENTO DO TIPO SOPRADOR DE CIRCUITO ABERTO.....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE C - ROTINA COMPUTACIONAL PARA COMUTAÇÃO DE RESISTÊNCIAS E OBTENÇÃO DA POTÊNCIA GERADA PELOS GERADORES TERMOELÉTRICOS.....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE D - ESQUEMA ELETRÔNICO PARA O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE CURVA CARACTERÍSTICA DO GERADOR TERMOELÉTRICO.....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE E - CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA DE AR NA ENTRADA DO TÚNEL DE VENTO DO TIPO SOPRADOR DE CIRCUITO ABERTO.....</b>	<b>111</b>
	<b>ANEXO A - CATÁLOGO AEROMACK® CRE-04 .....</b>	<b>114</b>
	<b>ANEXO B - FICHA TÉCNICA DO GERADOR TERMOELÉTRICO TEG1- PB-12611-6.0.....</b>	<b>117</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Como o desenvolvimento econômico industrial de um país está atrelado ao consumo de combustíveis fósseis e energia elétrica, buscam-se cada vez mais sistemas que possuam grande eficiência do ponto de vista produtivo e energético, que minimizem ou reaproveitem a energia dissipada e que, concomitantemente, sejam ecologicamente sustentáveis.

No ano de 2022, o consumo mundial total de energia foi de aproximadamente 14.430 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP). Com o rápido crescimento industrial das nações em desenvolvimento ao longo da última década, o setor industrial consumiu aproximadamente 3.152 MTEP. Estima-se que em 2035, o consumo mundial de energia cresça em mais de 30% (ENERGY INSTITUTE, 2023).

Cerca de um terço da energia total consumida na indústria é descartada como calor residual. O grande problema é que a maior parte dessa energia rejeitada é identificada como calor residual de baixa qualidade (FLEURIAL, 2009). Esse tipo de calor residual tem um pequeno potencial de trabalho e temperaturas abaixo de 230°C (UNEP, 2006).

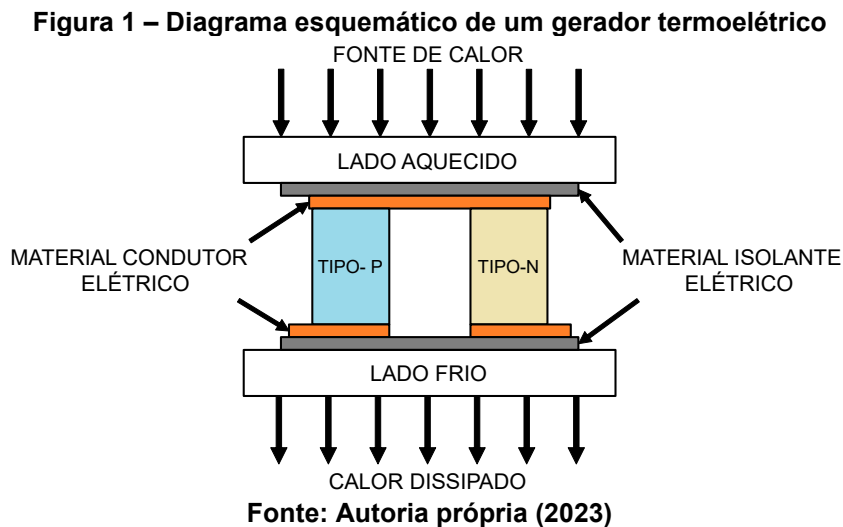
Diante das crescentes preocupações com o aquecimento global e os desafios associados ao esgotamento de petróleo, surge um impulso significativo para o avanço de tecnologias mais eficientes e ambientalmente sustentáveis na recuperação de calor e sistemas de conversão de energia, especialmente aqueles que aproveitam o calor residual de baixa qualidade.

O uso consciente de energia vem sendo incentivado para o controle de desperdício, por isso, a aplicação mais eficiente do calor em processos industriais torna-se fundamental para que haja maior economia de energia. Visando minimizar o desperdício, sistemas de recuperação de energia têm sido cada vez mais explorados (SINGH *et al.*, 2015). Se, ao menos parte da energia térmica expelida por equipamentos industriais para atmosfera puder ser reaproveitada, então, esses sistemas tornam-se objeto importante de pesquisa e/ou aplicação.

O Efeito *Seebeck* está relacionado ao surgimento de uma diferença de potencial elétrico entre dois materiais diferentes, colocados em contato, porém em temperaturas distintas, sendo essa uma propriedade termoelétrica dos materiais (SEEBECK, 1822). Basicamente, é o mesmo efeito que ocorre em termopares, onde se têm dois materiais diferentes unidos e submetidos a uma diferença de

temperatura, fazendo com que, uma diferença de potencial elétrico seja gerada e traduzida em uma leitura de temperatura. Além dessa aplicação em sensores de temperaturas, o efeito termoelétrico pode ser explorado em aplicações aeroespaciais, geração de energia elétrica a partir dos gases aquecidos liberados na combustão interna dos motores ou gases de exaustão de caldeiras, entre outros. Os geradores termoelétricos (TEG, do inglês, *thermoelectric generators*) apresentam vantagens em relação a outros geradores, tais como dimensões reduzidas e baixa necessidade de manutenção (ISMAIL; AHMED, 2009). Embora a eficiência de conversão seja de 5%, estudos realizados no Laboratório de Propulsão a Jato da NASA chegaram à eficiência de 20% para altas temperaturas (FLEURIAL, 2009).

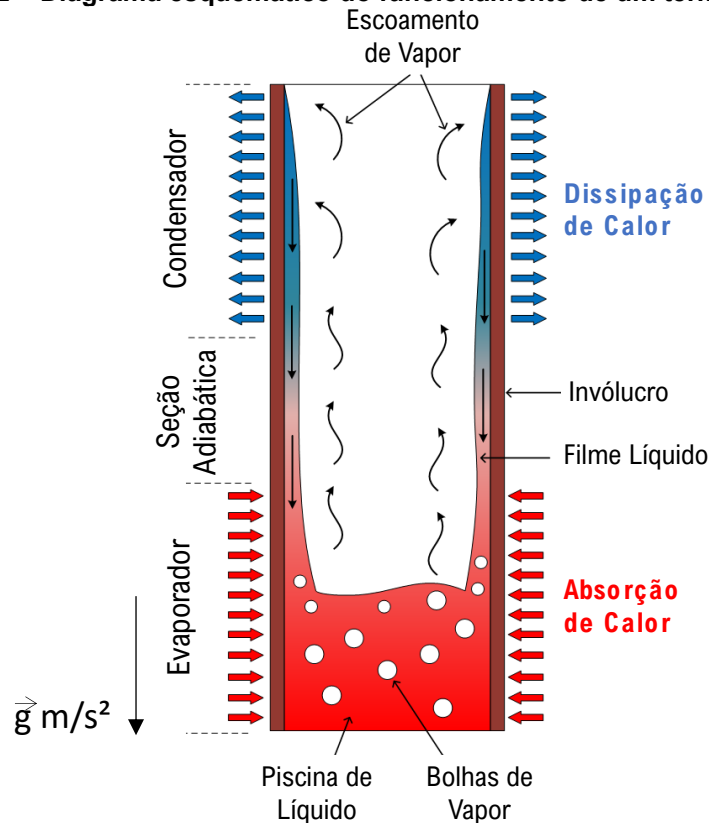
Um gerador termoelétrico de semicondutores consiste em um arranjo de pequenos blocos de dopado, ou seja, modificado quimicamente para o Tipo *N* e Tipo *P*, montados de maneira alternada, eletricamente em série e termicamente em paralelo, entre duas placas de boa condução térmica (SINGH *et al.*, 2015), como ilustra a Figura 1.



A junção dos elementos dopados *P-N* é aquecida na parte superior e a parte inferior do conjunto é resfriada, dessa forma, um gradiente de temperatura é gerado. Os elétrons livres dos elementos dopados da forma *N* e os interstícios dos elementos dopados da forma *P* começam a caminhar para a parte fria, ou seja, parte inferior do sistema. Na parte fria, os elementos dopados da maneira *N* adquirem polaridade negativa, enquanto os elementos da forma *P* polaridade positiva. Fechando o circuito entre os elementos *N* e *P* é criado uma diferença de potencial elétrico e com o acúmulo dos elétrons na extremidade fria, um campo elétrico interno é gerado, que origina a Tensão *Seebeck* (SINGH *et al.*, 2015).

Os termosifões são dispositivos passivos de transferência de calor, ou seja, não necessitam de nenhum tipo de energia externa para o seu funcionamento, que se baseiam na mudança de fase de um fluido de trabalho. Os termosifões possuem como característica principal transferir grandes quantidades de energia na forma de calor com uma pequena diferença de temperatura (REAY *et al.*, 2014). A Figura 2 ilustra esquematicamente o princípio de seu funcionamento.

**Figura 2 – Diagrama esquemático do funcionamento de um termosifão**



**Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2023)**

Como ilustrado esquematicamente na Figura 2, os termosifões são constituídos por três regiões diferentes: o *evaporador*, região onde ocorre a adição de calor; o *condensador*, região que onde é feita a rejeição do calor ao meio externo e a *seção adiabática*, onde não ocorre nenhuma troca térmica (MANTELLI, 2021). A pressão interna do tubo é igual a pressão de saturação do fluido de trabalho. O calor fornecido na região do evaporador faz com que o fluido de trabalho localizado nessa região entre em ebulição. A pressão de vapor resultante direciona o vapor produzido através da seção adiabática para o condensador, onde é condensado, dessa forma libera calor latente de evaporação. O fluido de trabalho condensado retorna por efeito da ação gravitacional para região do evaporador (PETERSON, 1990).

Neste contexto, associando sistemas de transferência de energia a grande eficiência dos termossifões de transferirem energia térmica com a versatilidade dos geradores termoelétricos de transformarem calor em potencial elétrico, pode ser concluído que é de suma importância o estudo de um sistema para a recuperação de energia englobando a combinação entre esses dispositivos.

## **1.1 Objetivos**

Neste item são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral dessa Dissertação de Mestrado é avaliar experimentalmente um sistema composto por geradores termoelétricos assistidos por termossifões aletados visando reaproveitar o calor residual na forma de energia elétrica.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos dessa Dissertação de Mestrado são:

- Projetar e construir um aparato experimental capaz de representar escoamento de gases aquecidos em dutos;
- Construir um sistema de aquisição de dados e um circuito eletroeletrônico resistivo capaz de obter a curva característica de geradores termoelétricos;
- Construir um sistema de geradores termoelétricos assistidos por termossifões aletados;
- Analisar experimentalmente o desempenho térmico do sistema de geradores termoelétricos assistidos por termossifões aletados sob diferentes condições operacionais.

## **1.2 Motivação e justificativa**

Devido à crescente demanda mundial por energia, dispositivos e métodos de reaproveitamento de energia estão sendo cada vez mais pesquisados e utilizados. Dado que em sistemas térmicos a grande parte da energia fornecida pelo combustível é perdida na forma de calor (MONREAL, 2007), o reaproveitamento de

parte dessa energia dissipada nesses sistemas seria fundamental para obter maior eficiência e/ou menor consumo energético.

De acordo com a *Research e Markets*, espera-se que o tamanho do mercado de geradores termoelétricos aumente de US\$ 460 milhões em 2019 para US\$ 741 milhões em 2025 (com uma taxa composta de crescimento anual de 8,3%) (MARKETS, 2019).

Sistemas que dissipam calor como: motores de combustão interna, caldeiras e componentes eletroeletrônicos são fontes de desperdícios de energia, uma vez que essa energia está sendo dissipada para o ambiente sem gerar nenhum tipo de trabalho. Os geradores termoelétricos assistidos por termossifões aletados são uma boa alternativa de solução para o aproveitamento dessa energia, uma vez que eles precisam de uma diferença de temperatura para gerar potência elétrica.

Além desse reaproveitamento da energia perdida, existe também uma questão ambiental, pois se parte da energia é recuperada, então não será necessária a queima de combustível fóssil para suprir essa energia dissipada naturalmente para o ambiente.

Nesse contexto, na presente Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, propõe-se executar estudos experimentais na recuperação de energia térmica utilizando geradores termoelétricos de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) assistidos por termossifões aletados em sistemas de dutos de ar.

### **1.3 Organização do Trabalho**

Neste primeiro capítulo, foram apresentados alguns aspectos gerais dos geradores termoelétricos e termossifões, uma breve explanação do calor residual de baixa qualidade, além dos objetivos assim como, a motivação para o estudo.

O Capítulo 2, contém as premissas do embasamento teórico referente aos termossifões, seus componentes e funcionamento. Foi introduzido o assunto de termoeletricidade e suas aplicações e nesse capítulo ainda a teoria e a revisão bibliográfica de sistemas utilizados para a recuperação de calor residual provenientes de setores industriais.

O Capítulo 3 apresenta, os materiais e métodos utilizados nesse trabalho, foi apresentado a estrutura física de geradores termoelétricos, a construção dos termossifões, a montagem do aparato experimental, o desenvolvimento de um

sistema de aquisição de dados para a obtenção da potência recuperada em dutos de ar aquecido e a análise das incertezas experimentais.

O Capítulo 4 apresenta, os resultados de potência elétrica gerada pelos geradores termoelétricos para as diferentes condições operacionais do sistema, o comportamento do sistema passivo de transferência de calor, a análise do pré-aquecimento do ar de entrada e a eficiência do sistema. No Capítulo 5 são apresentadas a conclusão do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Nos apêndices são apresentados, a metodologia para calibração dos termopares, a rotina computacional e esquema eletroeletrônico para o sistema de aquisição da curva característica dos geradores termoelétricos, os cálculos para determinação da vazão mássica de ar que entra no sistema e o projeto mecânico do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto. Para os anexos, são mostrados o catálogo do ventilador centrífugo e a folha de dados dos geradores termoelétricos utilizados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

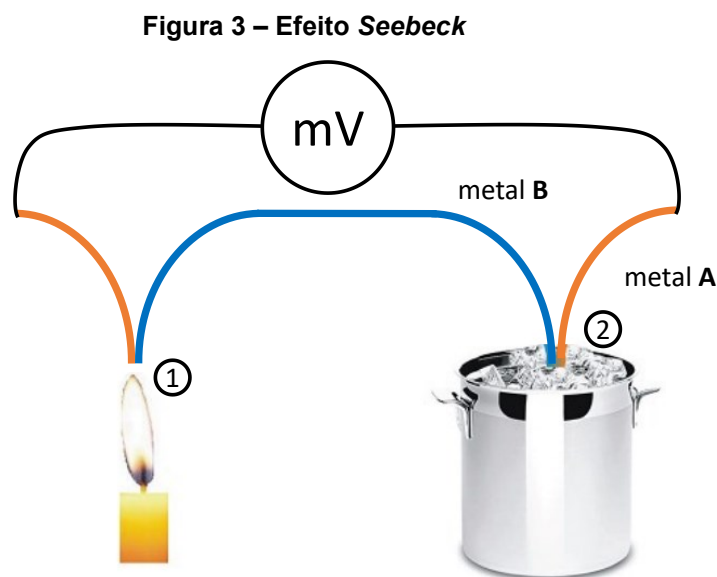
Este capítulo apresenta o embasamento teórico referente à recuperação de calor residual, os princípios de funcionamento dos geradores termoelétricos e dos termossifões bem como uma revisão de alguns dos trabalhos presentes na literatura, que possibilitam uma compreensão crítica sobre o assunto.

### 2.1 Termoeletricidade

Termoeletricidade é um fenômeno físico que relaciona a temperatura com as propriedades elétricas dos materiais (PIEDADE, 1997).

#### 2.1.1 Efeito Seebeck

O Efeito Seebeck estudado e descoberto em 1821 pelo cientista *Thomas Johann Seebeck* (1770-1831), mostra que, a união de dois metais diferentes sob o efeito de um gradiente de temperatura faz com que os elétrons se movimentem, gerando corrente elétrica (LEE, 2010). A Figura 3 ilustra esse fenômeno.



Fonte: Moura (2010)

Observando a Figura 3, em que o circuito é formado por dois condutores diferentes, metais A e B, mostrado pelas cores azul e laranja, respectivamente, suas junções, um (1) e dois (2) encontram-se em temperaturas distintas  $T_1$  e  $T_2$ , em que  $T_1 > T_2$ , dessa forma, é produzida uma tensão  $U$  satisfazendo a Equação (1).



$$U = \alpha_{ab}(T_1 - T_2), \quad (1)$$

sendo que,  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas das extremidades das junções [K] e que  $\alpha_{ab} = (\alpha_a - \alpha_b)$ , onde  $\alpha_a$  e  $\alpha_b$  são coeficientes de Seebeck absolutos e  $\alpha_{ab}$  é o coeficiente de Seebeck do par termoelétrico dos materiais.

A Equação (1) pode ser reescrita como:

$$\alpha_{ab} = \frac{U}{(T_1 - T_2)} = \frac{U}{\Delta T}. \quad (2)$$

Se a corrente flui da junção quente para a fria, o valor de  $\alpha$  é negativo; se a corrente flui da junção fria para a quente, o valor de  $\alpha$  é positivo. Esse coeficiente é medido em [ $\mu\text{V/K}$ ] e é propriedade do material (SINGH, 2015). A Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra valores do coeficiente de Seebeck de alguns materiais.

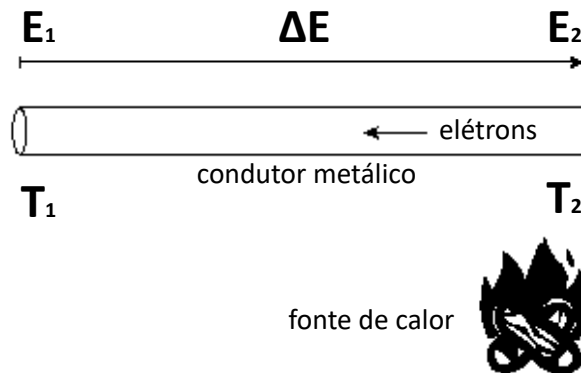
**Tabela 1 – Coeficiente de Seebeck para metais, ligas e semicondutores**

Metais/Ligas e outros materiais	Coeficiente de Seebeck [ $\mu\text{V/K}$ ]	Semicondutores	Coeficiente de Seebeck [ $\mu\text{V/K}$ ]
Sb	47,0	Se	900,0
NiCr	25,0	Te	500,0
Cd	7,5	Si	440,0
W	7,5	Ge	300,0
Au	6,5	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ (tipo N)	-230,0
Ag	6,5	$\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ (tipo P)	300,0
Cu	6,5	$\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (tipo P)	185,0
Rh	6,0	PbTe	-180,0
Pt	0,0	$\text{SnBb}_4\text{Te}_7$	25,0
Na	-2,0	$\text{SnBi}_4\text{Te}_7$	120,0
KOH	-9,0	$\text{SnBi}_3\text{SbTe}_7$	151,0
Ni	-15,0	$\text{SnBi}_{2,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_7$	110,0
Cu Ni Mn Fe	-35,0	$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90,0
Bi	-72,	$\text{PbBi}_4\text{Te}_7$	-53,0

Fonte: Adaptada de Gonçalves (2008)

A Figura 4 ilustra a direção da movimentação dos elétrons, quando uma barra de um determinado material é aquecida em sua extremidade. O aquecimento faz com que a energia térmica se transmita aos elétrons aumentando sua agitação, ocorrendo então a migração desses para a camada de valência, tornando-os elétrons livres e iniciando um deslocamento em direção à região mais fria do condutor.

Figura 4 – Deslocamento dos elétrons de uma fonte quente para uma fonte fria

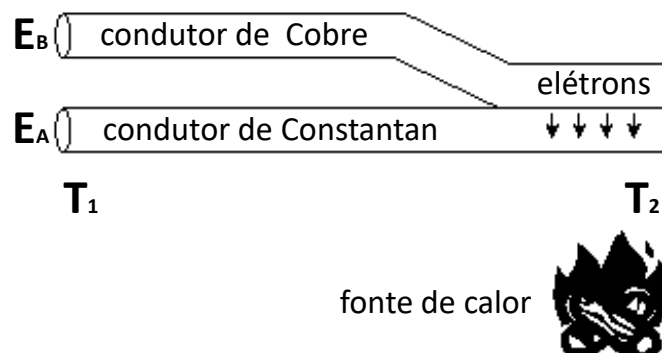


Fonte: Gonçalves (2008)

O local aquecido fica com menos elétrons na camada de valência, ou seja, com excesso de cargas positivas. O local mais frio terá excesso de elétrons. Essa migração de elétrons cessará quando a barra atingir o equilíbrio térmico do sistema.

Quando se colocam dois condutores em contato e na mesma situação anterior, os elétrons que saltaram da camada de valência tendem a migrar para o outro condutor, produzindo uma diferença de potencial (Figura 5).

Figura 5 – Movimentação dos elétrons entre diferentes materiais



Fonte: Gonçalves (2008)

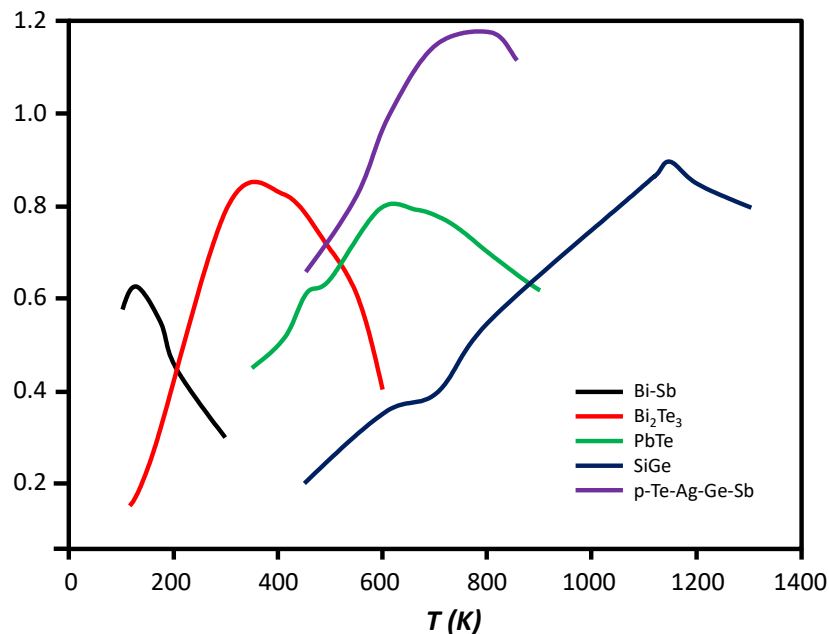
Em comparações de sistemas termoelétricos é conveniente determinar a Figura de Mérito desses sistemas, representada pela letra  $Z$ , cujo valor está relacionado com o desenvolvimento das aplicações termoelétricas (BANGERT, 2006). Essa comparação relaciona três tipos de grandezas: condutividade térmica, propriedades elétricas e temperatura absoluta de funcionamento. Um material termoelétrico bom possui uma ótima Figura de Mérito (NOLAS, 1999). A Equação (3) apresenta as variáveis utilizadas no cálculo da Figura de Mérito.

$$Z = \frac{\alpha^2 \gamma}{k} = \frac{\alpha^2}{\rho k}, \quad (3)$$

em que o coeficiente de *Seebeck*, a resistividade elétrica, a condutividade elétrica e a condutividade térmica, são representadas por  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\gamma$  e  $k$ , respectivamente.

O Gráfico 1 apresenta a variação da Figura de Mérito de algumas ligas com a temperatura.

**Gráfico 1 – Relação de Figura de Mérito em função da temperatura para algumas ligas**



Fonte: Adaptado de Fernandes (2012)

O Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) e outras ligas de Telureto são boas para dispositivos que operam na faixa entre 150K e 600K, as ligas de Silício (Si) e Silício-Germânico (Si-Ge) são adequadas para temperaturas mais elevadas, que vão até 1300K. O desafio é encontrar materiais que reúnam, simultaneamente, alta conversão termoelétrica, baixa condutividade térmica e elevada condutividade elétrica, assim, seria obtida uma alta taxa de Figura de Mérito (GONÇALVES, 2008). Analisando o Gráfico 1, pode ser observado que a melhor faixa de Figura de Mérito para o Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) está entre 300K e 575K.

Como a Figura de Mérito não é constante com a variação da temperatura, ela pode ser escrita de forma adimensional calculada a uma dada temperatura por (GONÇALVES, 2008).

$$ZT = \frac{\alpha^2 \gamma}{k} T = \frac{\alpha^2}{\rho k} T, \quad (4)$$

sendo que,  $T$  é a temperatura absoluta de trabalho [K].

De acordo com Gonçalves (2008), a eficiência de um gerador termoelétrico converter energia térmica em energia elétrica pode ser escrita por:

$$\mu_{TEG} = \left( 1 - \frac{T_{2TEG}}{T_{1TEG}} \right) \left( \frac{-1 + \sqrt{ZT + 1}}{\sqrt{ZT + 1} + \frac{T_{2TEG}}{T_{1TEG}}} \right). \quad (5)$$

O físico alemão *Edmund Altenkirch* (1880-1953) desenvolveu, em 1911, a teoria básica da termoeletricidade e dos elementos térmicos. Ele constatou que os materiais usados em geradores termoelétricos necessitam ter um alto coeficiente de *Seebeck* e boa condutividade elétrica para minimizar o Efeito *Joule*. Além disso, é interessante que o material tenha baixa condutividade térmica para dificultar a troca térmica entre os lados do gerador termoelétrico, dessa forma, dificultaria o equilíbrio térmico que cessaria o gradiente de temperatura.

Porém, para que essas três propriedades nos materiais estejam no mesmo material é uma tarefa bastante complexa. Normalmente, um material que é bom condutor elétrico é também um bom condutor térmico. Com um baixo coeficiente de *Seebeck*, os metais apresentam essas características anteriores (EDU, 2011). Enquanto, os isolantes, apresentam coeficiente de *Seebeck* alto, com condutividade elétrica muito baixa. Os semicondutores possuem coeficientes de *Seebeck* moderados, elevada condutividade térmica e boa condutividade elétrica, que é limitada pela elevada condutividade térmica.

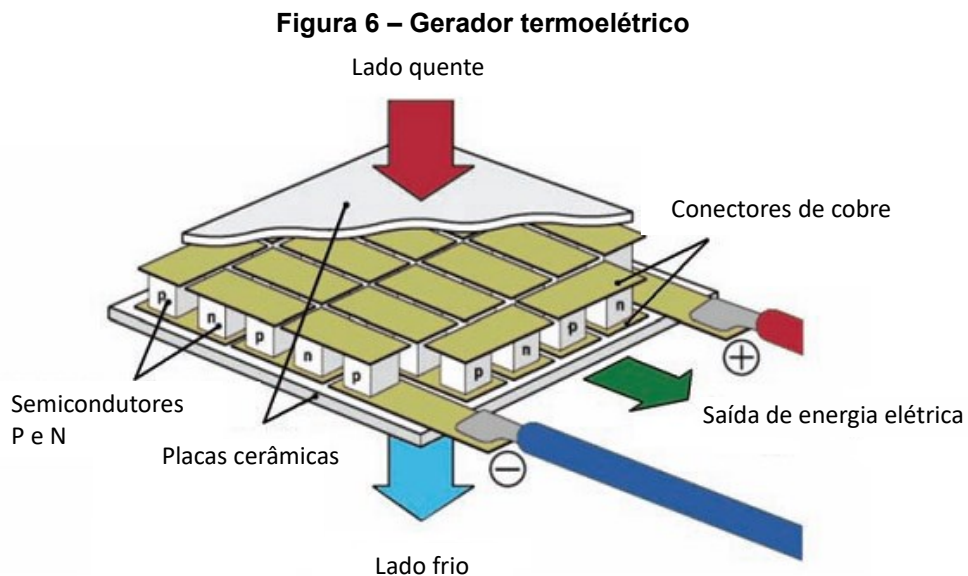
### 2.1.2 Geradores termoelétricos (TEG)

Um gerador termoelétrico, é um dispositivo que pode converter energia térmica em potencial elétrico. Ainda se aplicarmos um potencial elétrica nos geradores termoelétricos ele irá funcionar como uma bomba de calor em estado sólido que não tem partes móveis, sem vibração e sem ruído, é leve e muito confiável (ROWE, 2006). Para gerar energia elétrica, o TEG deve ser conectado entre uma fonte de calor e um dissipador de calor. Devido ao gradiente de temperatura criado entre a fonte de calor e o dissipador de calor, o calor fluirá através do módulo e será rejeitado para a meio externo através do dissipador de calor. Se o gradiente de temperatura for mantido, a energia elétrica será continuamente gerada (RIFFAT, 2003).

O gerador termoelétrico estudado experimentalmente nessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, ilustrado esquematicamente na Figura 6, consiste em um arranjo de pequenos blocos de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) dopado Tipo *N* e Tipo *P*, montados de maneira alternada, eletricamente em série e termicamente em paralelo, entre duas placas de boa condução térmica (ESARTE, 2001).

A dopagem eletrônica consiste em adicionar elementos químicos de maneira controlada para fazer com que o semicondutor passe a conduzir energia elétrica com maior facilidade. Para tal, são utilizadas as seguintes dopagens:

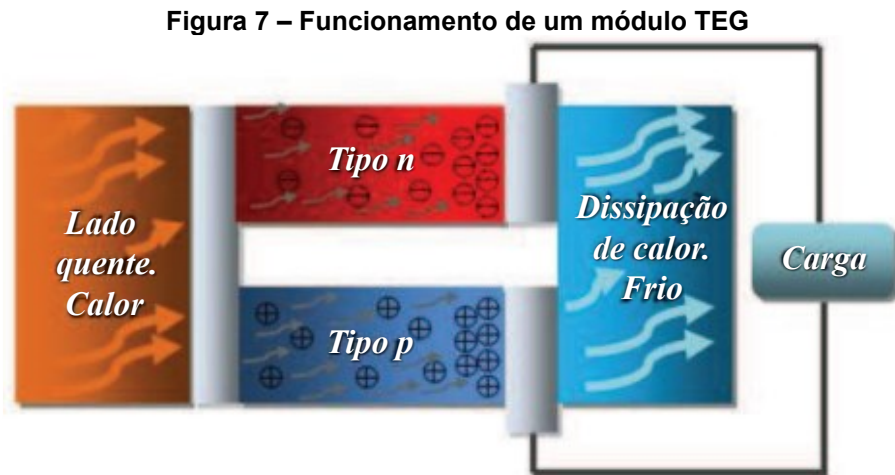
- Tipo *N*: O átomo da estrutura cristalina é substituído por outro com um número maior de elétrons na camada de valência. Isso faz com que o átomo seja mais facilmente excitado termicamente. Dessa forma, o elemento passa a ter características condutoras (SWART, 2002).
- Tipo *P*: Quando os átomos introduzidos na estrutura cristalina do semicondutor possuem deficiência de elétrons em relação aos do semicondutor. Com essa falta de elétrons, originam-se lacunas no semicondutor que conduzem corrente e a ausência de elétrons cria uma carga positiva (SWART, 2002).



**Fonte: Adaptado de Chuchnowski et al. (2011)**

Na parte superior (lado quente) da Figura 6 a junção *P-N* é aquecida e a parte inferior (lado frio) é resfriada, dessa forma, um gradiente de temperatura é mantido. Os elétrons livres dos elementos dopados da forma *N* e os interstícios dos

elementos dopados da forma  $P$  começam a migrar para a parte fria do sistema. Com o acúmulo dos elétrons na extremidade na parte fria, um campo elétrico interno é gerado originando a Tensão *Seebeck* (MONREAL, 2007). Esse fenômeno físico é ilustrado esquematicamente na Figura 7.



Fonte: Antunes (2011)

Dessa forma, os elementos dopados de maneira  $N$  adquirem polaridade negativa na parte fria e a extremidade fria do material dopado da forma  $P$  fica carregada positivamente. Fechando o circuito entre os elementos  $N$  e  $P$  uma corrente elétrica é criada no sistema (ANTUNES, 2011).

## 2.2 Calor residual

O calor residual pode ser definido como a soma da exergia que está disponível em um processo após análise *pinch*, ou então, como a energia que é gerada em processos industriais que não é usada em nenhum uso prático, desperdiçada e despejada no meio ambiente. É possível realizar estudos de conversão de calor residual em trabalho utilizando uma análise exérgica do sistema (BENDIG, 2013). Geralmente, o nível de temperatura associado ao calor residual não permite a utilização direta e, portanto, é descartado para o meio ambiente.

O calor residual é transferido para o meio ambiente através de vários processos, incluindo condução, convecção e radiação térmica, gases de exaustão com temperatura elevada, água de resfriamento, produtos aquecidos e superfícies de equipamentos quentes. Estima-se que de 20% a 50% do combustível consumido nas indústrias é liberado para o meio ambiente sem gerar trabalho (REMELI, 2016).

O calor residual pode ser classificado em baixa, média e alta qualidade, o Quadro 1 apresenta as faixas de temperatura e possíveis fontes desses tipos de calor residual.

**Quadro 1 – Faixa de temperatura para tipos de calor residual**

<b>Tipos de calor residuais</b>	<b>Faixa de temperatura [°C]</b>	<b>Fontes de calor residual</b>
Alta qualidade	Acima de 600	Refino de alumínio, níquel e sílica
Média qualidade	230 - 600	Gases de exaustão de caldeiras, lavagem de gases
Baixa qualidade	Abaixo de 230	Condensadores de vapor, sistema de resfriamento de condensado

**Fonte: Adaptada UNEP (2006)**

### **2.3 Sistemas passivos de recuperação de calor**

Sistemas passivos de recuperação de calor são sistemas que não necessitam de nenhum tipo de energia extra para o seu funcionamento. Os termossifões se classificam como sistema passivos de transferência de calor.

#### **2.3.1 Termossifões**

Os termossifões são divididos em duas estruturas principais: o *invólucro*, que pode ser composto de cerâmica, vidro ou metal e o *fluido de trabalho*, que por sua vez, varia de acordo com a faixa de trabalho, para baixas temperaturas, pode ser usado desde nitrogênio e hélio, enquanto para altas temperaturas podem ser usados metais líquidos, como lítio, potássio ou sódio. As duas estruturas são de suma importância para o correto funcionamento de um tubo de calor assistido pela gravidade, porém para sua aplicação, as condições do ambiente devem ser observadas e dessa forma especificar corretamente o termossifão a ser usado (AKBARZADEH; WADOWSKI, 1996; REAY *et al.*, 2014).

Como forma de funcionamento os termossifões seguem a seguinte lógica: na área do *evaporador*, energia térmica é fornecida ao termossifão, fazendo com que o fluido de trabalho vaporize. Devido à diferença de pressão, o vapor gerado se desloca para as regiões frias do termossifão, que é denominada de *condensador*, na qual o calor transportado é rejeitado para a fonte fria (sumidouro de calor) (PETERSON, 1994). Nesse processo de rejeição de calor, o líquido vaporizado é condensado e retorna ao evaporador. A Figura 2 ilustra de forma esquemática o funcionamento e componentes de um termossifão. O retorno do fluido de trabalho do

condensador ao evaporador ocorre pelo efeito gravitacional, resultante do escoamento do fluido de trabalho pela parede do invólucro. Dessa forma, o ciclo termodinâmico é fechado. A *seção adiabática* é isolada do meio externo e pode apresentar dimensões variadas e ainda, em alguns casos podem ser inexistentes e é localizada entre o evaporador e o condensador (MANTELLI, 2021).

#### 2.3.1.1 *Invólucro*

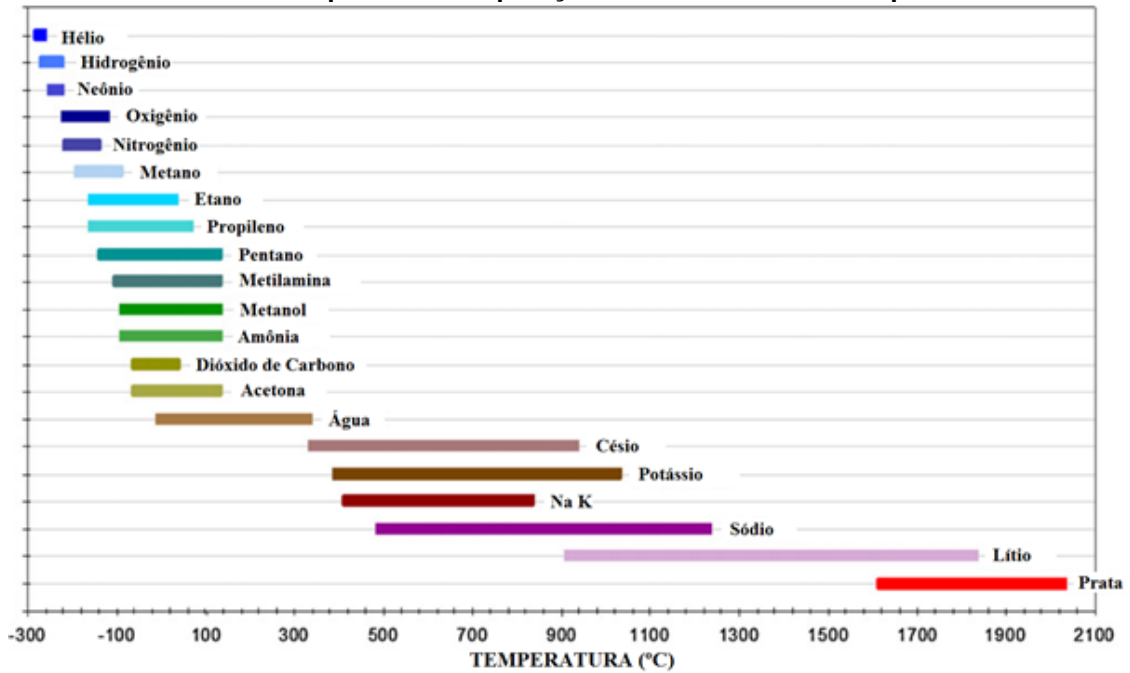
A função do invólucro é proporcionar estabilidade estrutural e isolar o fluido de trabalho do ambiente externo, resistir à pressão do vapor no interior do tubo e ao vácuo no momento de sua construção, ser estável mecanicamente e apresentar uma temperatura de fusão acima das temperaturas operacionais. Para promover uma eficiente transferência de calor entre o vapor e o meio externo é desejável que o invólucro apresente uma alta condutividade térmica. O material deve ser resistente à corrosão que o meio externo pode ocasionar e ser maleável o suficiente para ser conformado no tamanho e forma desejados (SHABANY, 2010).

#### 2.3.1.2 *Fluido de trabalho*

O funcionamento dos termossifões é baseado na vaporização e na condensação do fluido de trabalho contido no seu interior, a seleção desse fluido é uma etapa de suma importância e leva muitos parâmetros em consideração, tais como: compatibilidade química, faixa de temperatura de operação, pressão de vaporização e molhabilidade. Os termossifões apresentam faixas particulares de temperatura de operação para cada tipo de aplicação (FAGHRI 2014). O Gráfico 2 apresenta um gráfico de alguns fluidos de trabalho relacionados ao nível de temperatura de operação do dispositivo.



**Gráfico 2 – Faixa de temperatura de operação de fluidos de trabalho para termossifões**



Fonte: Yang *et al.* (2012) *apud* Nishida (2016)

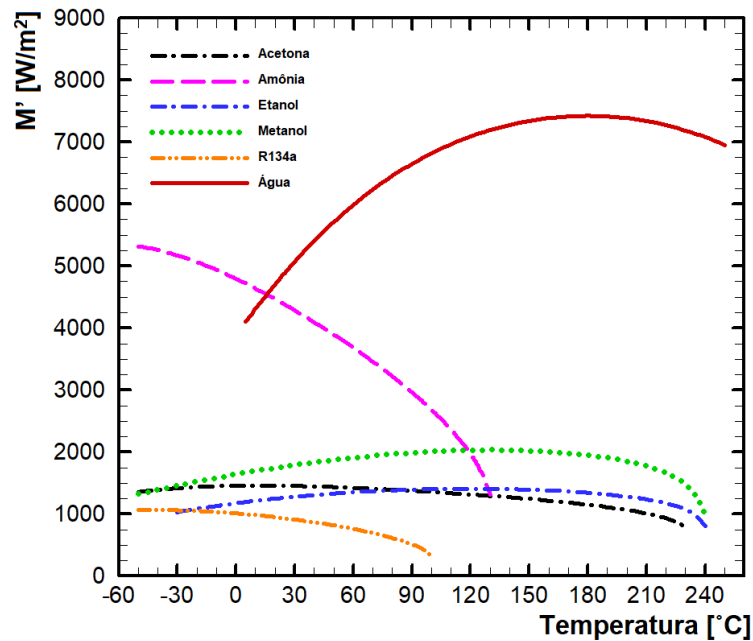
A Figura de Mérito para termossifões,  $M'$ , é um parâmetro que relaciona as propriedades de cada fluido de trabalho com sua máxima capacidade de transporte de energia na forma de calor. Devido a essa característica, esse parâmetro pode ser utilizado para realizar comparações entre os fluidos de trabalho (REAY *et al.*, 2014) e pode ser expresso por:

$$M' = \left( \frac{h_{lv} k_l^3 \rho_l}{\mu_l} \right)^{1/4}, \quad (6)$$

sendo que,  $h_{lv}$  é o calor latente de vaporização do fluido de trabalho,  $k_l$  é a condutividade térmica da fase líquida do fluido de trabalho,  $\rho_l$  a massa específica da fase líquida do fluido de trabalho e  $\mu_l$  é a viscosidade dinâmica da fase líquida do fluido de trabalho.

O Gráfico 3 ilustra o comportamento da Figura de Mérito dos termossifões em função da temperatura de operação para alguns fluidos de trabalho, para uma faixa de temperatura que varia de  $-60^\circ\text{C}$  até  $240^\circ\text{C}$ .

**Gráfico 3 – Figura de Mérito em função da temperatura para diversos fluidos de trabalho**



Fonte: Russo *et al.* (2015)

### 2.3.2 Limites operacionais de termossifões

Apesar dos termossifões apresentarem uma elevada eficiência, existem fatores que limitam a transferência de calor. Esses fatores são conhecidos como limites operacionais e determinam a taxa máxima de calor transportado. Podem ser citados como fatores que restringe a transferência de calor: o limite de arrasto, o limite de início de operação, o limite viscoso, o limite sônico, o limite do condensador e o limite de ebulição (MANTELLI, 2021).

## 2.4 Revisão da literatura

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos, presentes na literatura, que tem como objetivo estudar a recuperação de calor residual utilizando gerador termoelétrico assistido ou não por termossifões ou tubos de calor.

Verojporn *et al.* (2015) apresentaram uma maneira diferenciada de recuperação de calor residual e conversão de eletricidade utilizando um TEG auxiliado por tubo de calor. O sistema consiste no TEG encaixado entre dois tubos de calor, um conectado ao lado quente do TEG e o segundo conectado ao lado frio do TEG. Experimentos foram conduzidos para comprovar o modelo teórico. Foi verificado que a previsão teórica e os resultados experimentais coincidem no sentido de que ambos os resultados compartilham a mesma tendência. Os resultados

experimentais mostraram que a eficiência do trocador de calor aumentou de 67,9% para 72,4% com o aumento da velocidade de escoamento. Esse sistema de cogeração foi considerado uma tecnologia ecologicamente correta e barata, pois utiliza energia desperdiçada e não envolve partes móveis.

Ahammed *et al.* (2015) constataram experimentalmente o desempenho do resfriamento termoelétrico de dispositivos eletroeletrônicos com nanofluido em um trocador de calor de múltiplos canais. O resfriador termoelétrico (TEC) de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) com uma diferença de temperatura máxima de  $67^\circ\text{C}$  foi usado para extrair calor dos dispositivos eletroeletrônicos, como um transistor de potência. O transistor de potência na placa de circuito normalmente operou com a energia elétrica que variou de 20Wh a 400Wh, que foi considerada como a energia de entrada para o TEC. Nanofluido de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) disperso em água com concentrações de volume de 0,1% e 0,2% foi usado como refrigerante para remover o calor do lado quente do TEC. O número de *Reynolds* variou entre 200 e 1000. O resultado mostrou aumento de 40% no coeficiente de desempenho do módulo termoelétrico para 0,2% da concentração volumétrica de nanopartículas, que foi considerada como a energia de entrada para o TEC. Um decréscimo de 9,15% na diferença de temperatura termoelétrica entre o lado quente e frio também foi observado para os nanofluidos (0,2%), o que aumentou a capacidade de resfriamento do módulo.

Singh *et al.* (2016) investigaram as lagoas solares de gradiente de salinidade que funcionam como um coletor de energia solar térmica integrada e sistema de armazenamento. A diferença de temperatura entre a zona convectiva superior e a zona convectiva inferior de uma lagoa solar de gradiente de salinidade pode estar na faixa de  $40^\circ\text{C}$  a  $60^\circ\text{C}$ . A temperatura no fundo da lagoa escolhida pode chegar a  $90^\circ\text{C}$ . O calor de baixa qualidade ( $<100^\circ\text{C}$ ) das lagoas solares é atualmente convertido em eletricidade pelos motores orgânicos do ciclo *Rankine*. Os geradores termoelétricos podem operar com diferenças de temperatura muito baixas e podem ser um bom candidato para substituir os motores do ciclo *Rankine* orgânico para geração de energia a partir de lagoas solares de gradiente de salinidade. A diferença de temperatura em uma lagoa solar pode ser usada para alimentar geradores termoelétricos para produção de eletricidade, para isso um trocador de calor TEG foi estudado. O principal objetivo do estudo foi gerar eletricidade a partir de uma fonte de calor de baixa qualidade. A quantidade de energia produzida foi linear à diferença

de temperatura no TEG. O trocador de calor TEG foi eficaz na conversão do calor de baixo grau de uma lagoa solar em eletricidade. Os módulos TEG são resilientes e robustos, operando em um ambiente salino corrosivo. Mesmo com baixas diferenças de temperatura entre a zona de armazenamento e a zona de convecção superior, os módulos do TEG foram capazes de gerar eletricidade. Isso teria sido impossível com os motores convencionais de ciclos *Rankine* orgânicos devido aos requisitos de uma certa temperatura limite para a evaporação do fluido orgânico. Os resultados obtidos indicaram perspectivas significativas de tal sistema para gerar energia a partir de calor de baixa qualidade para sistemas de fornecimento de energia remota.

Remeli *et al.* (2016) exploraram um método de gerar eletricidade enquanto recupera calor residual através da integração de tubos de calor e geradores termoelétricos (ou seja, sistema HPTEG). Os processos simultâneos de recuperação de calor residual e geração de energia são obtidos sem o uso de nenhuma peça móvel. O sistema HPTEG consiste em geradores termoelétricos de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), que são colocados entre dois tubos de calor com aletas para alcançar um gradiente de temperatura ao longo do TEG para geração de eletricidade. Um trocador de calor em escoamento contracorrente foi construído usando dois dutos de ar separados. Os dutos de ar foram termicamente acoplados usando os módulos HPTEG. A seção do evaporador do tubo de calor absorvia o calor residual em um duto de ar quente. O calor foi então transferido através das superfícies do TEG. A seção do condensador do HPTEG coletou o excesso de calor do lado frio do TEG antes de liberá-lo para o duto de ar frio. Um aquecedor elétrico de 2kW foi instalado no duto de ar quente para simular o gás de exaustão, um ventilador de ar foi instalado na entrada de cada duto para direcionar o fluxo de ar para os dutos, um modelo teórico foi desenvolvido para prever o desempenho do sistema HPTEG usando o Método da Efetividade-NUT ( $\epsilon$ -NUT). O modelo desenvolvido foi capaz de prever a saída térmica e elétrica do HPTEG, juntamente com a taxa de transferência de calor. Os resultados mostraram que aumentando a velocidade do ar frio, a eficiência do trocador de calor foi aumentada de 52% para 58% e a potência máxima foi aumentada de 3,0W para 4,3W.

Date *et al.* (2016) exploraram um método de recuperação de calor residual industrial e conversão em eletricidade usando um gerador termoelétrico (TEG). Para esse propósito, um protótipo de bancada em escala laboratorial de recuperação de calor residual e sistema de conversão de eletricidade foi projetado e fabricado. Esse

sistema de bancada consiste em TEG à base de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) inserido entre dois tubos de calor. O primeiro tubo de calor foi ligado ao lado quente do TEG e o segundo ao lado frio do TEG. O calor residual foi simulado usando um aquecedor elétrico de 2kW para aquecer o ar no sistema. Os resultados experimentais foram utilizados para validar o modelo teórico previamente desenvolvido. A configuração de recuperação de calor de 2kW foi instalada com oito fileiras dos módulos HPTEG. Nos experimentos, a velocidade do ar foi variada entre 1,1m/s e 1,6 m/s usando um ventilador na entrada do sistema. Devido ao aumento da temperatura, o limite de temperatura do TEG, a menor velocidade do ar foi limitada a 1,1m/s. O limite de temperatura do TEG foi estabelecido pelo fabricante a 125°C. Acima desse limite, o material de solda do TEG pode danificar e afetar seu desempenho. A partir dos resultados experimentais, pode ser constatado que a taxa de transferência de calor do sistema HPTEG foi reduzida com o aumento da velocidade do ar. A redução da taxa de transferência de calor ocorreu devido a uma queda do gradiente de temperatura entre os dutos quente e frio. A maior taxa de transferência de calor medida foi 1079W a uma velocidade do ar de 1,1m/s. Pode ser verificado que a eficiência do sistema melhorou de 35% para 41% quando o escoamento de ar foi reduzido para a velocidade mínima. Em uma baixa velocidade do ar, a diferença de temperatura entre o ar quente e o ar frio se tornou maior, o que contribuiu para o aumento da eficiência do sistema.

Kim *et al.* (2017) investigaram experimentalmente o desempenho da recuperação de calor residual de um gerador termoelétrico de contato direto (DCTEG) em um motor a diesel. Para conduzir uma análise perspicaz das características do DCTEG, três parâmetros experimentais, carga do motor, velocidade de rotação e temperatura do líquido refrigerante foram escolhidos para variar durante os experimentos. Resultados experimentais mostraram que maiores diferenças de temperatura entre módulos termoelétricos (TEM), maiores cargas de motor e velocidades de rotação levam a uma eficiência de conversão de energia melhorada do DCTEG, que ficou na faixa de 1% a 2%, enquanto a potência de saída variou 12W a 45W. O aumento na eficiência de conversão para uma maior carga do motor se tornou mais perceptível aumentando a velocidade de rotação do motor. Uma diminuição de 10°C na temperatura do refrigerante produziu um aumento de aproximadamente 0,25% na eficiência de conversão para as condições de operação do motor. Os resultados do DCTEG estavam de acordo com os resultados

experimentais. Também é importante destacar que a distribuição de temperatura da simulação numérica e uma correlação empírica para uma relação temperatura-potência forneceu uma boa correlação para a potência de saída do DCTEG, especialmente em condições de baixa carga de resistência elétrica. Para valores de resistências elétricas elevadas, houve um distanciamento dos valores teóricos. A eficiência de recuperação de calor do DCTEG estava na faixa de 5,7% a 11,1%, que foi obtida comparando a taxa de transferência de calor do gás de exaustão a uma superfície dos TEMs com a energia total dos gases de escape que entrava no DCTEG. Os resultados numéricos também mostraram que a maior parte da energia térmica dos gases de escape extraídos pelo DCTEG foi usada para conversão de energia termoelétrica, e apenas cerca de 1/5 da energia foi desperdiçada para o meio ambiente, independentemente das condições de carga do motor.

Mostafavi *et al.* (2018) verificaram que o calor perdido pelas chaminés tem uma capacidade adequada de recuperação de energia. Um método novo e eficaz de recuperar essa energia foi o uso de geradores termoelétricos, que convertem diretamente a energia térmica em eletricidade. Algumas das vantagens dos geradores termoelétricos incluem a apelo ambiental e a falta de partes móveis ou rotativas, o que os faz operar sem ruído e prolonga sua vida útil. Esse estudo tratou da modelagem geral de um sistema gerador termelétrico, incluindo a modelagem do sistema de resfriamento para o lado frio do gerador termoelétrico, sistema de transferência de calor da chaminé para o lado quente do gerador termoelétrico e também a modelagem dos próprios módulos termoelétricos. Em continuação, para validar as equações obtidas, um protótipo experimental desse gerador termoelétrico foi fabricado e os resultados empíricos incluindo a tensão nominal, corrente e potência do sistema fabricado foram comparados com os resultados teóricos. Essa comparação mostrou a validade da modelagem apresentada e a boa concordância entre os resultados teóricos e práticos, especialmente em baixas temperaturas. Com base nos cálculos, o maior erro foi de 4,6% para uma diferença de temperatura menor que 100°C. Além disso, para a mesma diferença de temperatura, as maiores potências de saída teórica e prática para esse módulo foram 3,4W e 2,8W, respectivamente. Considerando a correspondência desses resultados, os efeitos de alguns parâmetros importantes na potência de saída do considerado gerador termoelétrico também foram investigados, e a influência significativa do coeficiente de condução térmica dos módulos termoelétricos foi demonstrada.

Fachini *et al.* (2019) apresentaram uma análise experimental da conversão direta de energia térmica em energia elétrica. A conversão de energia térmica em energia elétrica ocorreu por meio de um gerador termoelétrico. Esse efeito está associado ao surgimento de uma diferença de potencial elétrico entre dois materiais diferentes, colocados em contato a diferentes temperaturas. Essa relação entre temperatura e propriedades elétricas do material é conhecida como termoeletricidade. Esse estudo experimental teve como objetivo a obtenção de curvas características operacionais de um gerador termoelétrico, para diferentes gradientes de temperatura e sob pressão constante entre a placa de aquecimento e o dissipador de calor. Resistores elétricos foram utilizados para aquecer o gerador termoelétrico, simulando o calor residual. Para resfriamento, um trocador de calor foi utilizado a fim de maximizar a diferença de temperatura entre os lados do gerador termoelétrico. Dessa forma, foi possível realizar uma análise experimental da potência elétrica obtida para diferentes faixas de temperatura entre as faces do gerador termoelétrico e, com isso, verificar a aplicabilidade em sistemas reais.

Jaziri *et al.* (2019) apresentam uma análise aprofundada da aplicação de geradores termoelétricos para a recuperação de resíduos de energia térmica em diversos setores, utilizando os mais recentes *designs*, materiais e tecnologias. Os geradores termoelétricos provaram sua utilidade em dispositivos de baixa e até alta potência, bem como em aplicações miniaturizadas e em massa, dependendo da faixa de potência gerada, dos materiais e do processo de fabricação. Muitas aplicações foram introduzidas, bem como suas fontes de energia e relação custo-benefício, como dispositivos eletroeletrônicos industriais, automóveis e aplicações aeroespaciais. Além disso, os pesquisadores buscaram melhorar a eficiência de conversão, utilizando novas tecnologias, miniaturização, aumentando o número de termopares, entre outros, mas ignoram a necessidade de otimização em termos de *design* dos módulos. Efetivamente, foi concluído que a resistência elétrica interna dos módulos TEG desempenha o papel principal para fornecer maior potência elétrica que também dependem das dimensões dos termopares e conectores.

Ali *et al.* (2020) estudaram a melhoria do desempenho de um gerador termoelétrico (TEG) por meio da aplicação de tubos de calor-dissipadores sob convecção natural. O objetivo principal foi maximizar a potência de saída e a eficiência do TEG, ao mesmo tempo em que se buscava minimizar os custos do sistema. Os resultados obtidos mostraram melhorias significativas no desempenho

do TEG em comparação com estudos anteriores. Através da otimização dos parâmetros de espaçamento, comprimento, altura e material das aletas, foi possível alcançar uma potência de saída máxima de 8,2W e uma eficiência de 3%. Esses resultados validam a eficácia da metodologia na otimização do sistema TEG e destacam a importância da otimização de parâmetros para melhorar o desempenho e reduzir os custos dos geradores termoelétricos.

Nadaf e Preethi (2021) investigaram a recuperação de energia térmica por meio da utilização de TEG. O objetivo principal foi explorar as aplicações e melhorias no uso de TEG para a geração de energia a partir do calor residual em diferentes cenários de baixa e alta potência. Além disso, diversos trabalhos foram revisados os circuitos eletrônicos disponíveis e os métodos utilizados para a transferência eficiente de energia para a carga a partir dos TEG, apresentando diferentes opções de projeto para o conversor de impulso e rastreamento do ponto de máxima potência. Foram realizados experimentos para testar um circuito de prova de conceito. Os resultados mostraram que, para um gradiente de temperatura de 105°C, a potência máxima gerada foi de 64,59mW. Foi concluído que a utilização de TEG para a recuperação de energia térmica desperdiçada é uma opção viável e sustentável, com potencial de reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

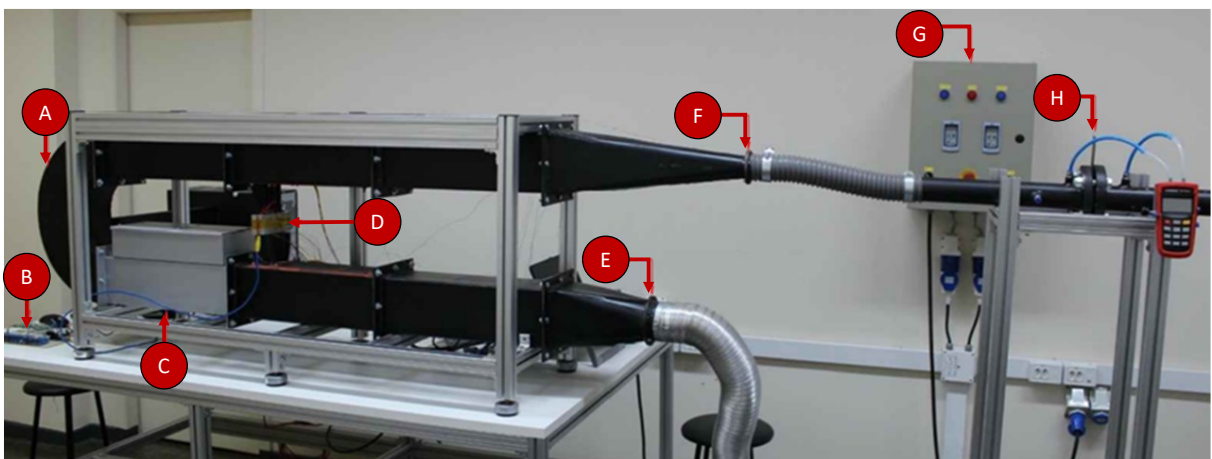
Neste capítulo são apresentados os materiais, o aparato experimental que é composto por um túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto, sistema de geradores termoelétricos assistido por termossifões aletados, sistema de aquecimento e a metodologia utilizados nos testes experimentais para simular o escoamento de ar aquecido provenientes de processos industriais.

Esta pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem qualitativa-quantitativa e de caráter exploratório, que utiliza procedimentos técnicos do tipo experimental.

#### 3.1 Aparato experimental

O aparato experimental utilizado nos testes dessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, consiste em um túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto, um sistema de aquisição de dados *Agilent*<sup>®</sup> 34970A com três módulos multiplexadores *Agilent*<sup>®</sup> 34901A de 20 canais cada, um *notebook Dell*<sup>®</sup>, um sistema para aquecimento de ar *Resist*<sup>®</sup> com 18 resistências elétricas de 200W cada (potência total de 3600W), um sistema de controle de temperatura *Novus*<sup>®</sup>, um soprador/compressor centrífugo industrial *AeroMack*<sup>®</sup> CRE-04 (catálogo comercial no Anexo A), um sistema composto por geradores termoelétricos (TEGs) assistidos por termossifões aletados, um painel elétrico com inversores de frequência *WEG*<sup>®</sup> CFW300 para controle da velocidade do soprador industrial e um sistema de medição de vazão mássica do ar. A Fotografia 1 ilustra o aparato experimental.

Fotografia 1 – Aparato experimental



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Fotografia 1, é indicado pela Letra A o duto de escoamento interno, que é mais bem detalhado na Seção 3.2, por B o sistema de aquisição de dados da curva dos geradores termoelétricos, que é mostrado na Seção 3.6, a Letra C indica o banco de resistências elétricas que promove o aquecimento do ar, a Letra D indica o sistema de geradores termoelétricos assistido por termossifões aletados, nas Seções 3.3, 3.4 e 3.5 tem-se o processo de fabricação e montagem desses sistemas. As Letras E e F indicam a saída e a entrada do ar, respectivamente. A Letra G indica o sistema de controle de vazão mássica e a Letra H indica o sistema de medição da vazão mássica (placa de orifício e instrumento de medição de pressão), maiores detalhes são ilustrados na Seção 3.7.

Na Fotografia 2 é mostrada uma visão lateral do experimento, ilustrando o sistema de aquisição de dados de temperatura e o computador utilizado para o sistema de aquisição da curva característica dos geradores termoelétricos.

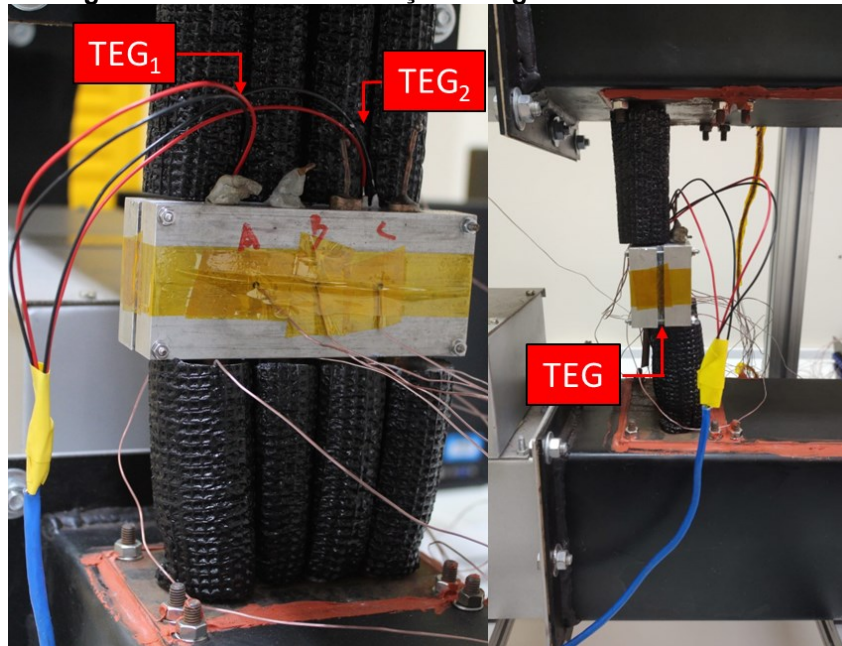
**Fotografia 2 – Visão lateral do aparato experimental**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Na Fotografia 3 é fornecido a localização do Gerador Termoelétrico 1 e Gerador Termoelétrico 2, indicados por TEG<sub>1</sub> e TEG<sub>2</sub>, respectivamente. Como pode ser observado, os geradores termoelétricos são posicionados entre os blocos de alumínio, na mesma Fotografia 3, é possível notar o posicionamento dos termopares do tipo T.

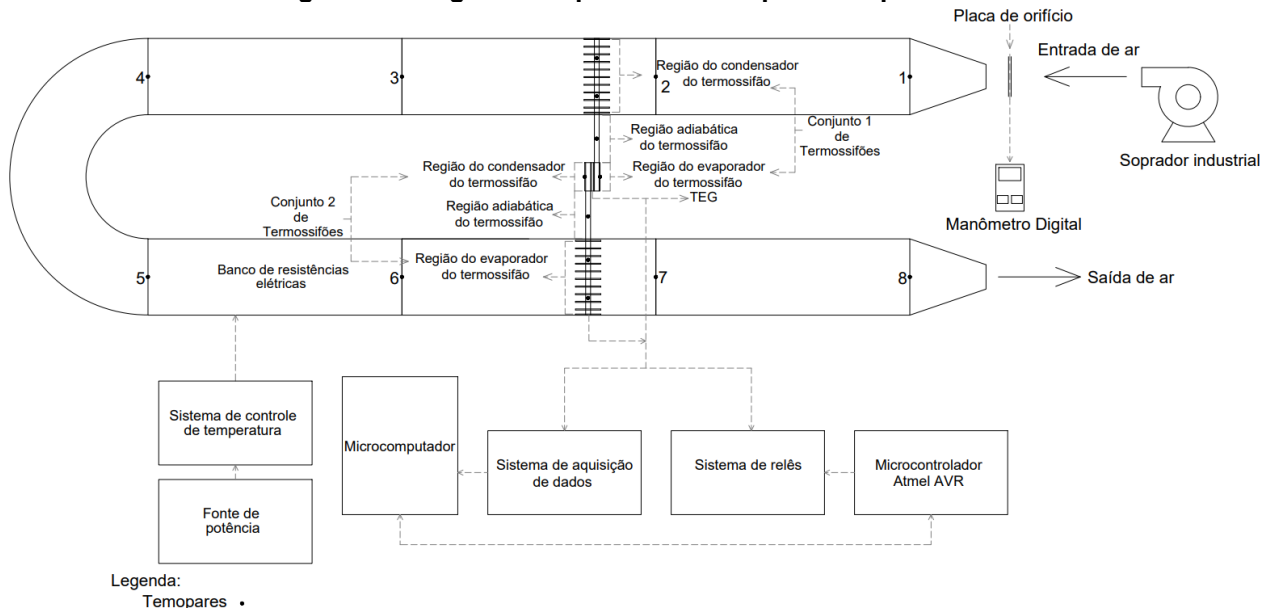
Fotografia 3 – Detalhe da locação dos geradores termoelétricos



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 8, o diagrama esquemático de todo o aparato experimental é apresentado, com o posicionamento de termopares e indicação de componentes. Pode ser notado que o escoamento de ar é forçado pelo soprador industrial, passando pela região aletada do condensador dos termossifões superiores, que é nomeado de Conjunto 1 de Termossifões, depois esse ar é aquecido no banco de resistências elétricas e, então passa pela região aletada do evaporador dos termossifões inferiores, que é nomeado de Conjunto 2 de Termossifões, e esse ar é descartado para o ambiente. As localizações dos termopares *Omega Engineering*<sup>®</sup> do tipo T são ilustradas e informadas na legenda da Figura 8. O processo de calibração dos termopares é apresentado no Apêndice A. Dessa forma, o calor é transferido para as faces dos geradores termoelétricos e uma diferença de temperatura pode ser criada e, conseqüentemente, um potencial elétrico é gerado.

**Figura 8 – Diagrama esquemático do aparato experimental**



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.2 Processo de fabricação do túnel de vento

Para realizar os testes experimentais, foi necessário a construção de um túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto ilustrado na Fotografia 1 e posteriormente na Fotografia 7. No Apêndice B podem ser encontrados alguns desenhos técnicos referentes ao projeto mecânico dos dutos que são responsáveis por canalizar o escoamento.

A construção partiu de chapas de aço SAE 1020 com espessura de 3mm, e foi realizado o processo de conformação mecânica com objetivo de ajustar a geometria proposta no projeto. Todo o trabalho de conformação foi realizado por uma empresa terceirizada.

As soldas dos dutos foram realizadas no Laboratório de Soldagem da UTFPR/Ponta Grossa. Para tal, foi utilizado o processo de soldagem *Metal Inert Gas* (MIG) com o equipamento MIG/MAG *ESAB® Smashweld 315* e os parâmetros de máquina fornecidos na Tabela 2.

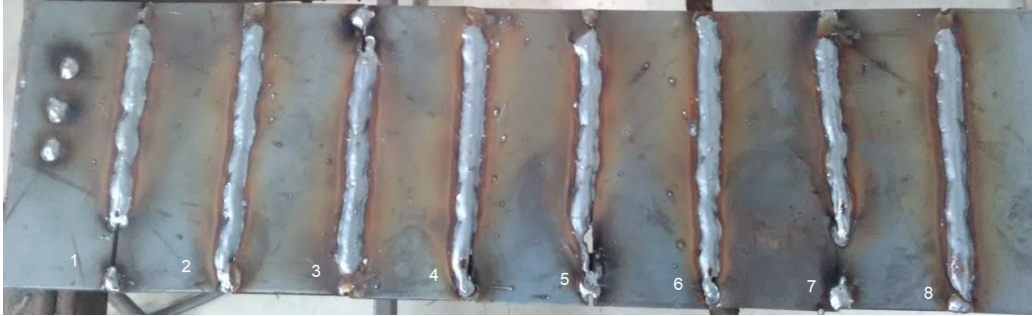
**Tabela 2 – Parâmetros de máquina**

Tensão	Ajuste fino da tensão	Seletor de indutância	Velocidade de alimentação do arame [m/min]
1	9	50	2

Fonte: Autoria própria (2023)

Para obter a melhor penetração e tamanho de cordão de solda, foi realizado testes com os parâmetros da Tabela 2 variando a velocidade de solda. A Fotografia 4 ilustra os cordões de solda realizados nos testes.

**Fotografia 4 – Cordões de solda realizados para testes de penetração**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Foi aferido o tempo para cada cordão de solda realizado e medido o comprimento do cordão. Dessa forma foi obtido parâmetros de velocidade de avanço indicados na Tabela 3.

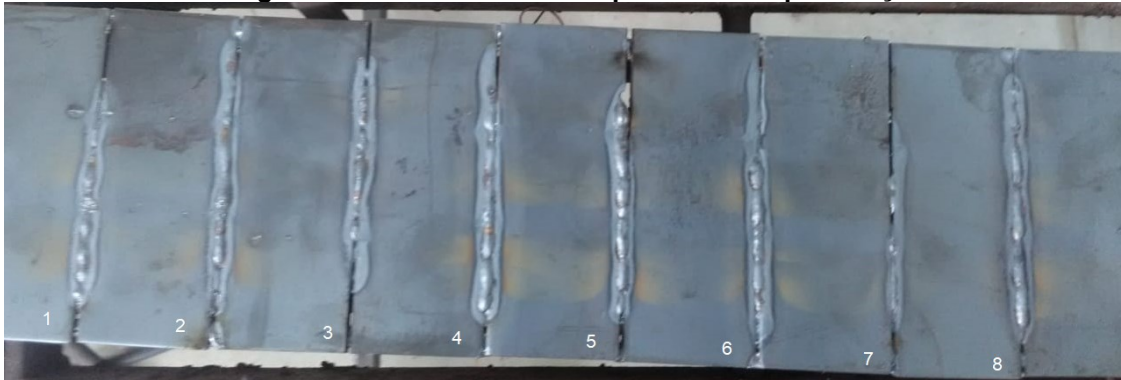
**Tabela 3 – Parâmetros de velocidade de avanço**

<b>Cordão</b>	<b>Comprimento [mm]</b>	<b>Tempo de solda [s]</b>	<b>Velocidade de solda [mm/s]</b>
1	69	11	6,27
2	80	13,63	5,86
3	71	8,65	8,2
4	68,5	12,49	5,48
5	83	12,34	6,72
6	86	12,39	6,94
7	82,5	12,5	6,6
8	85	15,49	5,48

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Os melhores resultados para penetração de solda foram os cordões 4, 6 e 8 a Fotografia 5 ilustra a parte de trás da solda.

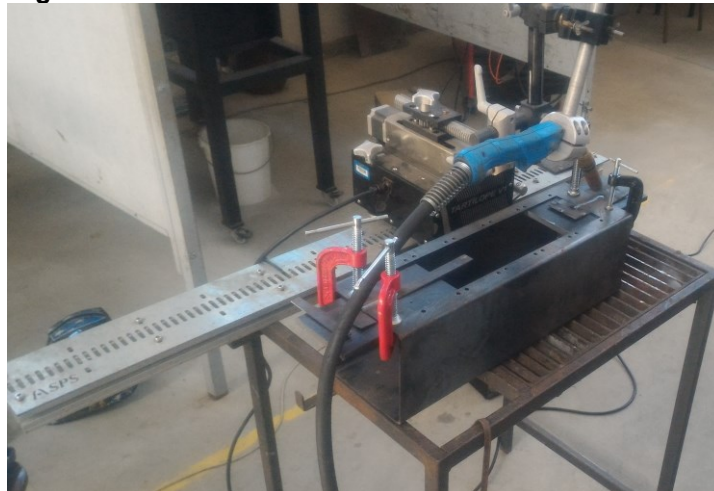
**Fotografia 5 – Cordões de solda para teste de penetração**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Dessa forma para determinar a velocidade de solda foi realizada a média entre os Testes 4, 6 e 8 da Tabela 4 e foi obtido o valor de 5,97mm/s. Para obter uma maior uniformidade no cordão de solda foi utilizado *SPS® Tartilope V1* que é um sistema de deslocamento automático de tocha. Com a utilização dessa ferramenta foi possível definir a velocidade de avanço da solda. A Fotografia 6 ilustra o sistema montado e configurado para realizar as soldas.

**Fotografia 6 – Sistema de deslocamento automático de tocha**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Após realizar todas as soldas e pintura, foi possível realizar a montagem do túnel de vento do tipo soprado de circuito aberto ilustrado na Fotografia 7. Foi montado o sistema em uma estrutura de barras de alumínio juntamente com o sistema de aquecimento de ar.

**Fotografia 7 – Túnel de vento montado**



**Fonte: Aatoria própria (2023)**

### **3.3 Construção dos termossifões**

Para a realização da montagem dos termossifões foi utilizada a metodologia apresentada em Antonini Alves *et al.* (2018). O procedimento de construção dos termossifões observou a seguinte ordem: limpeza dos tubos de cobre, dos tubos capilares e tampas, encaixe das partes, brasagem, teste de estanqueidade, evacuação do ar contido internamente no invólucro, preenchimento com o fluido de trabalho e fechamento do tubo capilar.

#### **3.3.1 Características dos termossifões**

Para a realização desse estudo experimental, foi necessária a construção de 8 termossifões, sendo eles em duas configurações diferentes: Tipo #1 e Tipo #2, sendo 4 de cada tipo. Os tubos de cobre ASTM B-75 com dimensões fornecidas na Tabela 4. Para realizar o fechamento desses tubos, foram usinadas, a partir de uma barra maciça de cobre ASTM B-75 com diâmetro de 12,7mm, tampas de cobre com e sem furo passante. Para que se possa realizar a evacuação do ar do invólucro e o preenchimento com o fluido de trabalho foram cortados capilares de 1mm de diâmetro e com comprimento de 40mm. A Fotografia 8 ilustra esses componentes.

**Fotografia 8 – Componentes de um termossifão**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

As principais características físicas e construtivas dos termossifões que foram confeccionados para a execução dos testes experimentais durante o desenvolvimento dessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Características físicas dos termossifões**

<b>Características</b>	<b>Tipo #1</b>	<b>Tipo #2</b>
Diâmetro interno ["]	7/16	7/16
Diâmetro externo ["]	1/2	1/2
Comprimento do evaporador [mm]	150	56
Comprimento da seção adiabática [mm]	94	94
Comprimento do condensador [mm]	56	150
Fluido de trabalho	Água destilada	
Quantidade de fluido de trabalho [mL]	6,52	14,55
Razão de preenchimento [%]	120	50

**Fonte: Autoria própria (2023)**

### 3.3.2 Limpeza

Para que seja garantida a molhabilidade do fluido de trabalho e um vácuo com ótima qualidade é necessário realizar a limpeza do invólucro, tampas e capilar. O primeiro passo foi realizar uma limpeza utilizando acetona visando retirar sujeitas mais grosseiras. Em seguida, os componentes foram banhados em uma solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  de 0,1M) por um tempo máximo de 1 minuto e depois foram enxaguados com água destilada e levados a um banho ultrassônico *Kondentech*<sup>®</sup>, permanecendo mergulhados em água destilada, durante 15 minutos, para a retirada de alguma sujidade que possa ainda estar presente. A Fotografia 9 ilustra o



procedimento no banho ultrassônico. Após esses procedimentos, os componentes foram considerados prontos para serem utilizados na montagem dos termossifões.

**Fotografia 9 – Banho ultrassônico contendo os componentes imersos**



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.3.3 Brasagem dos termossifões

Depois da correta limpeza dos componentes dos termossifões foi realizada a união das partes. Para tal, foi realizado o processo de brasagem com as tampas de fechamento unindo-as com as extremidades do tubo de cobre e, depois, realizado o processo de brasagem no capilar nas extremidades da tampa adequada. A Fotografia 10 ilustra o processo de brasagem.

**Fotografia 10 – Processo de brasagem do tubo**



Fonte: Autoria própria (2023)

Esse processo de brasagem foi realizado com auxílio de um maçarico portátil automático *Vonder*<sup>®</sup> e como metal de adição, foi utilizado varetas de *foscoper*

com 12% de prata, 48% de cobre e 40% de zinco. A Fotografia 11 mostra os termossifões brasados.

**Fotografia 11 – Termossifões brasados**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

#### 3.3.4 Verificação da estanqueidade

Após o processo de brasagem, foi realizado um teste de estanqueidade para verificar se não houve nenhuma falha durante esse procedimento. Para isso, foi utilizado uma bomba de deslocamento positivo manual, um recipiente com água e uma conexão para encaixar a bomba no capilar do invólucro do termossifão. A Fotografia 12 ilustra o procedimento. O tubo foi inserido dentro do recipiente com água e realizado o bombeamento do ar contido dentro da bomba. Feito isso, foi observada se havia a ocorrência de algum tipo de formação de bolhas. Quando isso ocorre, o processo de brasagem deve ser efetuado novamente, pois apresentou alguma falha. Em nosso procedimento não foi encontrado nenhum tipo de bolha e foi concluído que não houve falhas nos pontos brasados.

**Fotografia 12 – Verificação da estanqueidade**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

### 3.3.5 Evacuação de ar contido dentro do tubo de cobre

Após realizado o teste de estanqueidade, o processo de evacuação do ar contido dentro dos termossifões pode ser realizado. Para tal, uma bomba de vácuo *EOS Value® i260SV* foi utilizada. Uma mangueira polimérica foi conectada ao capilar do tubo de cobre, interligando-o à bomba de vácuo através de uma válvula agulha e uma mangueira flexível de borracha, resistente a pressões negativas. Para garantir a vedação entre a mangueira polimérica e o capilar foi utilizada graxa de alto vácuo *Dow Corning® 304*. A Fotografia 13 ilustra o processo de evacuação. Feito isso, o processo de vácuo pode ser iniciado. É recomendado que esse processo tenha duração suficiente para chegar no vácuo máximo proposto pelo equipamento. Um processo realizado de maneira correta proporcionará pressão interna de aproximadamente 9mbar, que é a limitação do equipamento utilizado.

**Fotografia 13 – Geração de vácuo no interior do tubo de cobre**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

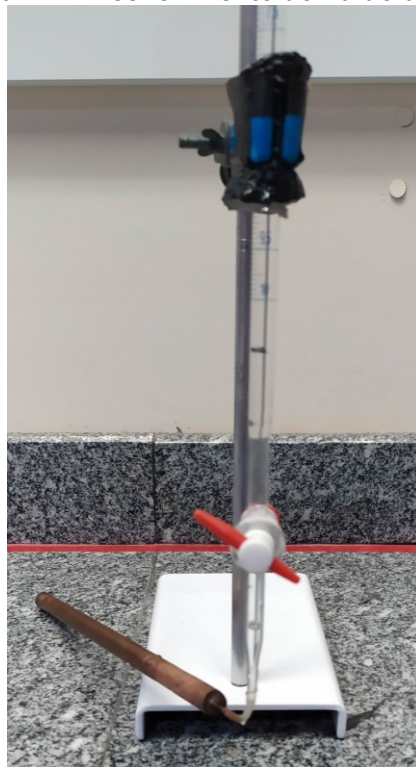
### 3.3.6 Preenchimento do tubo de cobre com o fluido de trabalho

Para finalizar a construção do termossifão, foi necessário o preenchimento do mesmo com o fluido de trabalho. A quantidade de fluido de trabalho inserida no interior do invólucro do termossifão (tubo de cobre) é de suma importância para o correto funcionamento do sistema. Caso não exista quantidade suficiente de fluido de trabalho, o termossifão entra em colapso e, conseqüentemente, a transferência de calor por mudança de fase é interrompida.

Para o preenchimento do termossifão com o fluido de trabalho foi utilizado um suporte universal, uma bureta graduada (escala de 0,1mL) com capacidade de 25mL e um *fôrceps*. A

Fotografia 14 ilustra a montagem dessa etapa. O termossifão evacuado foi acoplado em uma mangueira polimérica que faz conexão com uma bureta, a qual estava totalmente preenchida com água destilada. Um *fórceps* foi utilizado para pinçar a mangueira e evitar que o ar entrasse no termossifão. Em seguida, a válvula da bureta foi cuidadosamente aberta para que não formasse nenhuma bolha de ar na tubulação entre a bureta e o termossifão. Feito isso, o *fórceps* foi aberto para que a pressão negativa drenasse o fluido de trabalho até que o termossifão fosse carregado com a razão de preenchimento desejada.

**Fotografia 14 – Preenchimento do fluido de trabalho**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Na Tabela 4 foram apresentadas as razões de preenchimento em relação ao volume do evaporador com suas respectivas quantidades de fluido de trabalho para cada tipo de termossifão. Ressalta-se que no momento do preenchimento, foi necessário cuidado adicional para que não se perdesse o vácuo existente dentro do termossifão. Caso isso acontecesse, todo o processo de vácuo deveria ser refeito.

Realizado o preenchimento do termossifão com o fluido de trabalho, seu capilar foi conformado e sua extremidade brasada para garantir uma vedação completa. A Fotografia 15 ilustra o procedimento de brasagem do capilar do termossifão.

**Fotografia 15 – Brasagem do capilar**



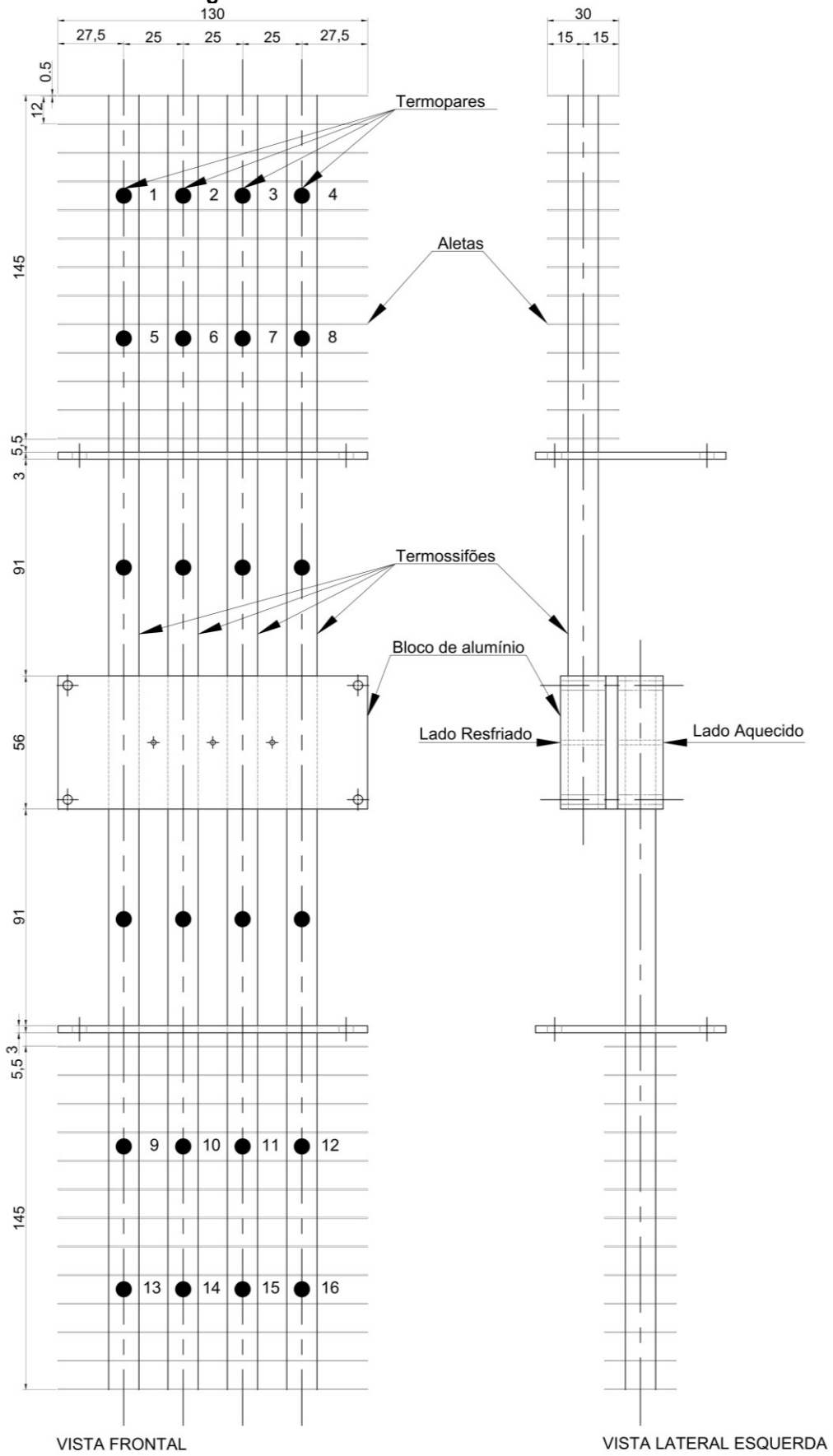
**Fonte: Autoria própria (2023)**

### **3.4 Sistema de acoplamento para geradores termoelétricos**

Com o objetivo de promover a transferência de calor no escoamento entre a parte superior e a parte inferior do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto utilizado, fez-se necessário a construção de um sistema de termossifões aletados e um bloco de alumínio para fazer o acoplamento desse sistema com os geradores termoelétricos.

A Figura 9, ilustra as dimensões, o espaçamento, a espessura e a disposição das aletas em relação aos termossifões. Essas aletas foram confeccionadas em cobre e instaladas para otimizar e aumentar a transferência de calor entre os termossifões e o meio externo. O espaçamento entre as aletas é de 12mm e a espessura de cada aleta é de 0,5mm e dimensões de 130mm por 30mm totalizando 13 aletas com somatória de área de aproximadamente 507cm<sup>2</sup>.

**Figura 9 – Sistema de aletas e termossifões**



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 9 ainda é mostrado o posicionamento dos termopares ao longo dos termossifões, há uma indicação numérica para cada um dos termopares indo de 1 até 16. Os termopares utilizados foram confeccionados no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR/Ponta Grossa para execução desse estudo experimental e são do tipo T da marca *Omega Engineering*<sup>®</sup>.

A Figura 10, ilustra as dimensões e as furações para que os termopares do tipo T fossem inseridos no bloco de alumínio, que faz o acoplamento dos geradores termoelétricos com Conjuntos 1 e 2 de Termossifões, que são indicados por A, B e C. Pode ser observado que as furações A e C são passantes e possuem contato direto com os geradores termoelétricos, enquanto que para a furação B, o objetivo é obter a temperatura do bloco de alumínio como um todo, dessa forma o furo vai até a metade da espessura da peça.

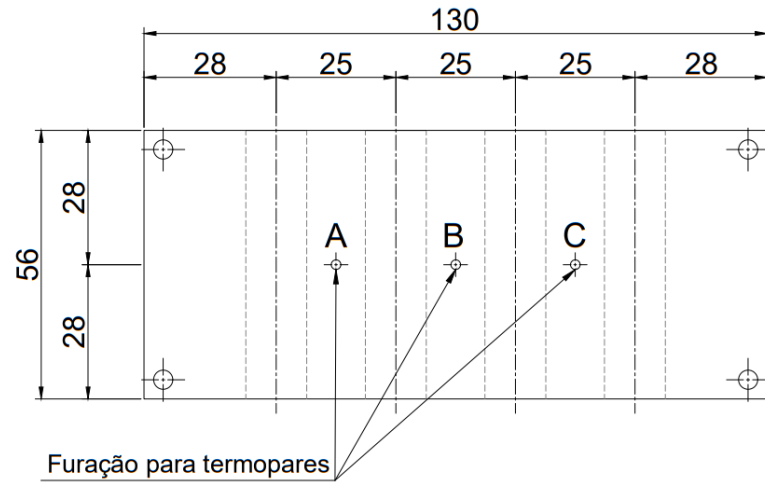
Desta forma, para o bloco de alumínio que promove um aquecimento dos geradores termoelétricos a nomenclatura adotada para os termopares são  $A_H$ ,  $B_H$  e  $C_H$ , enquanto para o lado que promove o resfriamento dos geradores termoelétricos a nomenclatura adotada para os termopares são  $A_C$ ,  $B_C$  e  $C_C$ .

Para o processo de fabricação do bloco de alumínio, mostrado na Fotografia 16, foi utilizado um perfil laminado de alumínio e foi realizada a usinagem em uma fresa do Laboratório de Usinagem (LabUSI) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

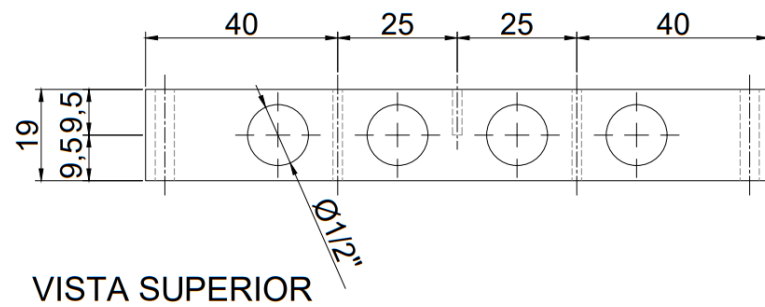
Para realizar a montagem das aletas de cobre nos termossifões, foi utilizado o processo de brasagem. Para isso, foi utilizado um maçarico portátil automático e como metal de adição, foi utilizado varetas de *foscoper* com 12% de prata, 48% de cobre e 40% de zinco. A Fotografia 17 ilustra esse procedimento.

A Figura 11 ilustra a visão explodida do sistema, nessa imagem é ilustrada esquematicamente o conjunto de termossifões aletados, os blocos de alumínio e os Geradores Termoelétricos 1 e 2.

**Figura 10 – Dimensões e posição de termopares no bloco de alumínio**



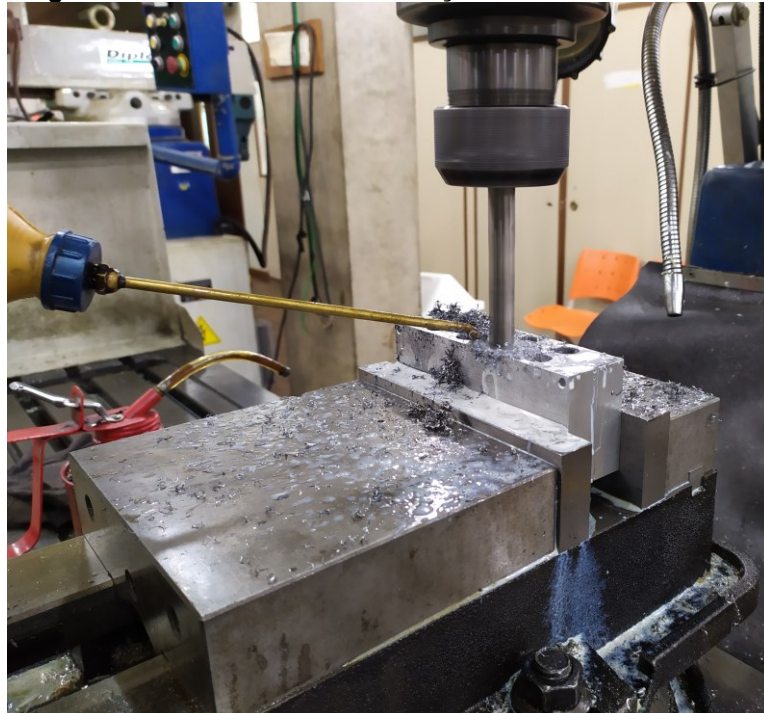
VISTA FRONTAL



VISTA SUPERIOR

Fonte: Autoria própria (2023)

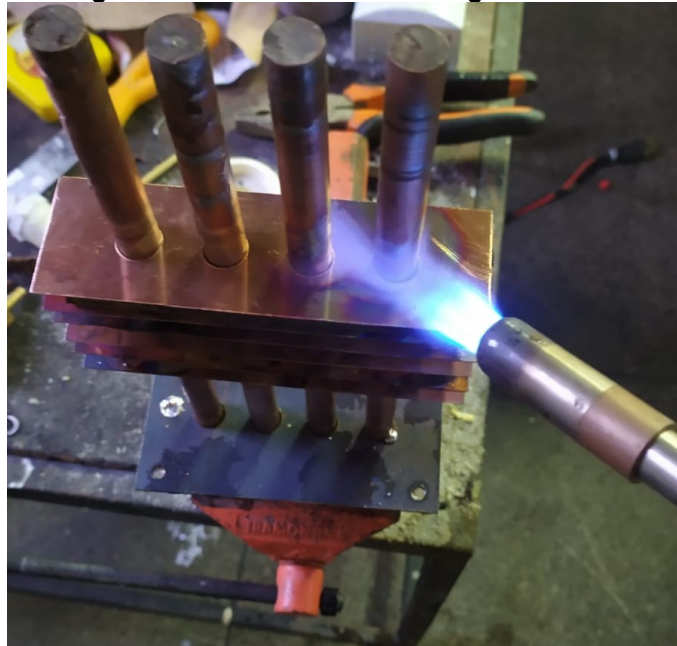
**Fotografia 16 – Processo de fabricação dos blocos de alumínio**



Fonte: Autoria própria (2023)

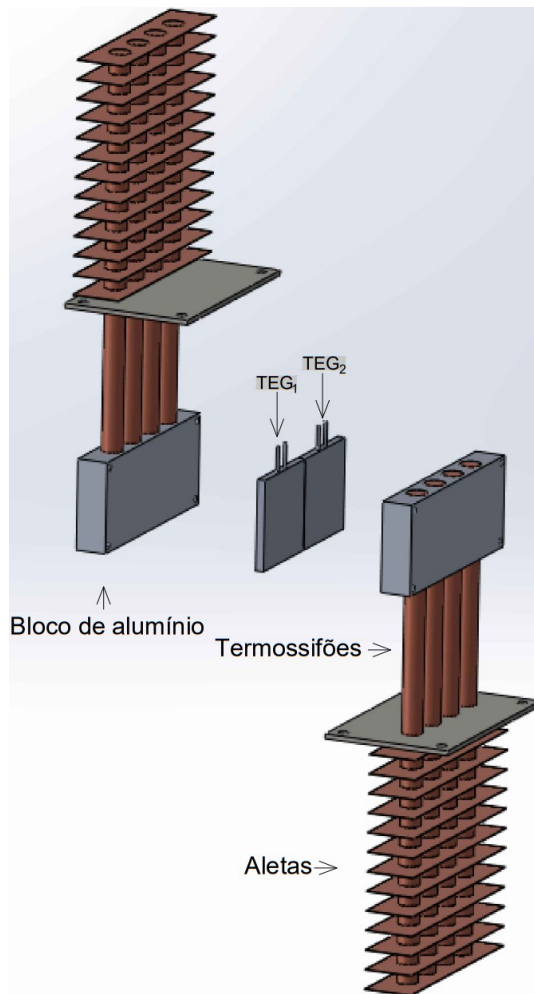


Fotografia 17 – Processo de brasagem das aletas



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 11 – Vista explodida dos componentes para realizar a recuperação do calor

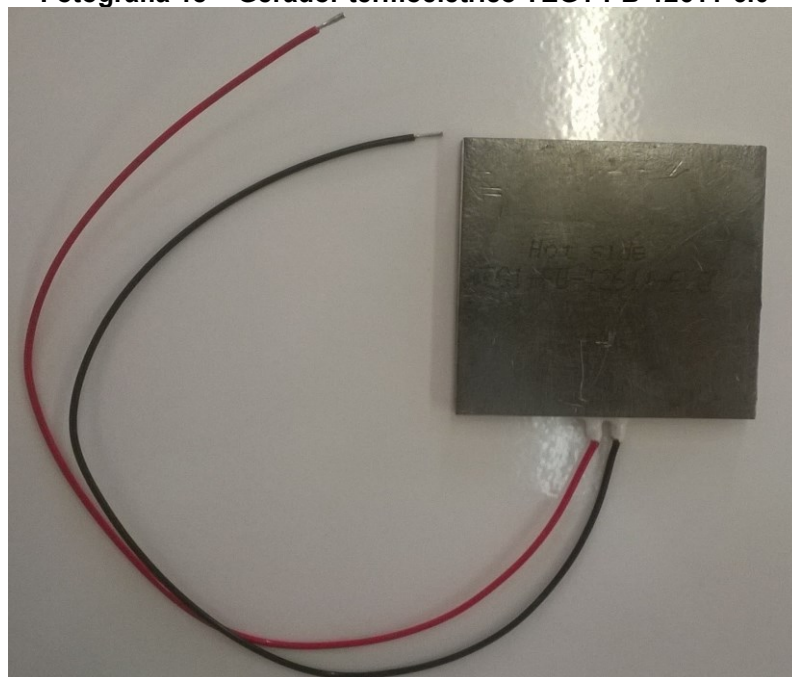


Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.5 Geradores termoelétricos

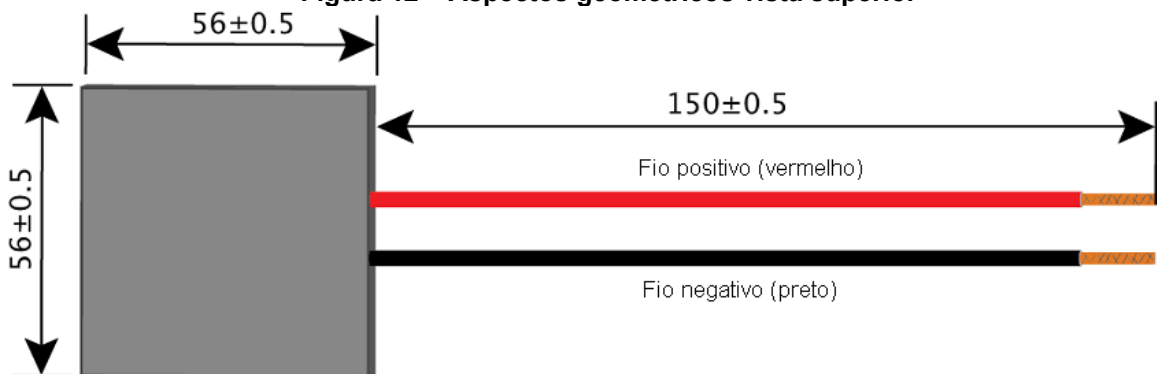
Para a análise de conversão de calor em energia elétrica de forma direta foram utilizados geradores termoelétricos TEG1-PB-12611-6.0 da empresa *TECTEG*<sup>®</sup>. Na Fotografia 18, Figura 12 e Figura 13 são apresentados os geradores termoelétricos utilizados nessa Dissertação de Mestrado, assim como suas características geométricas e de operação. As dimensões são expressas em milímetros. Para mais detalhes e ficha técnica do gerador termoelétrico consultar o Anexo B.

Fotografia 18 – Gerador termoelétrico TEG1-PB-12611-6.0



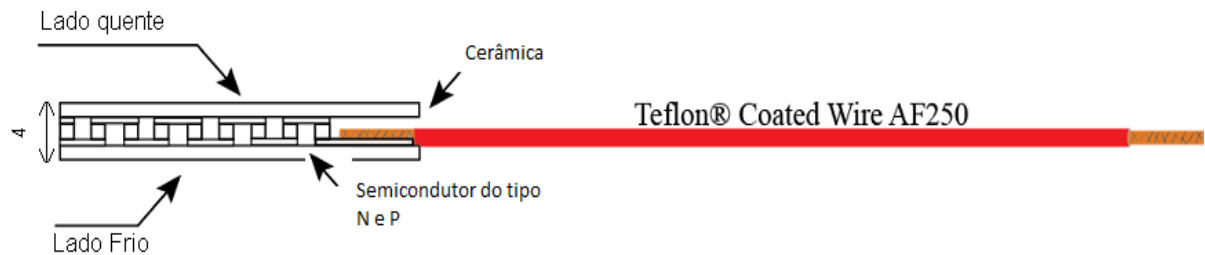
Fonte: A autoria própria (2023)

Figura 12 – Aspectos geométricos vista superior



Fonte: Adaptado de *TECTEG*<sup>®</sup> (2014)

**Figura 13 – Aspectos geométricos vista lateral**



**Fonte: Adaptado de TECTEG™ (2014)**

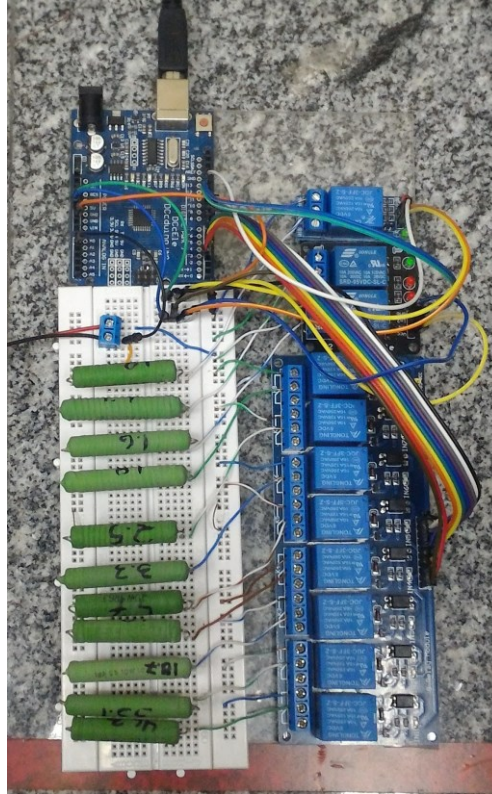
Ambos os fios são com *Teflon*® para que tivessem um isolamento térmico adequado. O módulo possui uma parte cerâmica com intuito de suportar altas temperaturas, corrosão e esforços mecânicos moderados. Essas partes cerâmicas são revestidas com grafite que, segundo o fabricante, tem um melhor acoplamento com superfícies com certa rugosidade. Como mencionado anteriormente, entre as placas de cerâmica pode ser encontrado um arranjo de pequenos blocos de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) dopado Tipo *N* e Tipo *P*, montados de maneira alternada eletricamente em série e termicamente em paralelo.

### 3.6 Sistema de aquisição de curva características de geradores termoelétricos

Para avaliar a potência produzida pelos geradores termoelétricos, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados. Esse sistema é composto por uma plataforma de prototipagem que utiliza um *Arduino*® UNO R3 para processar o código computacional.

Além disso, foi utilizado um banco de módulos de relés eletromecânicos com circuito eletrônico, projetados para operar com as portas digitais do *Arduino*® UNO R3. Esses relés utilizam bobinas eletromagnéticas para abrir ou fechar o circuito de forma controlada. Para garantir a segurança e a capacidade de dissipação de energia, foram empregados resistores com potência nominal de 10W e valores ôhmicos variados. Essa configuração permite a aquisição precisa dos dados de potência gerada pelos geradores termoelétricos durante os testes experimentais. A Fotografia 19 ilustra esse sistema de aquisição de dados desenvolvido para a execução dessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

**Fotografia 19 – Sistema de aquisição de potência gerado pelos geradores termoelétricos**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

No Apêndice C é apresentada a rotina computacional implementada. Esse sistema de aquisição de dados é capaz de obter as curvas características de geradores e para isso, realiza comutações de resistores elétricos de forma a criar pontos de potência em função de tensão. A Equação (6) define a relação de tensão ( $U$ ) e resistência elétrica ( $R$ ) para obtenção de potência gerada ( $Pot$ ).

$$Pot = \frac{U^2}{R}. \quad (6)$$

Com objetivo de obter uma gama maior de resultados, foram utilizados 11 resistores e feitas comutações, dessa forma foi possível associar em paralelo os resistores e obter 24 valores de resistência elétrica. A Tabela 5 fornece os valores de resistência elétrica obtidos. No Apêndice D é apresentado o diagrama eletrônico do sistema de aquisição de dados para obtenção das curvas características dos geradores termoelétricos.

Tabela 5 – Valores de resistência elétrica para obtenção de potência

Combinações	Resistência Elétrica [ $\Omega$ ]
R1	0,04
R2	0,08
R3	0,20
R4	0,39
R5	0,49
R6	0,5
R7	0,55
R8	0,57
R9	0,66
R10	0,75
R11	0,79
R12	0,82
R13	0,95
R14	1,30
R15	1,40
R16	1,80
R17	2,00
R18	2,47
R19	3,50
R20	5,80
R21	11,50
R22	19,70
R23	34,70
R24	48,37

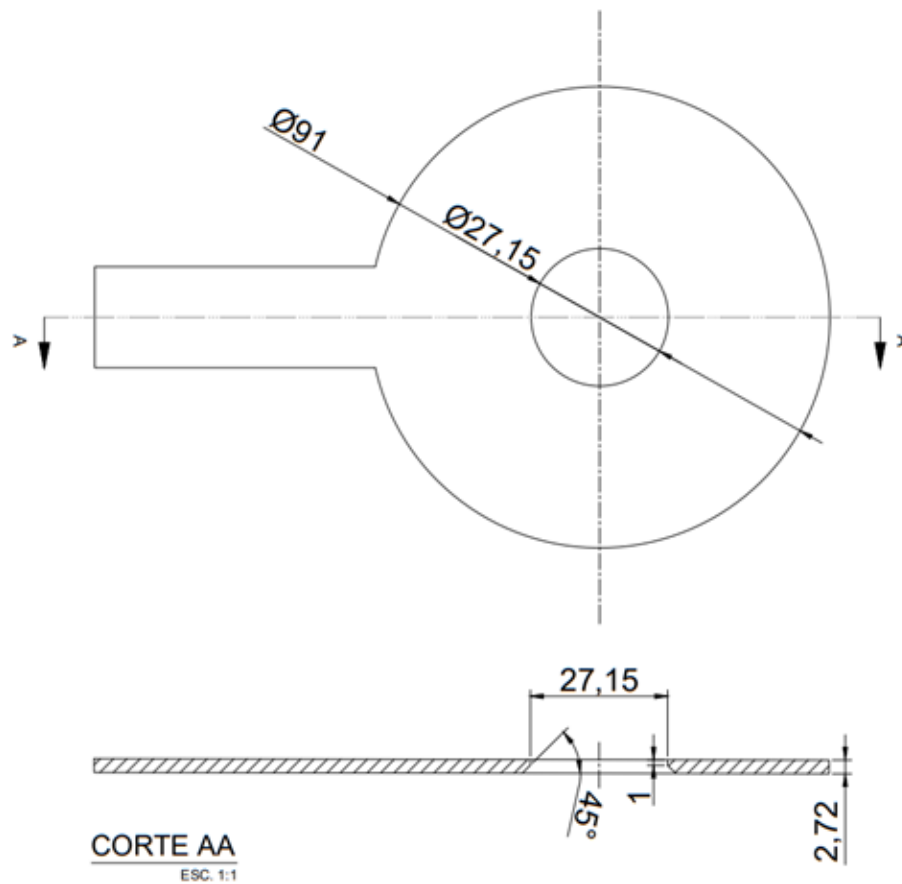
Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.7 Sistema de medição e controle da vazão ar

O sistema de medição da vazão mássica dentro do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto é composto por uma tubulação de aço carbono com tomadas de pressão a montante e a jusante de uma placa de orifício construída a partir da Norma NBR-ISO 5167-1 (ABNT, 1994), com diâmetro de orifício de 27,15mm. Os detalhes construtivos da placa de orifício estão na Figura 14.

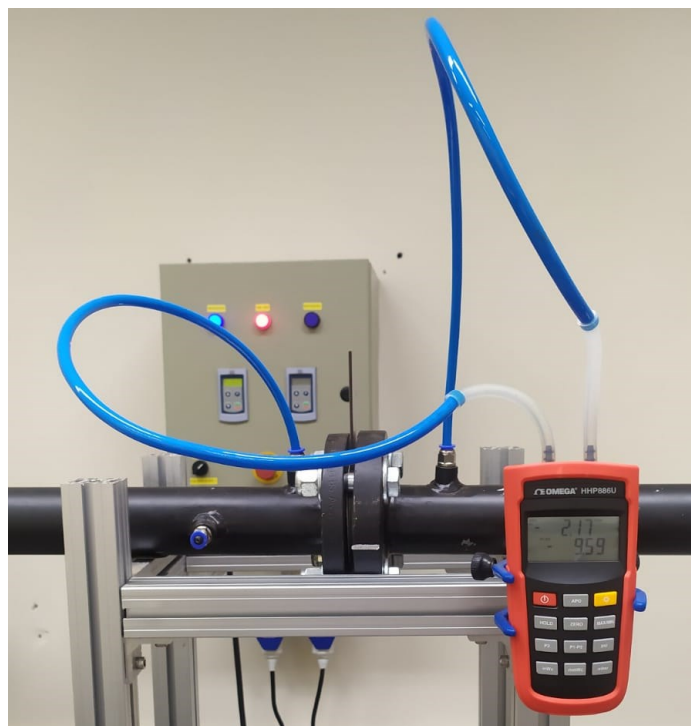
A Fotografia 20 demonstra o sistema montando e em operação. Duas mangueiras pneumáticas são conectadas uma a jusante e a outra a montante, visando a obtenção da queda de pressão nesses pontos, através de um manômetro diferencial digital *Omega Engineering*<sup>®</sup> HHP886U. Com isso, é possível obter a queda de pressão associada à placa de orifício e obter valores de vazão mássica.

Figura 14 – Detalhes construtivos da placa de orifício



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 20 – Sistema de medição de vazão do ar de entrada



Fonte: Autoria própria (2023)

A fim de determinar a velocidade do ar na entrada do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto, foram adotadas as diretrizes da Norma NBR-ISO 5167-1 (ABNT, 1994), conforme os cálculos detalhados no Apêndice E.

Para a obtenção das pressões manométricas a montante e a jusante da placa de orifício, foi utilizado um manômetro diferencial digital *Omega Engineering*<sup>®</sup> HHP886U, com faixa de operação de 0 a 150mbar, erro de  $\pm 1,25\%$  e precisão de 0,1%. Esse equipamento foi fundamental para a medição precisa das pressões necessárias no sistema de medição de vazão mássica.

Para o controle da vazão de ar na entrada do sistema, foi desenvolvido um painel elétrico com a utilização de um inversor de frequência *WEG*<sup>®</sup> CFW300. Esse inversor de frequência permite modular a onda elétrica e ajustar a velocidade do acionamento, resultando na capacidade de controlar a vazão mássica do ar no sistema de forma eficiente e precisa.

Na Fotografia 21, é possível visualizar a parte externa e interna do painel elétrico construído. Esse sistema é composto por dispositivos essenciais, como relés de proteção mecânica, disjuntores, inversores de frequência, interface homem-máquina e botão de emergência. Esses componentes estão em conformidade com as diretrizes estabelecidas por normas regulamentadoras que visam garantir a segurança nas instalações elétricas.

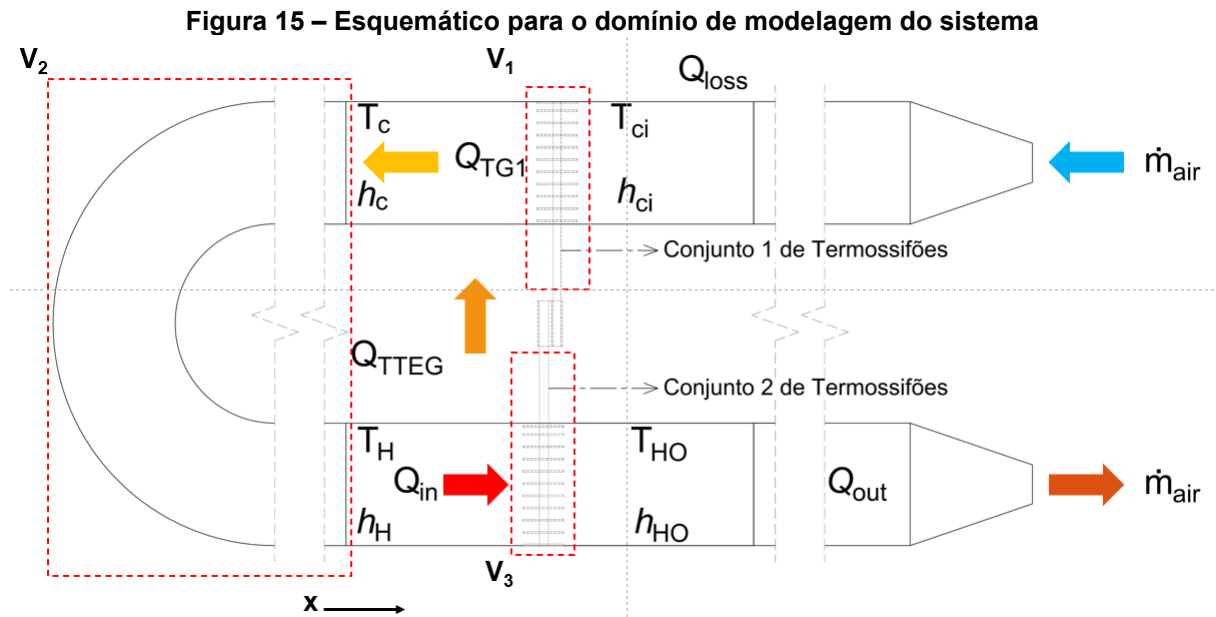
**Fotografia 21 – Sistema de controle de rotação do ventilador centrífugo**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

### 3.8 Análise da troca de calor no sistema

Neste item é abordada a modelagem teórica do balanço de energia no túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto. A Figura 15 ilustra o esquemático referente ao domínio de modelagem do sistema em estudo, os volumes de controle são representados por  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ .



Ar frio entra na parte superior do duto do túnel de vento no sentido negativo da direção  $x$  e sai aquecido na parte inferior do duto do túnel de vento no sentido positivo da direção  $x$ . A energia na forma de calor dissipada pelas resistências elétricas através do Efeito *Joule* é simbolizada por  $Q_{in}$ , dada em [W], e expressa por:

$$Q_{in} = \dot{m}_{ar} (h_H - h_C), \quad (7)$$

sendo que,  $\dot{m}_{ar}$  é a vazão mássica do escoamento de ar dentro do túnel de vento,  $h_C$  e  $h_H$  são as entalpias do escoamento de ar após a passagem pelo Conjunto de Termossifões 1 e após a passagem das resistências elétricas para aquecimento do ar, respectivamente. O volume de controle para essa análise é representado por  $V_2$ .

A energia transferida do escoamento de ar para o Conjunto de Termossifões 2, representada por  $Q_{TTEG}$ , dada em [W], pode ser expressa por:

$$Q_{TTEG} = \dot{m}_{ar} (h_H - h_{HO}), \quad (8)$$



sendo que,  $h_{HO}$  é a entalpia do escoamento de ar após passagem pelos evaporadores dos termossifões aletados do Conjunto de Termossifões 2. O volume de controle para essa análise é representado por  $V_3$ .

A transferência de calor do Conjunto de Termossifões 1 para o escoamento de ar na entrada do túnel de vento, representada por  $Q_{TG1}$ , dada em [W], pode ser expressa por:

$$Q_{TG1} = \dot{m}_{ar} (h_C - h_{Cl}), \quad (9)$$

sendo que,  $h_{Cl}$  é a entalpia do escoamento de ar na entrada do túnel de vento. O volume de controle para essa análise é representado por  $V_1$ . Ainda temos que  $Q_{in}$ , e expressa por:

$$Q_{in} = Q_{TG1} + Q_{out} + Q_{TTEG} + Q_{loss}, \quad (10)$$

$Q_{out}$  é a energia eliminada para a atmosfera e  $Q_{loss}$  é a energia dissipada devido a perdas de calor para o meio externo ao túnel de vento, ocasionadas pela ineficiência ou ausência de isolamento térmico no sistema, resistências térmicas do conjunto de aletas, termossifões, bloco de alumínio e geradores termoelétricos.

Com o propósito de avaliar as perdas de calor, as resistências térmicas e medir a eficiência na transferência de calor para o escoamento de ar na entrada do túnel de vento resultante da transferência de calor entre os Conjuntos de Termossifões 1 e 2, a Equação (10) é apresentada:

$$\varepsilon = \frac{Q_{TG1}}{Q_{TTEG}} = \frac{h_C - h_{Cl}}{h_H - h_{HO}}. \quad (10)$$

### 3.9 Procedimento experimental

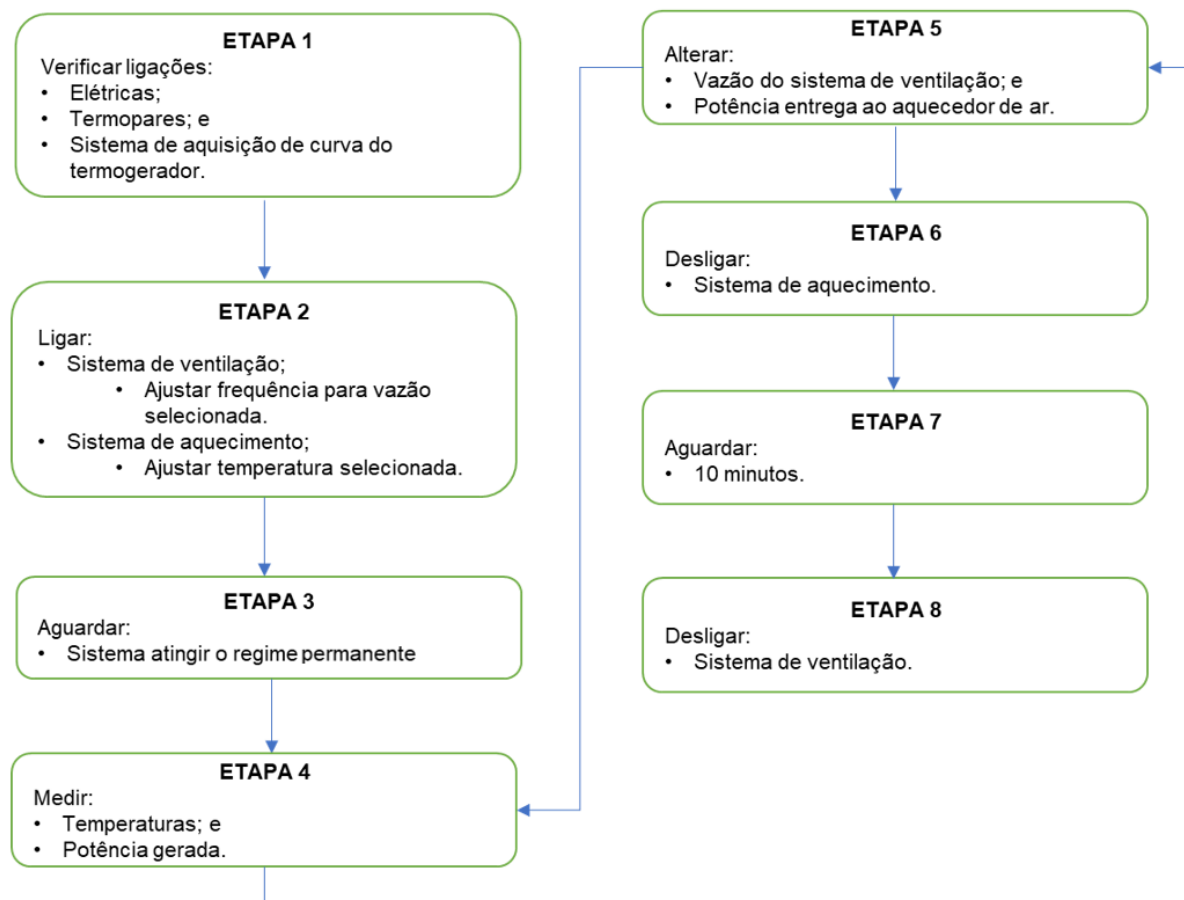
Para a execução dos testes experimentais, a temperatura ambiente do Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa, foi mantida por um sistema de ar-condicionado *Carrier*® em  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ . Os testes experimentais foram realizados acrescentando a temperatura do ar em  $30^\circ\text{C}$ , variando de  $90^\circ\text{C}$  até  $180^\circ\text{C}$ . Cada temperatura foi mantida por 30 minutos ou onde a condição de funcionamento de regime permanente fosse atingida. Além disso, 3 velocidades de escoamento foram estudadas: 0,6m/s, 1,1m/s e 1,7m/s, correspondendo a números de *Reynolds* de

4.279, 8.238 e 13.468, respectivamente. Portanto, as duas primeiras velocidades estão compreendidas na faixa de transição entre o escoamento em regime laminar e o regime turbulento, enquanto o escoamento com  $Re_{Dh} = 13.468$  possui a natureza turbulenta.

Para garantir a confiabilidade dos dados, os testes experimentais foram repetidos 3 vezes para cada temperatura e os erros foram comparados levando em conta que as diferenças entre as médias dos valores fossem menores que  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Os dados experimentais foram registrados a cada 10 segundos pelo sistema de aquisição de dados e salvos pelo *software Agilent® Benchlink Data Logger 3*. O sistema de aquisição de dados baseado em *Arduino®*, foi responsável por comutar cargas resistivas e obter valores de tensão elétrica, utilizando a Equação (6) foi obtido a potência produzida pelos geradores termoelétricos. Esse sistema somente era acionado quando a condição do sistema térmico atingia o regime *quasi* permanente. O procedimento experimental foi apresentado na Figura 16.

**Figura 16 – Etapas do procedimento experimental**



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.10 Análise de incertezas experimentais

Resultados de medições experimentais carregam consigo uma incerteza de medição, a análise dessa incerteza faz-se necessário para estimar o grau de dúvida associado ao resultado de medição (PEDOTT, 2012).

Para realizar a análise de incerteza experimental foi utilizado o Método de Incerteza descrito por Holman (2011). Tendo como princípio a combinação de incerteza de grandeza relacionada. Para realizar a propagação das incertezas foi utilizado o *software Engineering Equation Solver® (EES®)*. Kline e McClintok (1953) propuseram que a incerteza  $\Delta R$  de um resultado  $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  com medidas em  $x_1, x_2, \dots, x_n$  pode ser expressa pela Equação (11):

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \partial x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n\right)^2} \quad (11)$$

Os valores de incertezas experimentais estimados para cada variável utilizada são fornecidos pelo Quadro 2.

**Quadro 2 – Incertezas experimentais**

Parâmetro	Instrumento de medição	Unidade	Incerteza
Temperaturas (ambiente e interno ao túnel de vento)	Termopar do tipo T	°C	0,25
Diâmetro hidráulico (seção de teste)	Escala milimetrada	mm	0,5
Diâmetro hidráulico (placa de orifício)	Paquímetro	mm	0,5
Vazão mássica	EES®	kg/s	5%
Massa específica	EES®	kg/m³	5%
Pressão	Manômetro digital	mbar	1,25%

**Fonte: Autoria própria (2023)**

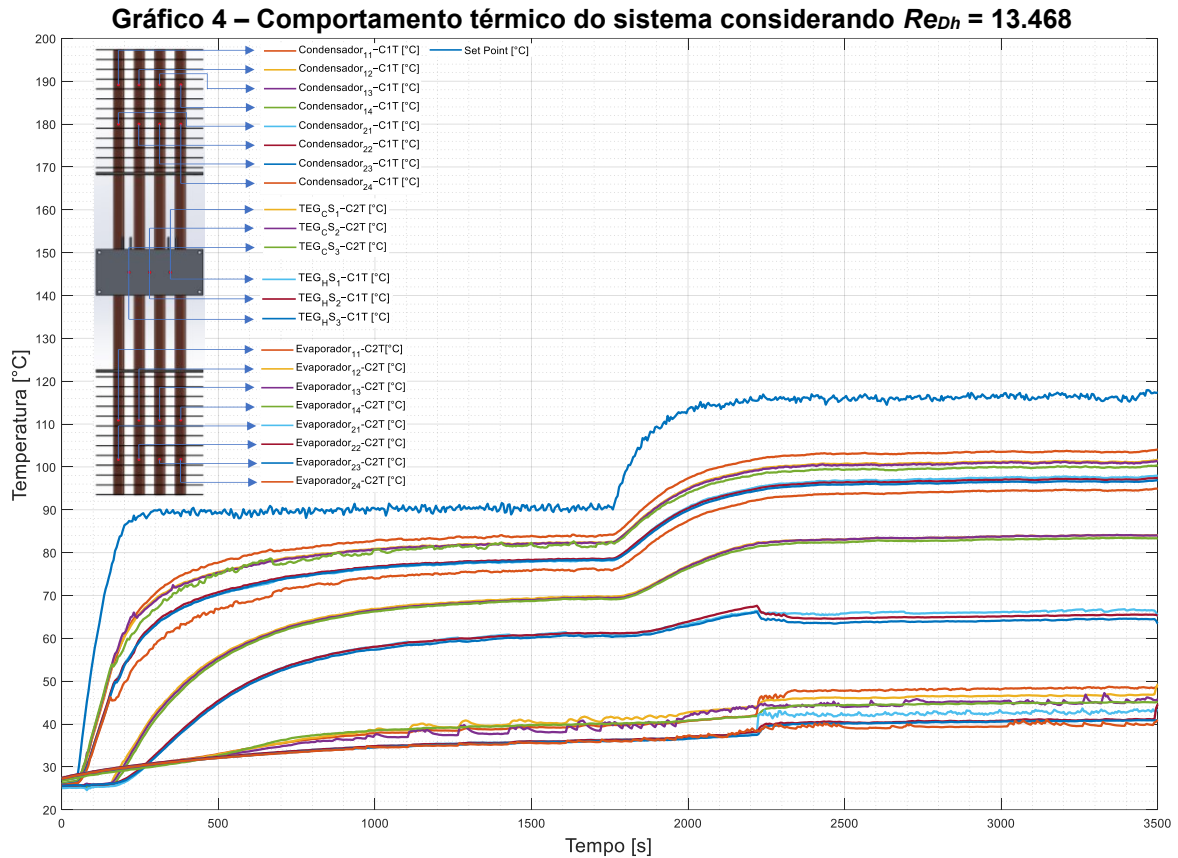
## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

No Capítulo 4 são discutidos e apresentados os resultados experimentais obtidos por meio do aparato experimental construído e instrumentado para o desenvolvimento dessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) vinculado ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) do *Campus* Ponta Grossa.

### 4.1 Comportamento do sistema de transferência de calor passivo

Para os testes experimentais com velocidade de escoamento média de 1,7m/s com número de *Reynolds* médio correspondente de 13.468, o experimento foi iniciado com temperatura de 90°C e foi possível alcançar a temperatura desejada, uma vez que para a temperatura de teste experimental de 120°C houve um equilíbrio termodinâmico na temperatura de aquecimento do escoamento de ar em 115°C. Esse comportamento ocorreu devido à alta vazão mássica que trouxe um balanço de energia com 5°C menor do que se era esperado, é possível visualizar esse comportamento no Gráfico 4.

A indicação da legenda do Gráfico 4 são: *Set Point*, representa a temperatura do ar aquecido no sistema; *Evaporador<sub>11</sub> – C2T*, *Evaporador<sub>12</sub> – C2T*, *Evaporador<sub>13</sub> – C2T*, *Evaporador<sub>14</sub> – C2T*, *Evaporador<sub>21</sub> – C2T*, *Evaporador<sub>22</sub> – C2T*, *Evaporador<sub>23</sub> – C2T* e *Evaporador<sub>24</sub> – C2T* são as temperaturas nos evaporadores representados pelos números de 9 a 16 da Figura 9, respectivamente; *TEG<sub>C</sub>S<sub>1</sub> – C2T*, *TEG<sub>C</sub>S<sub>2</sub> – C2T* e *TEG<sub>C</sub>S<sub>3</sub> – C2T* são as temperaturas da região dos condensadores, ilustrados na Figura 10, ambas do Conjunto 2 de Termossifões; enquanto que *Condensador<sub>11</sub> – C1T*, *Condensador<sub>12</sub> – C1T*, *Condensador<sub>13</sub> – C1T*, *Condensador<sub>14</sub> – C1T*, *Condensador<sub>21</sub> – C1T*, *Condensador<sub>22</sub> – C1T*, *Condensador<sub>23</sub> – C1T* e *Condensador<sub>24</sub> – C1T* são as temperaturas nos condensador representados pelos números de 1 a 8 da Figura 9, respectivamente; *TEG<sub>H</sub>S<sub>1</sub> – C1T*, *TEG<sub>H</sub>S<sub>2</sub> – C1T* e *TEG<sub>H</sub>S<sub>3</sub> – C1T* são as temperaturas da região do evaporador, ilustrados na Figura 10, ambas do Conjunto 1 de Termossifões.



Fonte: Autoria própria (2023)

Foi observado que as temperaturas da região do evaporador do Conjunto 2 de Termossifões, apresentam um gradiente máximo de 8°C. Isso ocorreu pela fluidodinâmica do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto, que favorece o escoamento de ar mais ao centro do duto de seção de testes devido ao desenvolvimento da camada limite. Porém, quando são analisadas as temperaturas individuais do evaporador de cada termossifão foi obtido um comportamento isotérmico, ou seja, para mesma região do termossifão, foi possível obter temperaturas muito semelhantes.

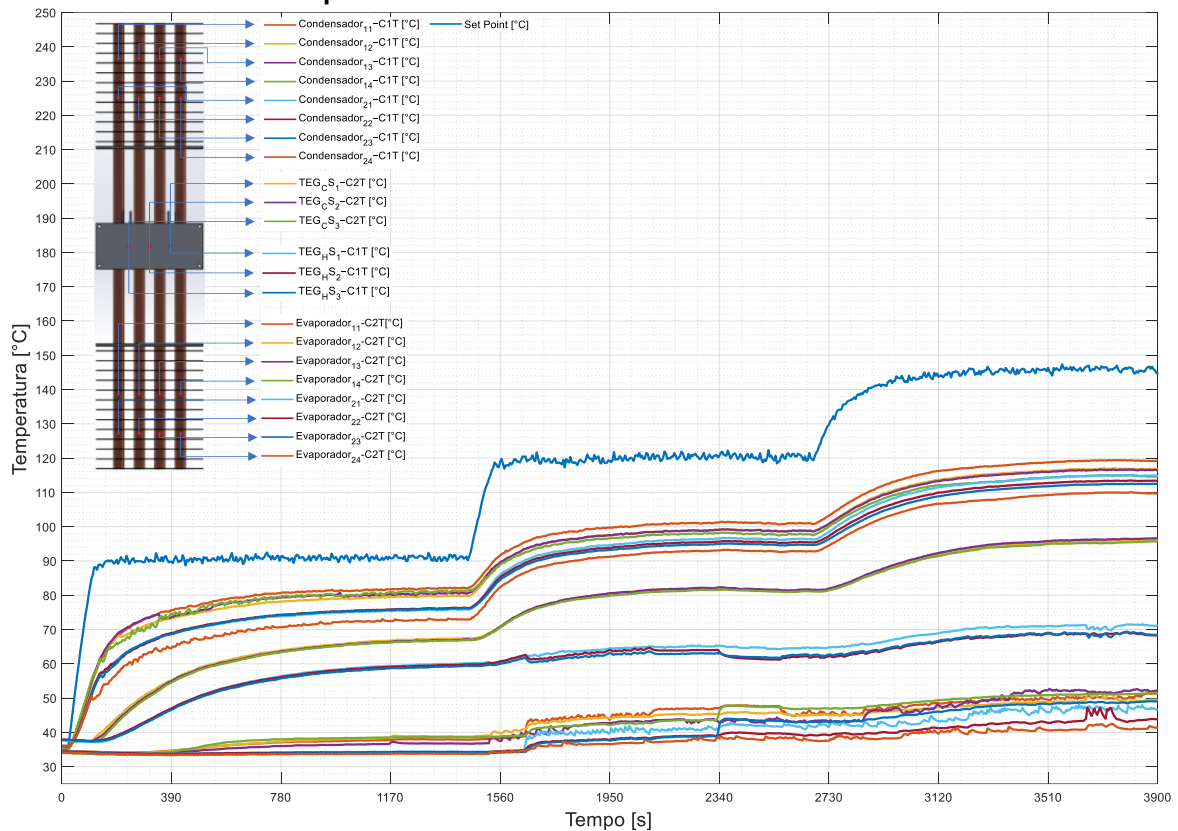
Quando a região do condensador do Conjunto 2 de Termossifões é analisada, representados pelos índices  $TEG_{C,S1}$ ,  $TEG_{C,S2}$  e  $TEG_{C,S3}$  informados na legenda do Gráfico 4, foi obtido praticamente os mesmos valores de temperatura para os três pontos medidos, dessa forma é possível considerar a temperatura isotérmica nessa região. Analisando a região do evaporador do Conjunto 1 de Termossifões, que são representados pelos índices  $TEG_{H,S1}$ ,  $TEG_{H,S2}$  e  $TEG_{H,S3}$ , foram obtidas praticamente as mesmas temperaturas, considerando os testes com aquecimento do ar em 90°C.

Quando ocorreu o aumento da temperatura do escoamento de ar para 115°C foi notado no Conjunto 1 de Termossifões um comportamento em que as temperaturas não seguiam a curva crescente até o regime permanente. Isso se deve ao processo de início do ciclo termodinâmico do regime fechado dos termossifões. Ao analisar a região do condensador desse mesmo conjunto de termossifões foi possível observar um comportamento quase que semelhante ao do seu evaporador. Porém para o Conjunto 2 de Termossifões os patamares que nos indicam a mudança de fase do fluido de trabalho, são facilmente identificados.

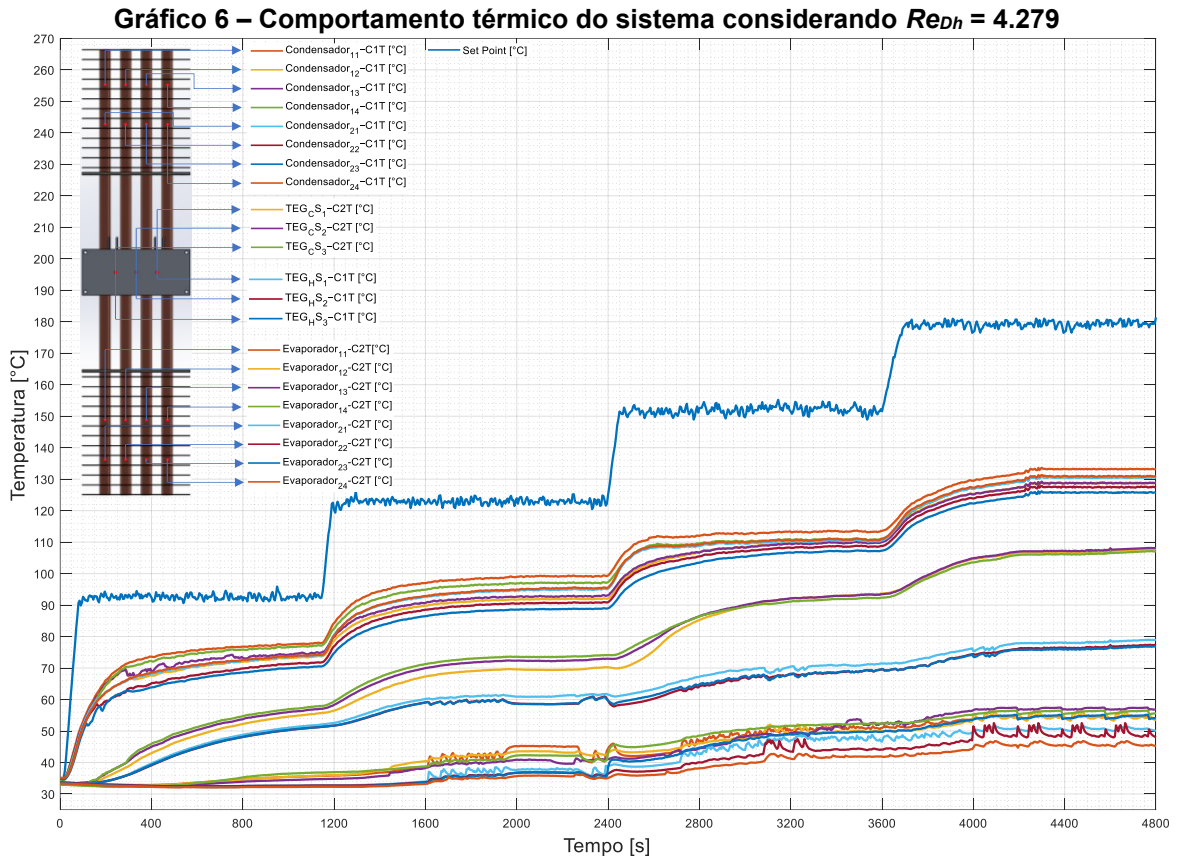
Também é possível notar, que a maior resistência térmica se dá entre as faces dos geradores termoelétricos, é possível fazer essa afirmação devido ser a maior diferença de temperatura obtida no experimento.

Realizando o teste experimental considerando uma velocidade média do escoamento em 1,1m/s com seu número de *Reynolds* médio correspondente de 8.238, foi possível realizar o aquecimento do ar de entrada em 90°C, 120°C e 145°C, da mesma forma que para a velocidade média de escoamento de 1,7m/s, não foi possível obter a temperatura experimental de 150°C devido à alta vazão mássica de ar que trouxe um equilíbrio termodinâmico 5°C menor do que se era esperado. O Gráfico 5 ilustra o comportamento do sistema na velocidade média de escoamento interno de 1,1m/s. Pode ser observado que o comportamento das temperaturas no sistema ao longo tempo é muito semelhante ao comportamento apresentado considerando uma velocidade média de escoamento de 1,7m/s ( $Re_{Dh} = 13.468$ ).

**Gráfico 5 – Comportamento térmico do sistema considerando  $Re_{Dh} = 8.238$**



Quando o experimento é submetido a velocidade de escoamento média do ar de 0,6m/s com um número de *Reynolds* médio correspondente de 4.279 foi possível proporcionar aquecimento do escoamento de ar para todos os valores desejados de temperatura: 90°C, 120°C, 150°C e 180°C. O Gráfico 6 ilustra o comportamento da distribuição de temperaturas do sistema ao longo do tempo. O comportamento desse teste experimental foi muito semelhante aos testes anteriores. Para a região do condensador do Conjunto 2 de Termossifões analisada, foi observado um comportamento isotérmico, verificando a região do evaporador a diferença de temperatura apresentada entre as regiões é semelhante aos anteriormente apresentados. No Conjunto 1 de Termossifões, ao ser examinada a área do evaporador, podem ser destacadas quatro regiões distintas para diferentes temperaturas do ar empregada. Nessas regiões, as temperaturas são muito próximas umas das outras, criando uma condição isotérmica.



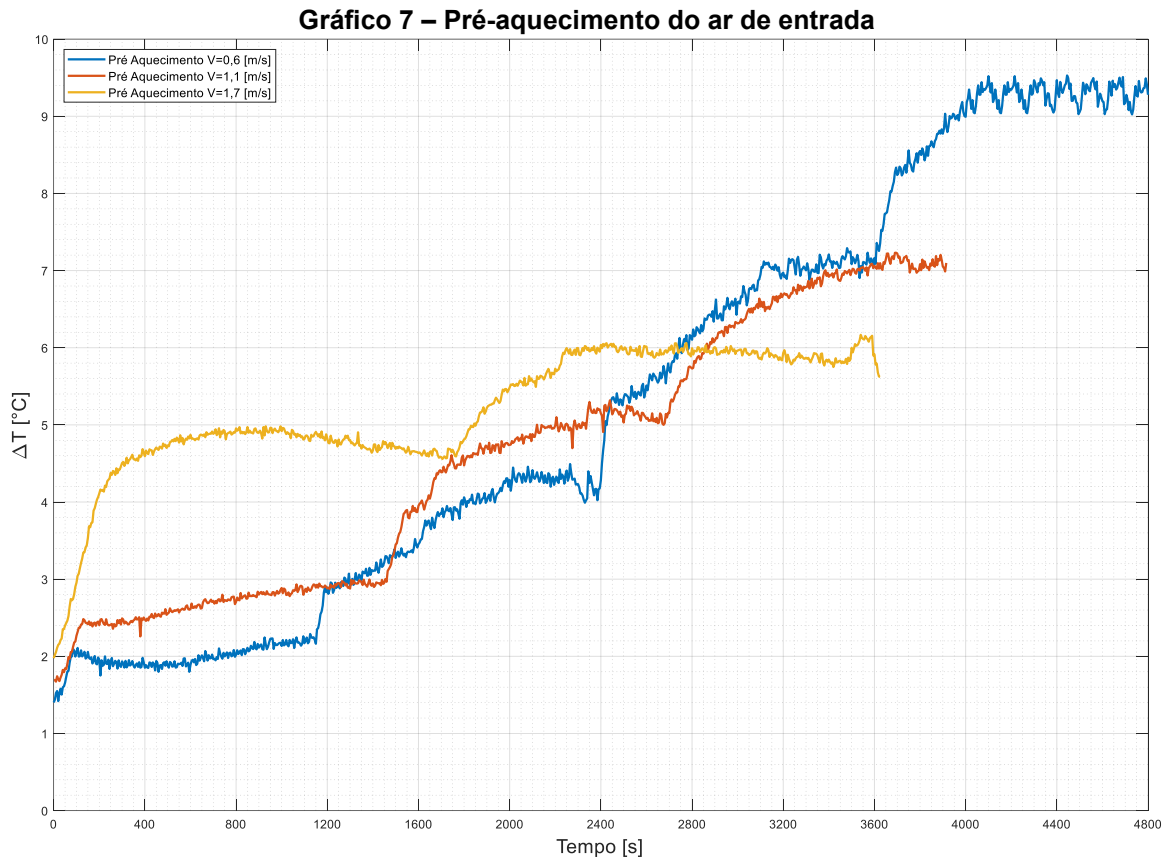
## 4.2 Pré-aquecimento do ar de entrada

Com o objetivo de avaliar o pré-aquecimento e o calor transferido para o escoamento de ar na entrada do duto do túnel de vento, foram instalados termopares a jusante e a montante do Conjunto 1 de Termossifões, representados pelos números 2 e 4 que são ilustrados na Figura 8.

De maneira idealizada, o calor dissipado por Efeito *Joule* proveniente do banco de resistências elétricas é transferido para o Conjunto 2 de Termossifões que por sua vez é transferido para os geradores termoelétricos e então é transferido para o Conjunto 1 de Termossifões, que então transfere o calor para o escoamento de ar, realizando o pré-aquecimento do ar antes de sua passagem pelo banco de resistências elétricas. Porém, ocorrem perdas desse calor gerado pelo banco de resistências elétricas, devido as resistências térmicas do sistema e o calor dissipado para o ambiente. Desta forma, faz-se necessário realizar o cálculo da eficiência da transferência desse calor. O Item 3.8 fornece as equações de transferência de calor que facilitam o entendimento desse fenômeno. O pré-aquecimento do escoamento de ar, foi avaliado para as mesmas condições de contorno do experimento,



conforme procedimento experimental ilustrado no Item 3.9. O Gráfico 7 apresenta o pré-aquecimento do escoamento de ar para as condições de velocidade média de escoamento de 0,6m/s, 1,1m/s e 1,7m/s correspondendo a  $Re_{Dh} = 13.468$ , 8.238 e 4.279, respectivamente.

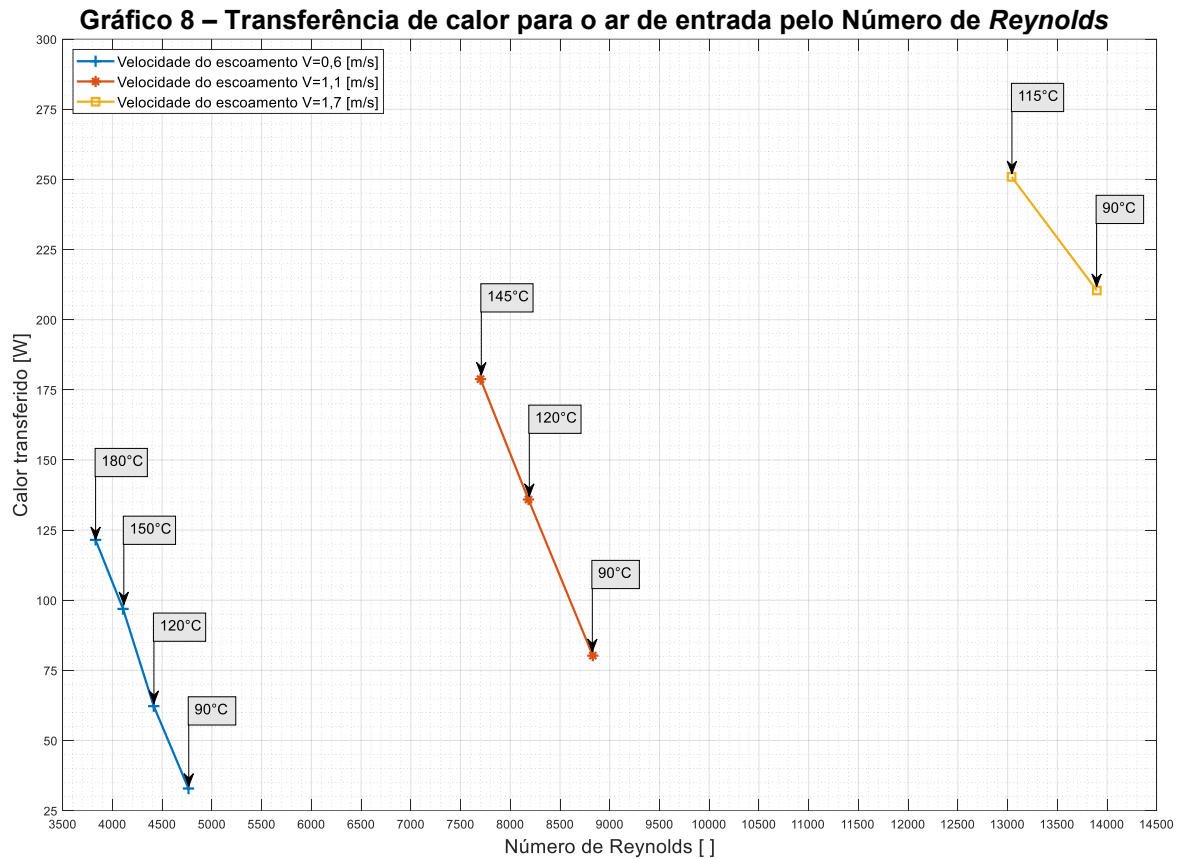


Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme mencionado anteriormente, o aparato experimental possuiu limitações operacionais e com isso, foi possível explorar as temperaturas do escoamento de ar em 90°C e 115°C para a velocidade média de 1,7m/s; 90°C, 120°C e 145°C para a velocidade média de 1,1m/s e para a velocidade média de 0,6m/s não houve limitação. Dessa forma, foi possível obter temperaturas para o aquecimento do ar de 90°C, 120°C, 150°C e 180°C. Com isso, foi possível a obtenção de um pré-aquecimento máximo de aproximadamente 9,5°C para a velocidade média de 0,6m/s com a temperatura do ar de entrada em 180°C.

Com objetivo de determinar a situação experimental na qual ocorreu o maior pré-aquecimento do escoamento de ar de entrada, foi adotada a temperatura de 90°C, pois as três condições de velocidade do ar conseguiram atingir esse valor. Dessa forma, o maior aquecimento foi na velocidade de 1,7m/s com o valor de aproximadamente 5°C de pré-aquecimento do ar de entrada, uma vez que há maior

vazão mássica e um regime com maior número de *Reynolds* faz com que haja maior troca térmica entre os Conjuntos 1 e 2 de Termossifões e o ar. Explorando os dados em função do calor transferido do Conjuntos 2 de Termossifões para o Conjuntos 1 de Termossifões e por sua vez para o ar de entrada pode ser construído o Gráfico 8.

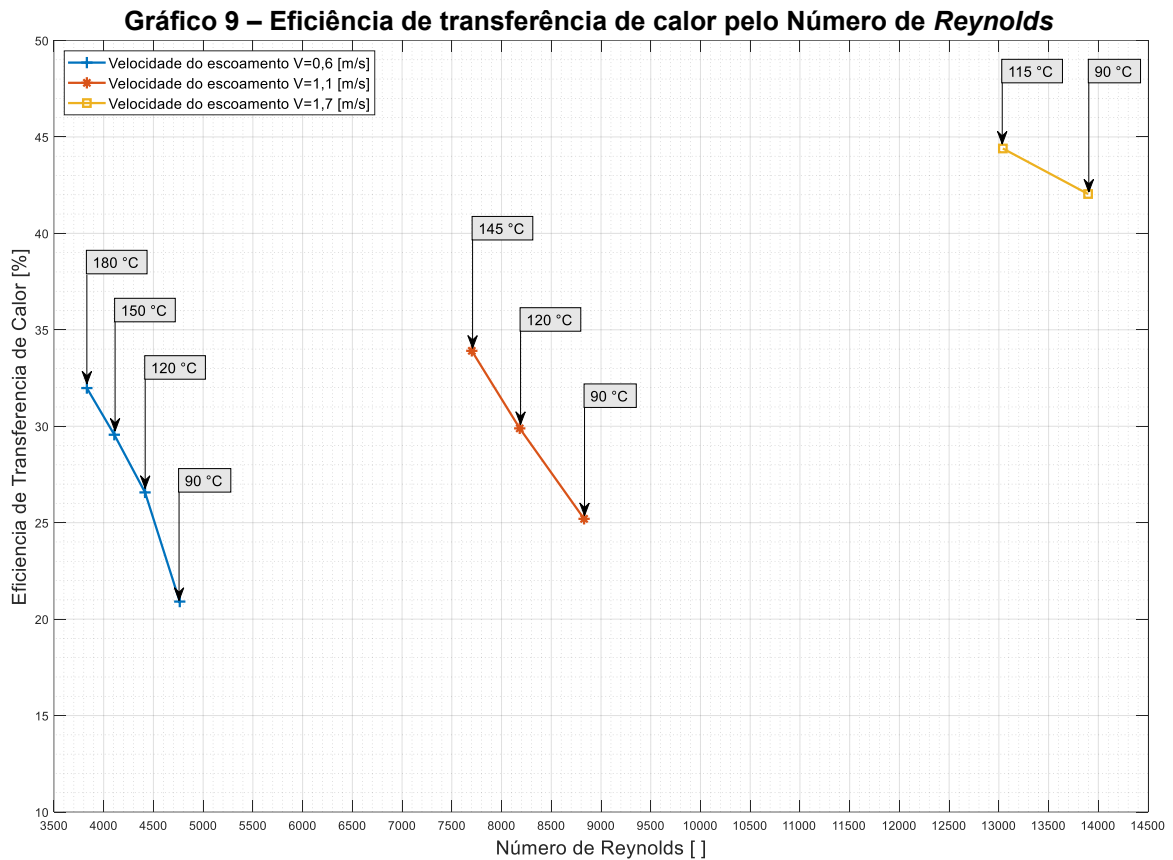


Fonte: Autoria própria (2023)

O Gráfico 8 proporciona as três condições de escoamento interno no duto do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto, juntamente com os parâmetros possíveis de temperatura de aquecimento do ar, indicados em cima de cada ponto no gráfico. Pode ser notado que quanto maior o número de *Reynolds* no canal, maior é a transferência de calor, com a condição de velocidade média de 1,7m/s de escoamento interno e 115°C de temperatura do ar, foi possível transferir 250,9W para o ar de entrada no sistema. Para realizar os cálculos de calor transferido, foi utilizada a Equação (9). Outro ponto interessante observado, foi que o número de *Reynolds* cai conforme a temperatura do ar sobe, isso ocorre devido a uma menor massa específica para maiores temperaturas e aumento da viscosidade.

Com o objetivo de analisar a eficiência de transferência de calor para a parte superior do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto entre o escoamento de ar aquecido pelo banco de resistências elétricas e o Conjunto de Termossifões 2 e,

posteriormente para o Conjunto de Termossifões 1, foi apresentado o Gráfico 9. Para a determinação da eficiência do sistema foi utilizada a Equação (10).



Pode ser notado que a maior eficiência de transferência de calor, 44,4%, foi para a condição de velocidade de 1,7m/s, novamente isso é atribuído a maior taxa de transferência de calor, devido a condição turbulenta do escoamento fluido.

A Tabela 6 fornece valores da velocidade do escoamento ( $u$ ), o número de *Reynolds* ( $Re_{Dh}$ ) para cada condição operacional, a temperatura de pré-aquecimento do escoamento de ar de entrada, a potência dissipada do banco de resistências elétricas ( $Q_{in}$ ), o calor transferido do ar para o Conjunto 2 de Termossifões ( $Q_{TTEG}$ ), o calor transferido do Conjunto 1 de Termossifões para o ar de entrada ( $Q_{TG1}$ ) e a eficiência de transferência de calor para o escoamento de ar de entrada ( $\epsilon$ ).

Tabela 6 – Pré-aquecimento do ar de entrada

$u$ [m/s]	$Re_{Dh}$ [ ]	Pré-Aquecimento máximo do ar de entrada [°C]	$Q_{in}$ [W]	$Q_{TTEG}$ [W]	$Q_{TG1}$ [W]	$\epsilon$ [%]
0,6	4.765	2,3	809	157	32,9	20,9
0,6	4.416	4,5	1161	234	62,2	26,6
0,6	4.107	7,3	1478	328	96,9	29,6
0,6	3.831	9,5	1779	380	121,5	32,0
1,1	8.830	3,0	1479	319	80,3	25,2
1,1	8.183	5,3	2131	455	135,9	29,9
1,1	7.701	7,2	2635	527	178,8	33,9
1,7	13.897	5,0	2244	501	210,4	42,0
1,7	13.040	6,2	3138	565	250,9	44,4

Fonte: Autoria própria (2023)

Destaca-se que os cálculos das transferências de calor, entre o escoamento de ar e o Conjunto 2 de Termossifões e o Conjunto 1 de Termossifões para o escoamento de ar, assim como a eficiência do processo de troca térmica, foram calculadas utilizando as Equações (8), (9) e (10), respectivamente.

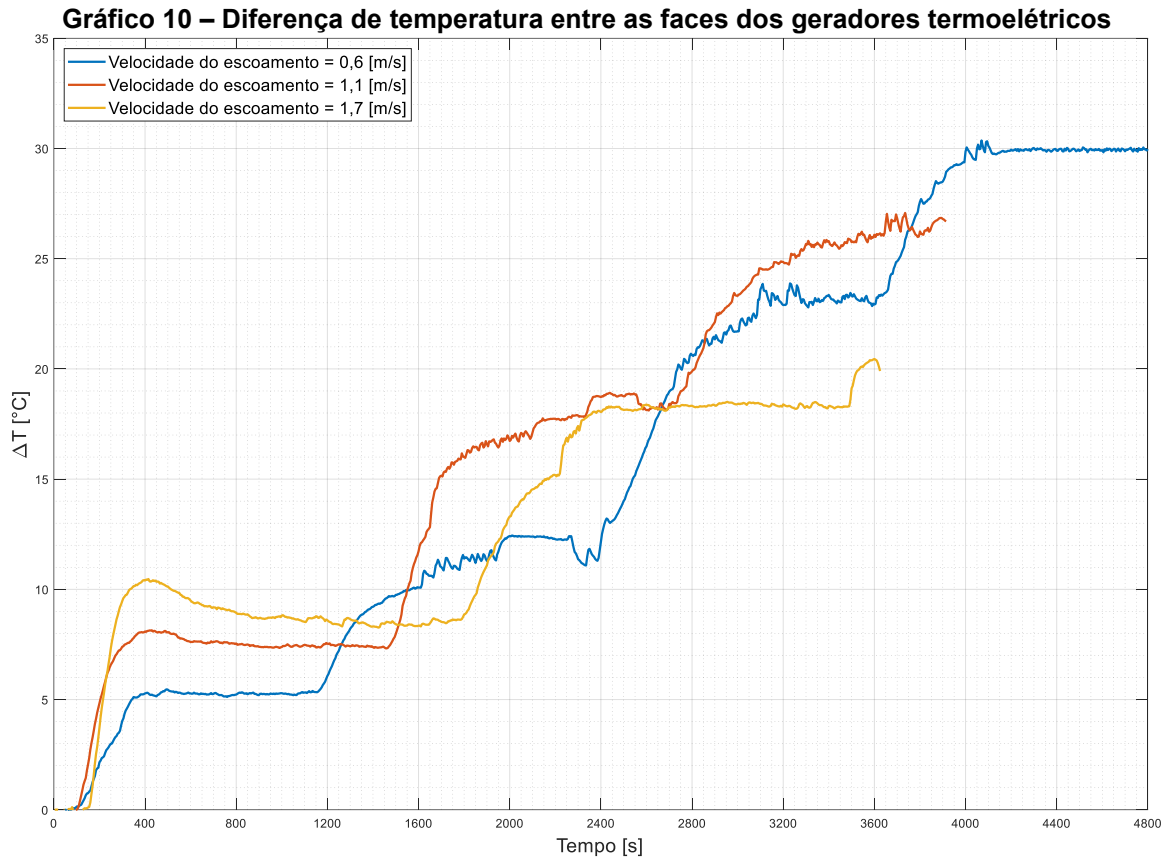
Ressalta-se ainda que o número de *Reynolds* diminui para a mesma condição de velocidade devido ao aumento da temperatura do fluido, fazendo com que as propriedades termofísicas do fluido se alterem.

### 4.3 Conversão de energia térmica em energia elétrica

Neste subitem são apresentadas as diferenças de temperaturas obtidas entre as faces dos geradores termoelétricos assim como as tensões elétricas, correntes elétricas, potências geradas, as curvas características de operação dos geradores termoelétricos e a caracterização da potência entregue pela diferença de temperatura empregada nos geradores termoelétricos.

#### 4.3.1 Diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos

Como a diferença de temperatura entre as faces de geradores termoelétricos é diretamente proporcional a potência gerada, faz-se necessário a apresentação desses valores. O Gráfico 10 ilustra os valores de diferença de temperatura entre o lado resfriado (lado frio) e o lado aquecido (lado quente) entre os geradores termoelétricos para as condições de velocidade média do escoamento de 0,6m/s, 1,1m/s e 1,7m/s para as respectivas temperaturas possíveis empregadas.



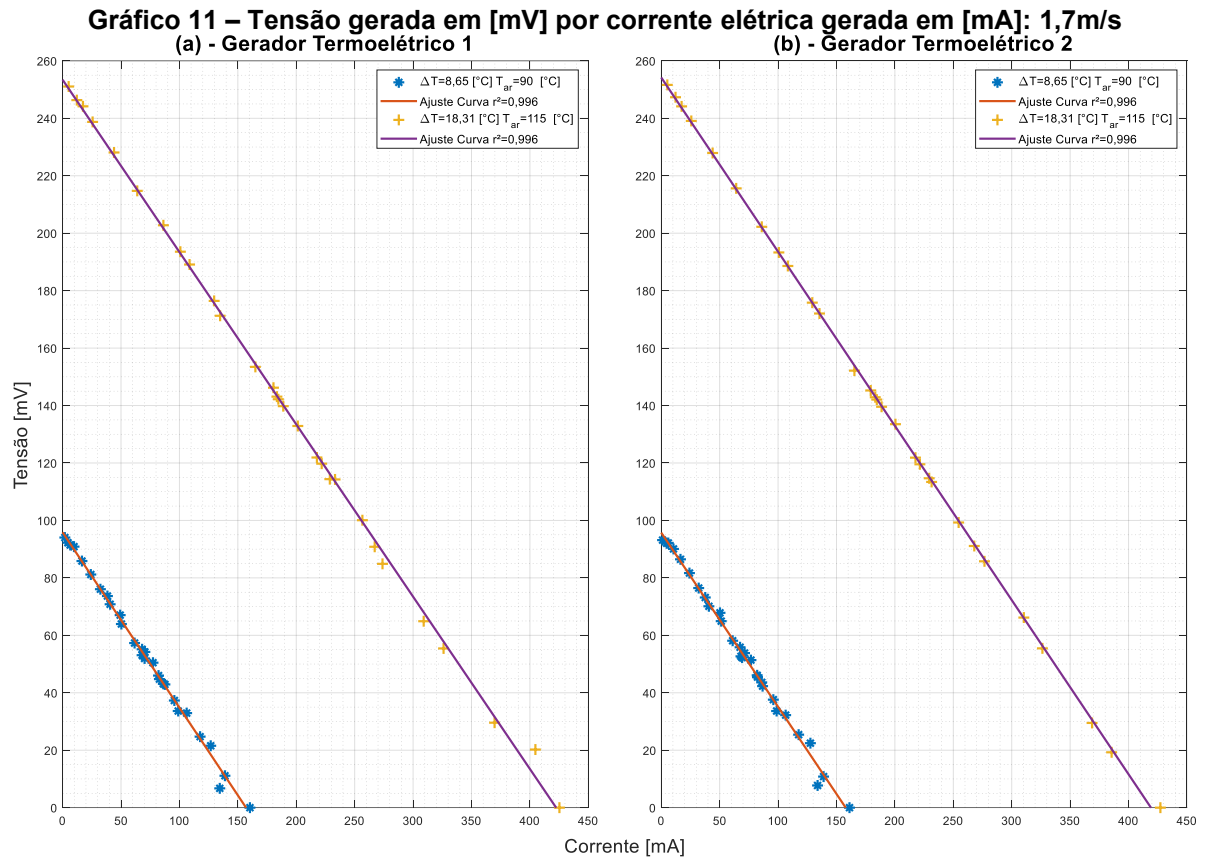
Fonte: Autoria própria (2023)

Assim como no caso do pré-aquecimento mencionado no Gráfico 7, foi observado que a maior diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoeletricos ocorreu na condição de temperatura mais elevada e menor vazão mássica. Além disso, ao comparar todas as curvas características nas mesmas condições operacionais, foi notado que a maior diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoeletricos ocorre na condição operacional em que há a maior troca térmica, conforme evidenciado no Gráfico 8.

#### 4.3.2 Potência gerada na condição de velocidade média de escoamento de 1,7m/s

Novamente, para a velocidade média de escoamento de 1,7m/s foi possível obter a temperatura de aquecimento do ar em 90°C e 115°C e, respectivamente, uma diferença de temperatura entre as faces do gerador termoeletrico de 8,7°C e 18,3°C. Dessa forma, pode ser observado no Gráfico 11 que a corrente elétrica e a tensão de saída aumentaram de acordo com a diferença de temperatura entre as faces do gerador termoeletrico. Fica evidente na análise do Gráfico 11 que existe uma alta linearidade nos resultados e uma alta semelhança entre os resultados dos Geradores Termoeletricos 1 e 2. Pode ser notado ainda que as curvas possuem

inclinações semelhante e que as resistências internas dos geradores termoelétricos variam minimamente quando se varia a temperatura de operação para as condições do experimento.



A Tabela 7 ilustra os valores de da resistência elétrica interna dos geradores termoelétricos nas condições ilustradas no Gráfico 11. As resistências elétricas internas dos geradores termoelétricos variam minimamente, devido à baixa temperatura em que eles são submetidos.

**Tabela 7 – Dados de Temperatura e resistência interna dos geradores: 1,7m/s**

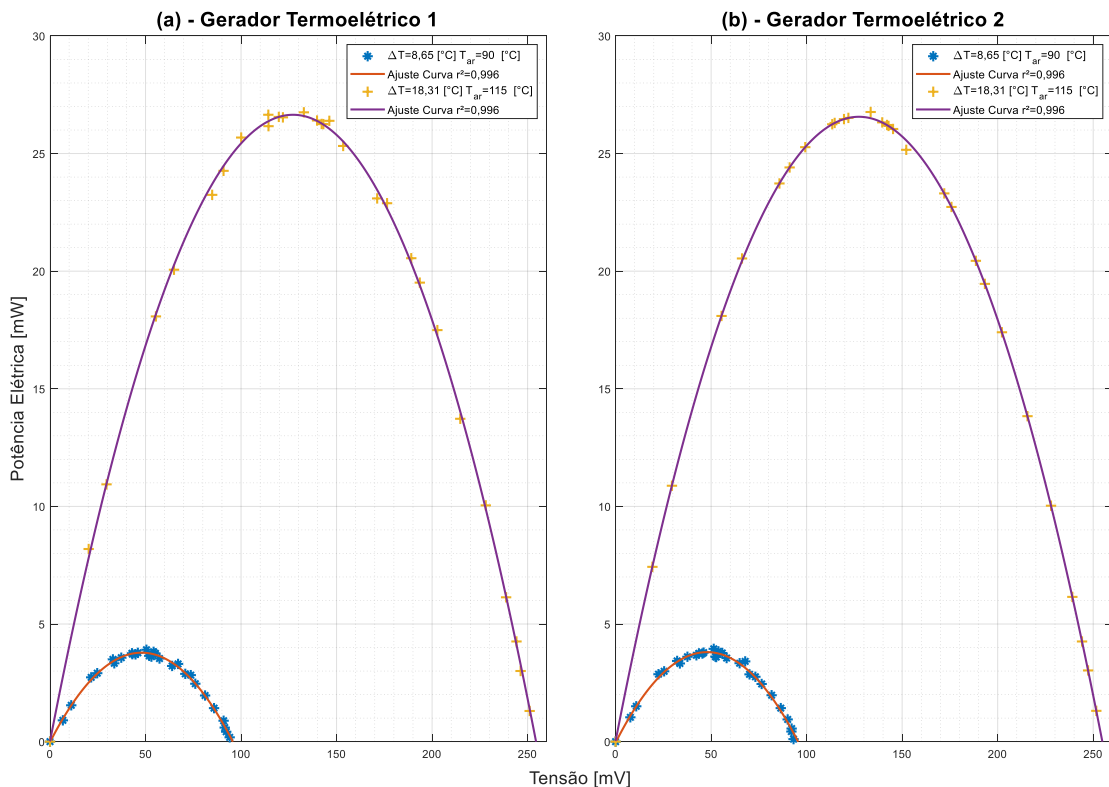
Gerador Termoelétrico	Temperatura do ar [°C]	Diferença de Temperatura [°C]	Resistência Elétrica interna [Ω]
Gerador 1	90	8,7	0,66
Gerador 2			0,66
Gerador 1	115	18,3	0,66
Gerador 2			0,66

Fonte: Autoria própria (2023)

No diagrama representado no Gráfico 12 é ilustrado o desempenho da potência elétrica gerada, medida em miliWatts [mW], em relação à tensão elétrica

gerada, expressa em miliVolts [mV], considerando a variação da diferença de temperatura entre as superfícies dos geradores termoeétricos. Além disso, nesse Gráfico 12, é possível notar que um aumento na diferença de temperatura entre as superfícies dos geradores termoeétricos resulta em uma maior potência elétrica gerada.

**Gráfico 12 – Potência gerada em [mW] por tensão gerada em [mV]: 1,7m/s**

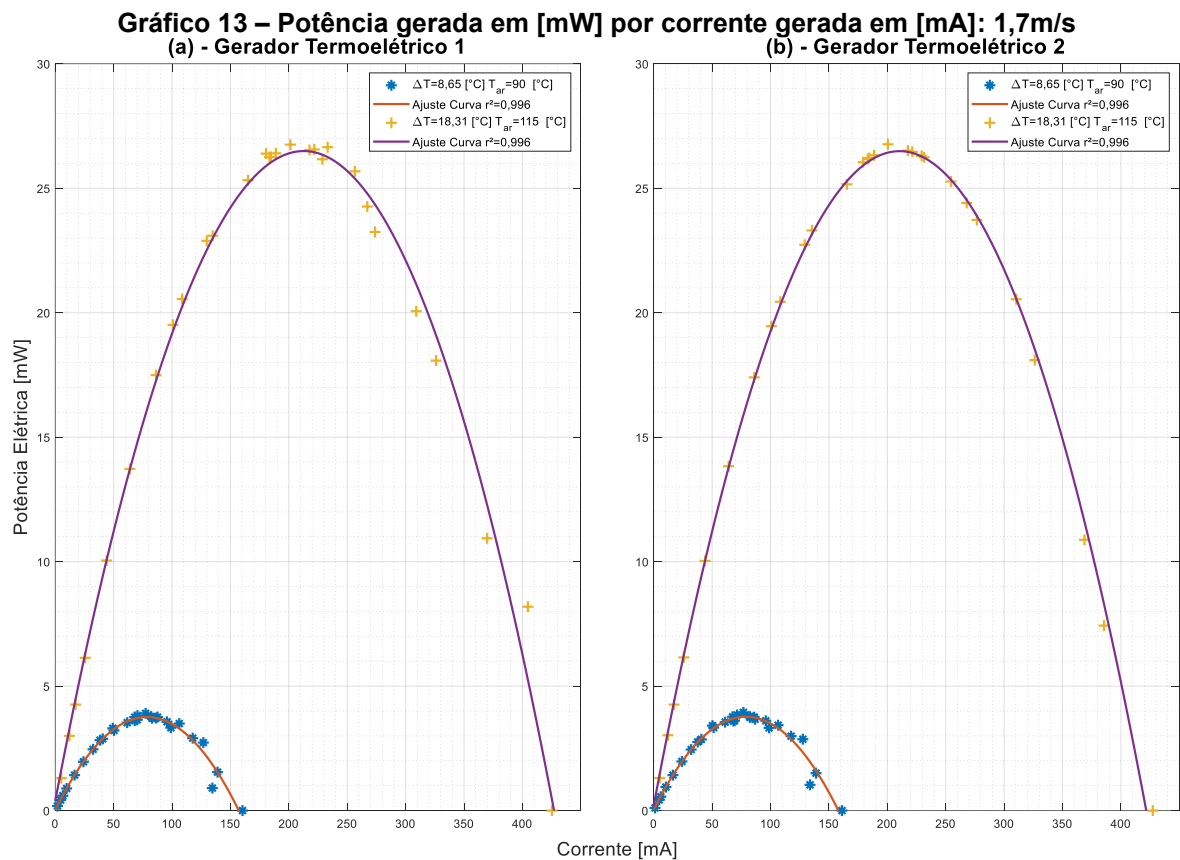


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Conforme esperado, as curvas características obtidas apresentam um padrão fortemente quadrático, evidenciado pelo coeficiente de determinação  $R^2$  próximo de 1. A potência elétrica máxima foi alcançada quando a resistência de carga externa foi igual à resistência elétrica de carga interna. Para o Gerador Termoeétrico #2, foi obtida uma potência elétrica gerada de 26mW, com uma tensão elétrica de 133mV para uma diferença de temperatura de 18,3°C.

O Gráfico 13 oferece uma representação alternativa dos dados, mostrando a relação entre a potência elétrica gerada e a corrente elétrica gerada, com base nas variações de temperatura entre as faces dos geradores termoeétricos considerando a velocidade média do escoamento no interior do túnel de vento de 1,7m/s. Pode ser observado novamente que o ponto máximo de potência elétrica é de 26mW agora

para uma corrente de 200mA considerando a mesma diferença de temperatura de 18,3°C.

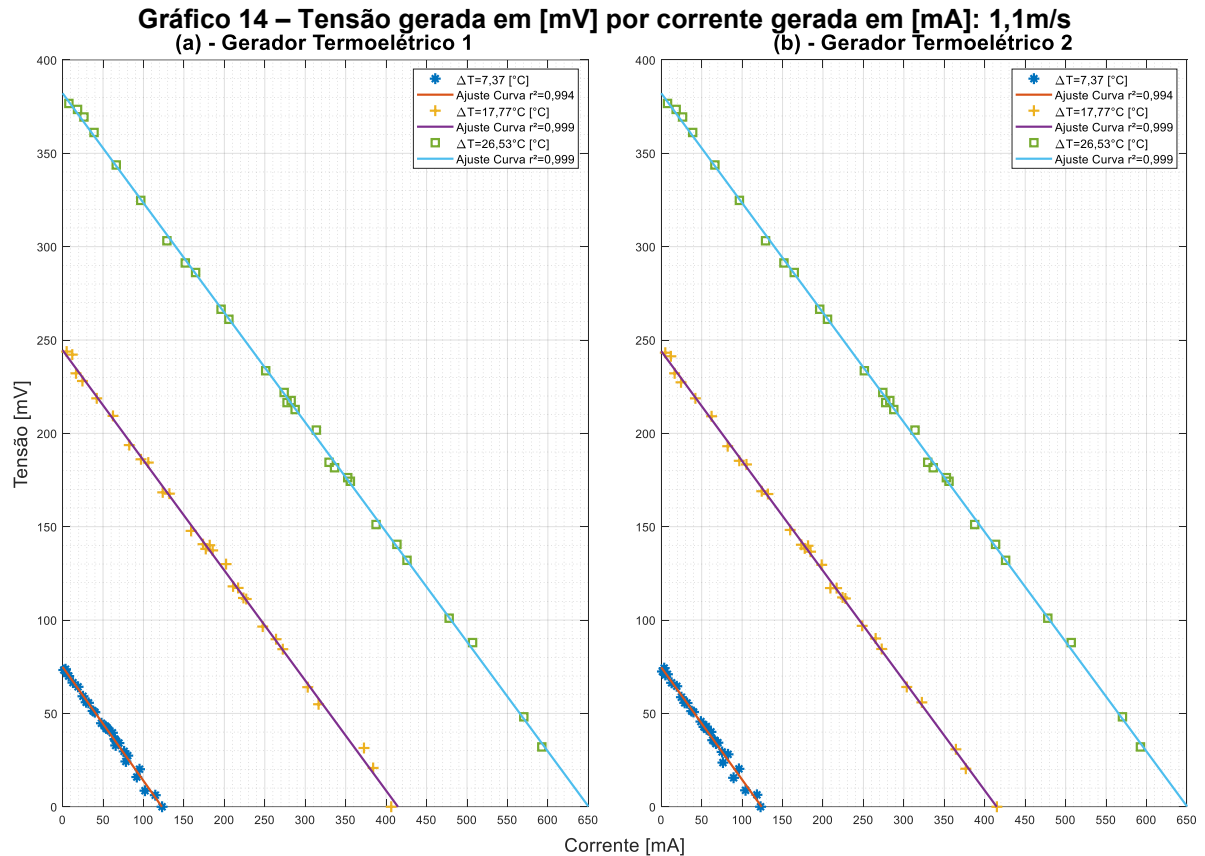


**Fonte: Autoria própria (2023)**

#### 4.3.3 Potência gerada na condição de velocidade média de escoamento de 1,1m/s

Realizando o experimento com velocidade média de escoamento de 1,1m/s foi possível obter temperatura de aquecimento do ar em 90°C, 120°C e 145°C e respectivamente, uma diferença de temperatura de 7,4°C, 17,8°C e 25,5°C. Com isso, pode ser observado no Gráfico 14 que corrente elétrica e a tensão elétrica de saída aumentam de acordo com a diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos.





**Fonte: Autoria própria (2023)**

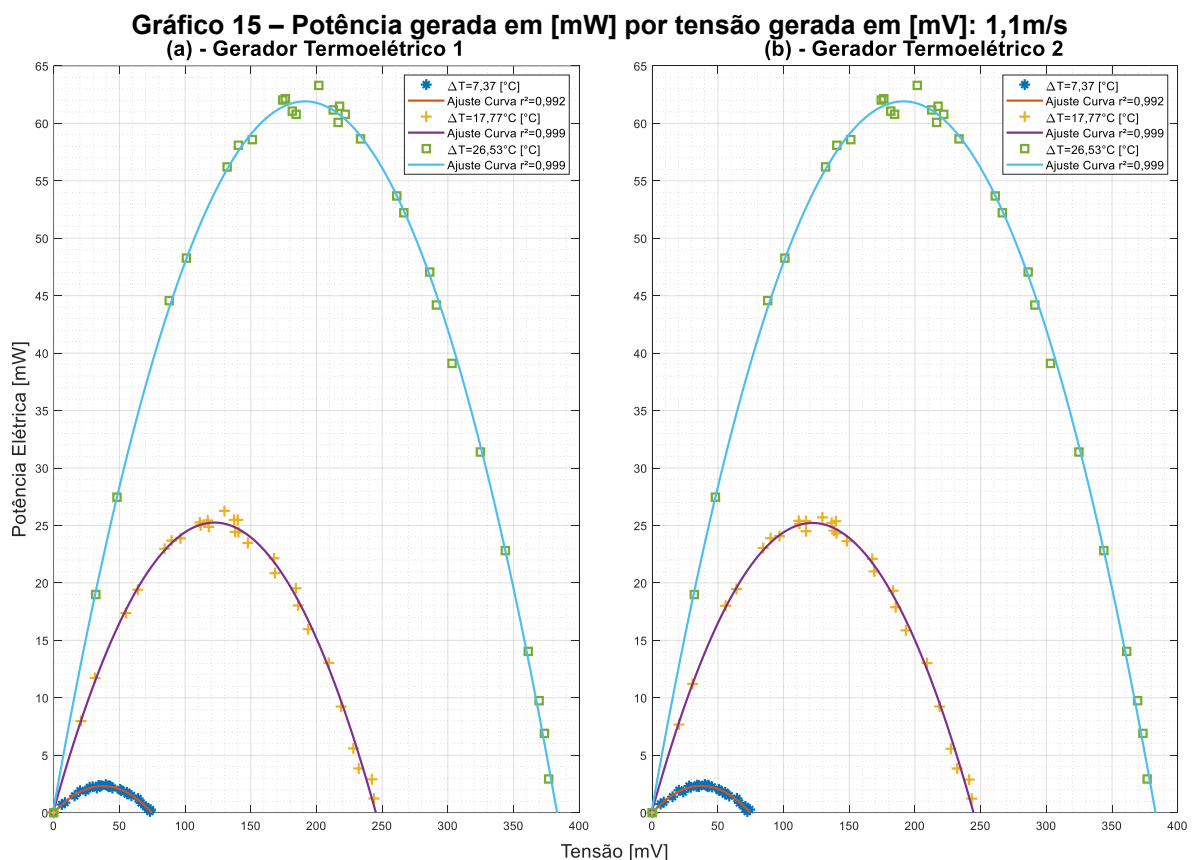
Pode ser observado no Gráfico 14 que existe uma linearidade nos resultados, bem como uma semelhança entre os resultados dos Geradores Termoelétricos 1 e 2. Além disso, é importante ressaltar que as curvas apresentam inclinações similares e as resistências elétricas internas dos geradores termoelétricos variam minimamente quando a temperatura de operação foi modificada nas condições do teste experimental. A Tabela 8 ilustra os valores de resistência elétrica interna dos geradores termoelétricos na condição operacional do Gráfico 14.

**Tabela 8 – Dados de Temperatura e resistência interna dos geradores: 1,1m/s**

Gerador Termoelétrico	Temperatura do ar [°C]	Diferença de Temperatura [°C]	Resistência Elétrica interna [Ω]
Gerador 1	90	7,4	0,66
Gerador 2			0,66
Gerador 1	120	17,8	0,66
Gerador 2			0,66
Gerador 1	145	26,5	0,66
Gerador 2			0,66

**Fonte: Autoria própria (2023)**

O Gráfico 15 ilustra o comportamento da potência elétrica gerada em [mW] em relação à tensão gerada em [mV], considerando simultaneamente a diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos. Esse gráfico fornece *insights* valiosos sobre a relação entre esses parâmetros. Pode ser observado que, à medida que a diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos aumenta, ocorre um acréscimo proporcional na potência elétrica gerada. Essa relação entre a diferença de temperatura e a potência gerada indica a importância do gradiente térmico para o desempenho eficiente dos geradores termoelétricos.



Fonte: Autoria própria (2023)

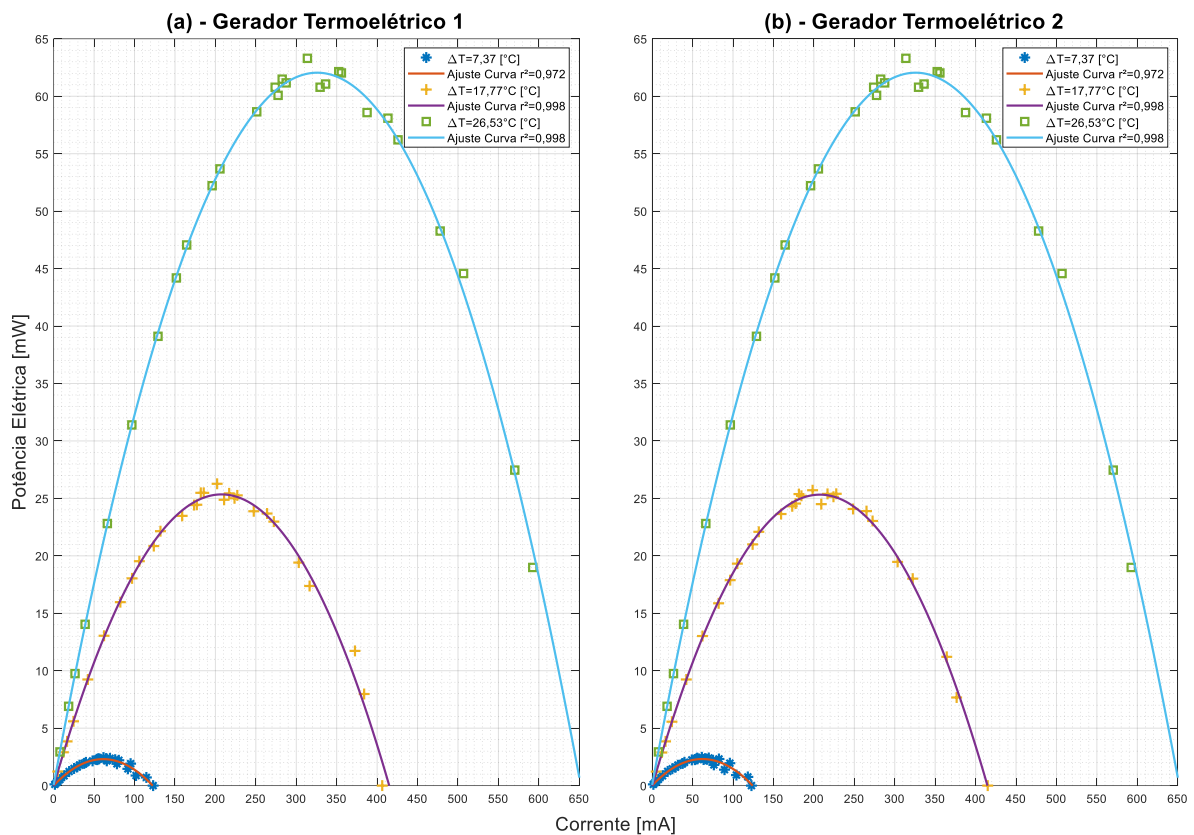
O Gráfico 15 demonstra que o aumento da diferença de temperatura resulta em um incremento na potência elétrica, sugerindo a possibilidade de otimização do sistema ao maximizar esse gradiente. Essa informação é essencial para aprimoramento de dispositivos termoelétricos, permitindo uma melhor compreensão das condições ideais de operação.

Conforme esperado, as curvas características obtidas seguem um comportamento quadrático, indicado pelo coeficiente  $R^2$  próximo de 1. A potência máxima gerada ocorre quando a resistência de carga externa é igual à resistência

de carga interna e gera potência de 62mW com uma tensão elétrica de 187mV para a diferença de temperatura de 26,5°C para o Gerador Termoelétrico 1.

O Gráfico 16 indica uma forma alternativa de ilustrar os dados de potência elétrica de gerada em função de corrente elétrica gerada, parametrizado em diferenças de temperatura  $\Delta T$  entre as faces do gerador termoelétrico. Pode ser observado novamente que o ponto máximo de potência é de 62mW agora para uma corrente de 334mA considerando  $\Delta T = 26,5^\circ\text{C}$ .

**Gráfico 16 – Potência gerada em [mW] por corrente gerada em [mA]: 1,1m/s**



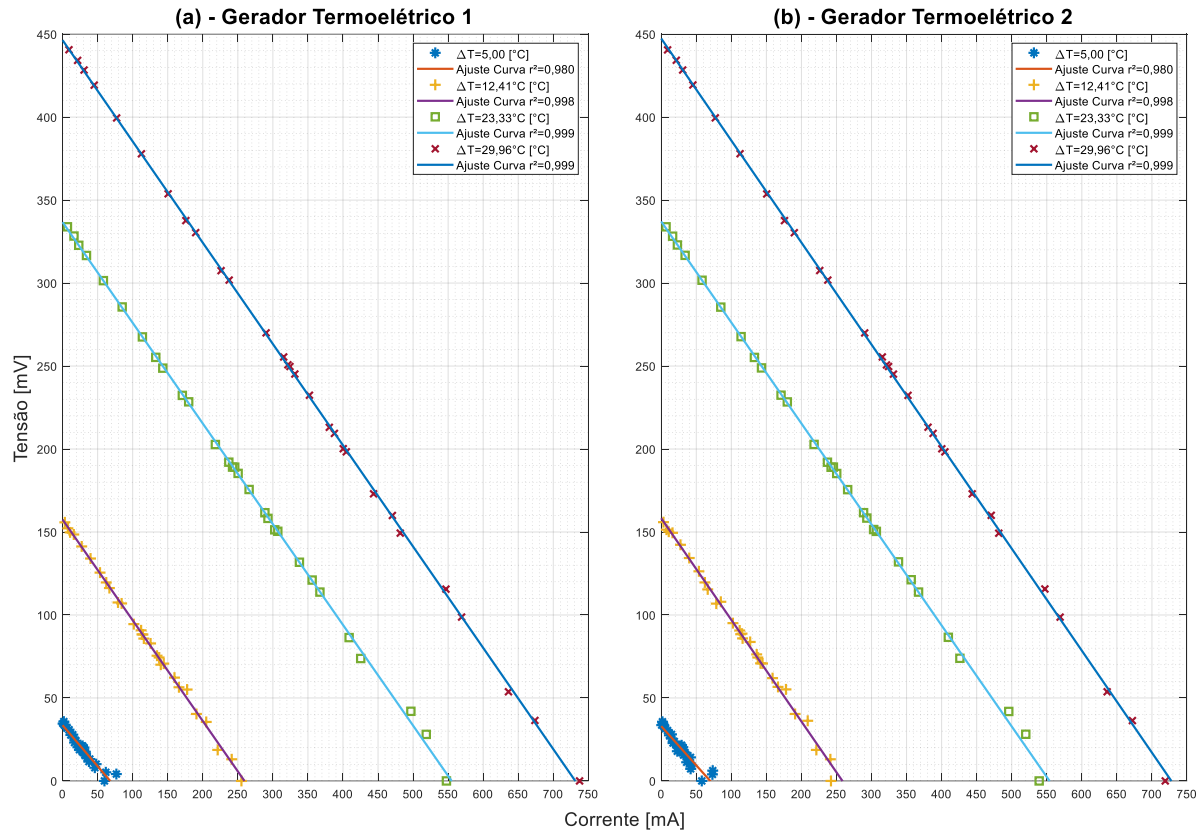
**Fonte: Autoria própria (2023)**

#### 4.3.4 Potência gerada na condição de velocidade média de escoamento de 0,6m/s

Para as condições experimentais com velocidade média de escoamento de 0,6m/s foi possível obter temperatura de aquecimento do ar em 90°C, 120°C, 150°C e 180°C e, respectivamente, uma diferença de temperatura de 5,0°C, 12,4°C, 23,3°C e 30,0°C. Com isso, foi observado no Gráfico 17 que corrente elétrica e a tensão elétrica de saída aumentam de acordo com a diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos. Nota-se ainda que existe uma alta linearidade nos resultados e uma semelhança entre os resultados dos geradores termoelétricos.

Pode ser observado também, que as curvas possuem inclinações semelhantes e que as resistências elétricas internas dos geradores termoeletricos variam minimamente quando se varia a temperatura de operação para as condições do experimento.

**Gráfico 17 – Tensão gerada em [mV] por corrente gerada em [mA]: 0,6m/s**



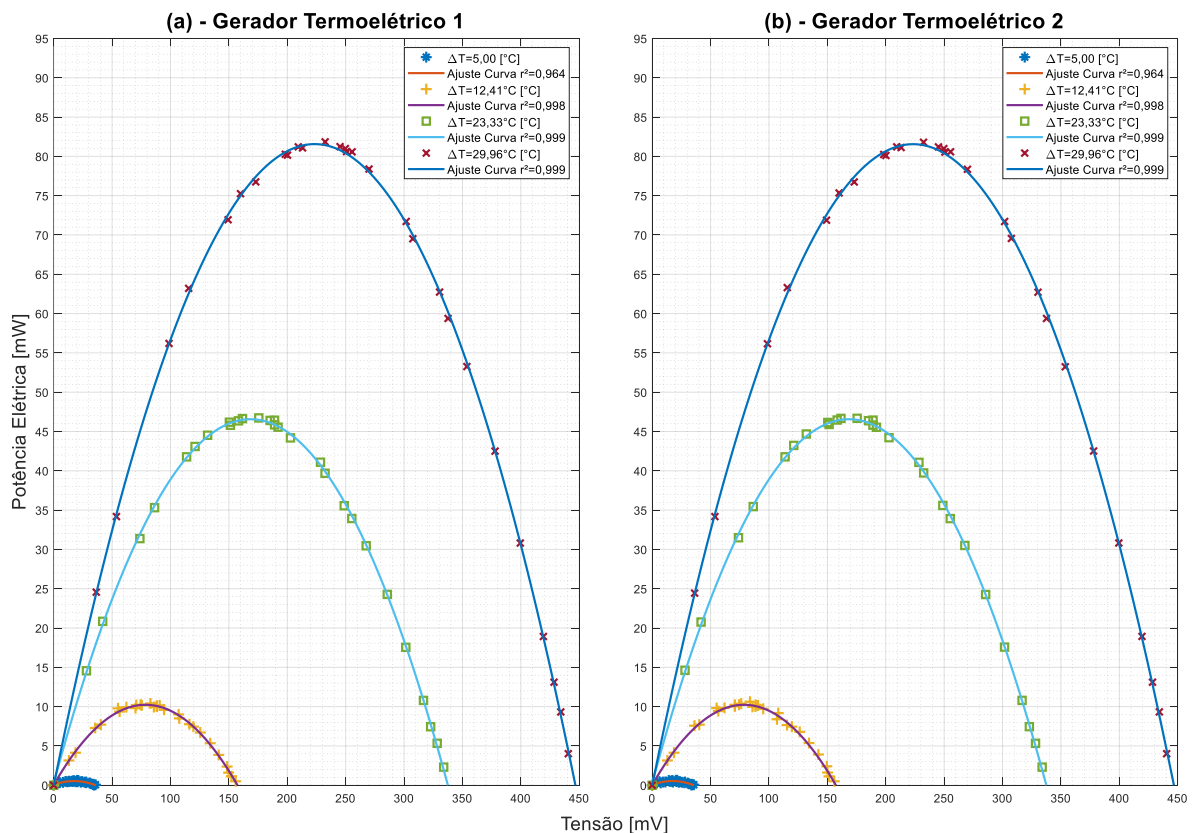
A Tabela 9 ilustra os valores da resistência elétrica interna dos geradores termoeletricos na condição operacional considerando uma velocidade média do escoamento no túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto de 0,6m/s. As resistências elétricas internas dos geradores termoeletricos variam minimamente, devido à baixa temperatura em que eles são submetidos.

**Tabela 9 – Dados de Temperatura e resistência interna dos geradores: 0,6m/s**

Gerador Termoelétrico	Temperatura do ar [°C]	Diferença de Temperatura [°C]	Resistência Elétrica interna [Ω]
Gerador 1	90	5	0,66
Gerador 2			
Gerador 1	120	12,4	0,66
Gerador 2			
Gerador 1	150	23,3	0,66
Gerador 2			
Gerador 1	180	30	0,66
Gerador 2			

Fonte: Autoria própria (2023)

No Gráfico 18 é apresentado o comportamento da potência elétrica gerada em [mW] em função da tensão elétrica gerada [mV] parametrizado na diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos. No Gráfico 18 também pode ser observado que com o aumento da diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos, a potência gerada também foi aumentada.

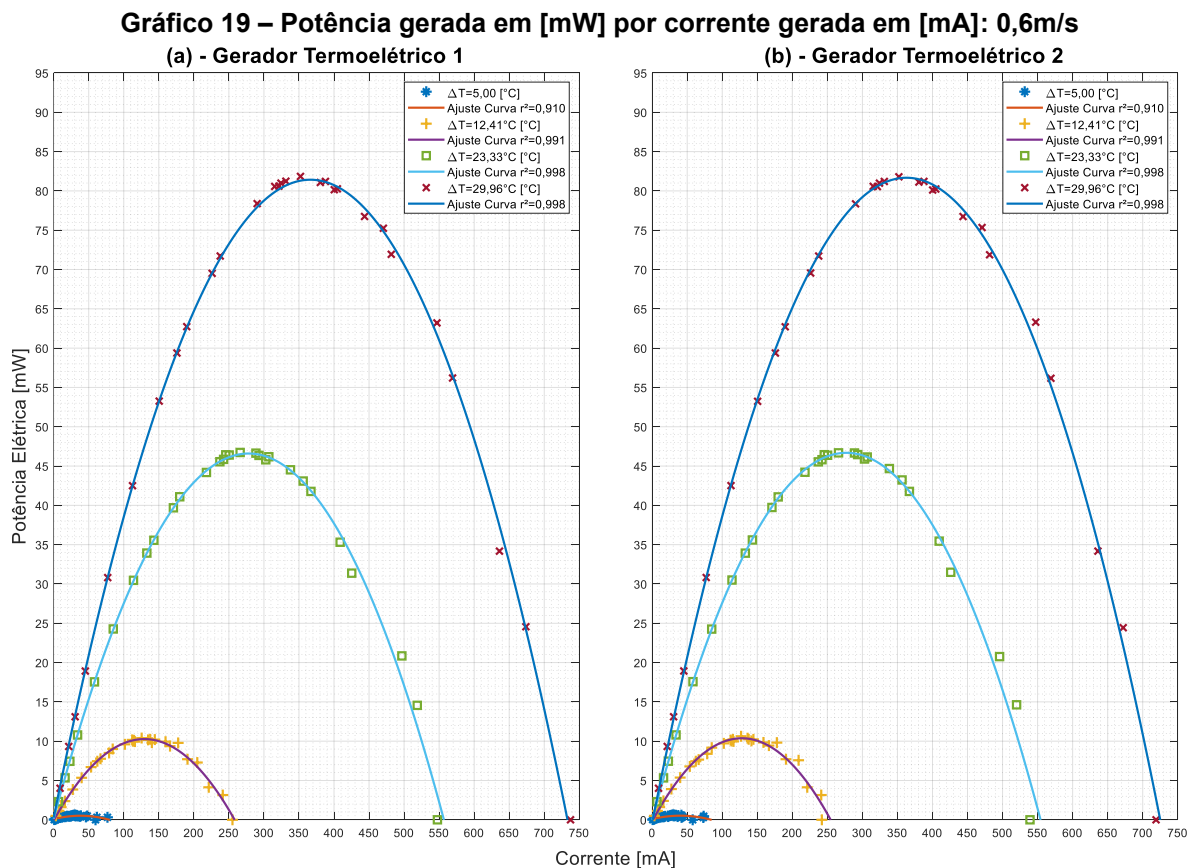
**Gráfico 18 – Potência gerada em [mW] por tensão gerada em [mV]: 0,6m/s**

Fonte: Autoria própria (2023)

Além disso, ressalta-se que as curvas características obtidas demonstram um comportamento quadrático, como esperado. Isso é evidenciado pelo coeficiente

de determinação  $R^2$  próximo de 1, indicando um ajuste dos dados experimentais ao modelo quadrático. É importante notar que a potência máxima gerada foi alcançada quando a resistência de carga externa é igual à resistência de carga interna. Nesse ponto de máxima potência, os geradores termoelétricos atingem um desempenho ótimo. No caso específico do Gerador Termoelétrico 2, a potência gerada atinge seu valor máximo de 81mW, acompanhada por uma tensão elétrica de 232mV. Esse resultado foi obtido para uma diferença de temperatura de 30,0°C entre as faces do gerador termoelétrico.

No Gráfico 19 é apresentada uma abordagem alternativa para ilustrar os dados de potência gerada em função da corrente elétrica gerada, parametrizada pela diferença de temperatura  $\Delta T$  entre as faces dos geradores termoelétricos. Essa representação visual oferece uma perspectiva adicional sobre a relação entre esses parâmetros, fornecendo informações complementares para a compreensão e análise do desempenho dos geradores termoelétricos.



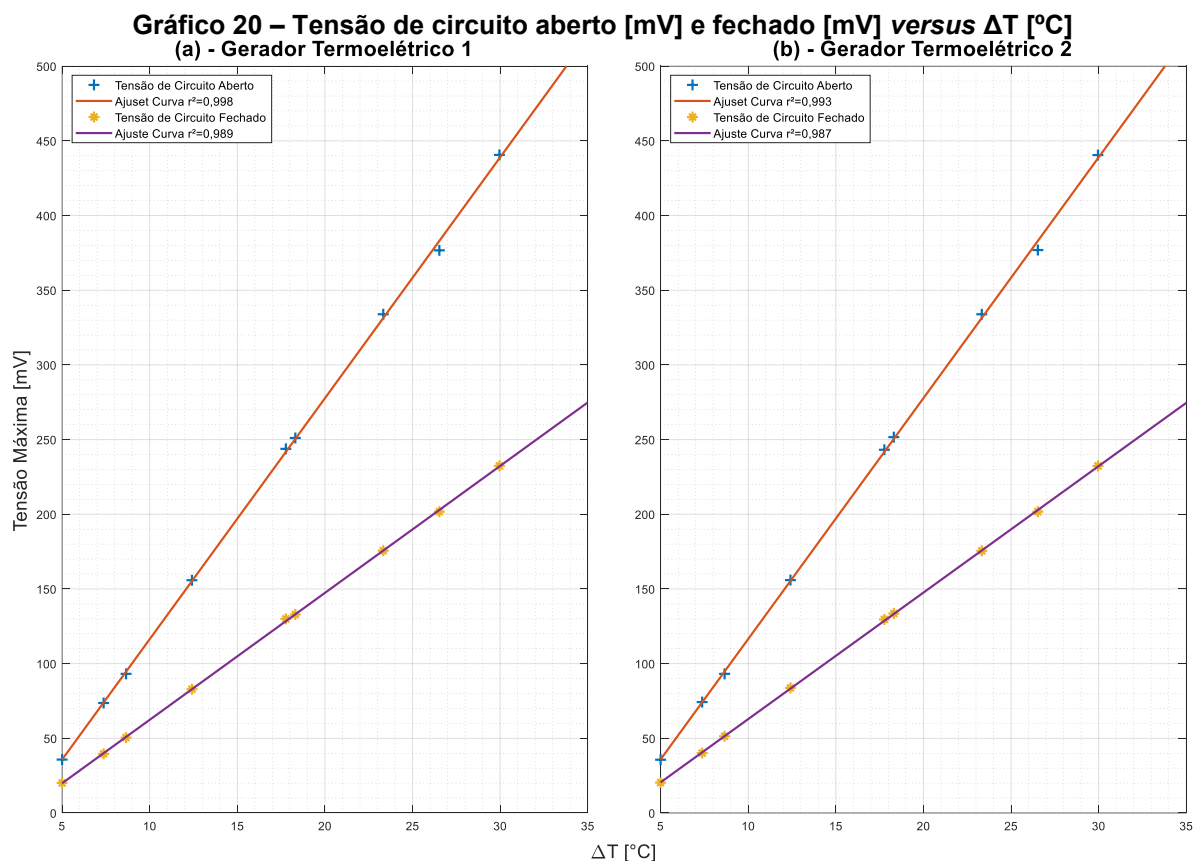
Fonte: Autoria própria (2023)

Pode ser observado novamente que o ponto máximo de potência gerada é de 81mW para uma corrente de 352mA considerando  $\Delta T = 30,0^\circ\text{C}$ . Esses dados

destacam a importância da seleção adequada das condições de operação para maximizar a eficiência e o desempenho dos geradores termoelétricos. Em suma, as curvas características dos geradores termoelétricos mostram um comportamento quadrático, com a potência máxima ocorrendo quando a resistência de carga externa é igual à resistência interna

#### 4.3.5 Construção da curva característica dos geradores termoelétricos

O Gráfico 20 apresenta a tensão de circuito aberto e a tensão de circuito fechado em [mV] em função da diferença de temperatura entre os lados dos geradores termoelétricos em [°C]. É possível observar que tanto a tensão de circuito aberto quanto a tensão de circuito fechado aumentam de forma linear à medida que a diferença de temperatura aumenta. Ressalta-se que os pontos correspondentes à tensão de circuito fechado são aqueles em que se obtém a máxima potência gerada.



Fonte: Autoria própria (2023)

As Equações (12) e (13) são referentes ao Geradores Termoelétricos 1 e 2, TG1 e TG2, respectivamente, fornecendo os ajustes de curva para a tensão de

circuito aberto em função da diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoeletricos, com um coeficiente de determinação  $R^2$  de no mínimo de 0,996:

$$U_{opn_{TG1}} = 16,13 \Delta T - 44,90, \quad (12)$$

$$U_{opn_{TG1}} = 16,12 \Delta T - 44,73, \quad (13)$$

sendo que,  $U_{opn}$  é a tensão de circuito aberto dos geradores termoeletricos [mV] e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre as superficies aquecida e arrefecida dos geradores termoeletricos [°C].

Além disso, é importante destacar que o desvio padrão entre os termos apresenta uma variação mínima. Essa consistência nos valores dos desvios padrão reforça a utilização da média das equações para representar ambos os geradores termoeletricos em uma única equação. Essa unificação é expressa de forma concisa na Equação (14), simplificando a análise e permitindo uma abordagem mais geral para descrever o comportamento dos geradores termoeletricos.

$$U_{opn_{TG12}} = 16,13 \Delta T - 44,82, \quad (14)$$

Quando a resistência interna de um gerador termoeletrico se aproxima de zero, a força eletromotriz desse gerador é equivalente à sua tensão de circuito aberto, como a Equação 14 ilustrou. Como a temperatura experimental não houve grande variação, desta forma temos uma resistência interna de 0,66 para todos os testes. Com isso, é possível inserir esse valor na Equação (14) e construir a equação dos geradores termoeletricos representado pela Equação (15).

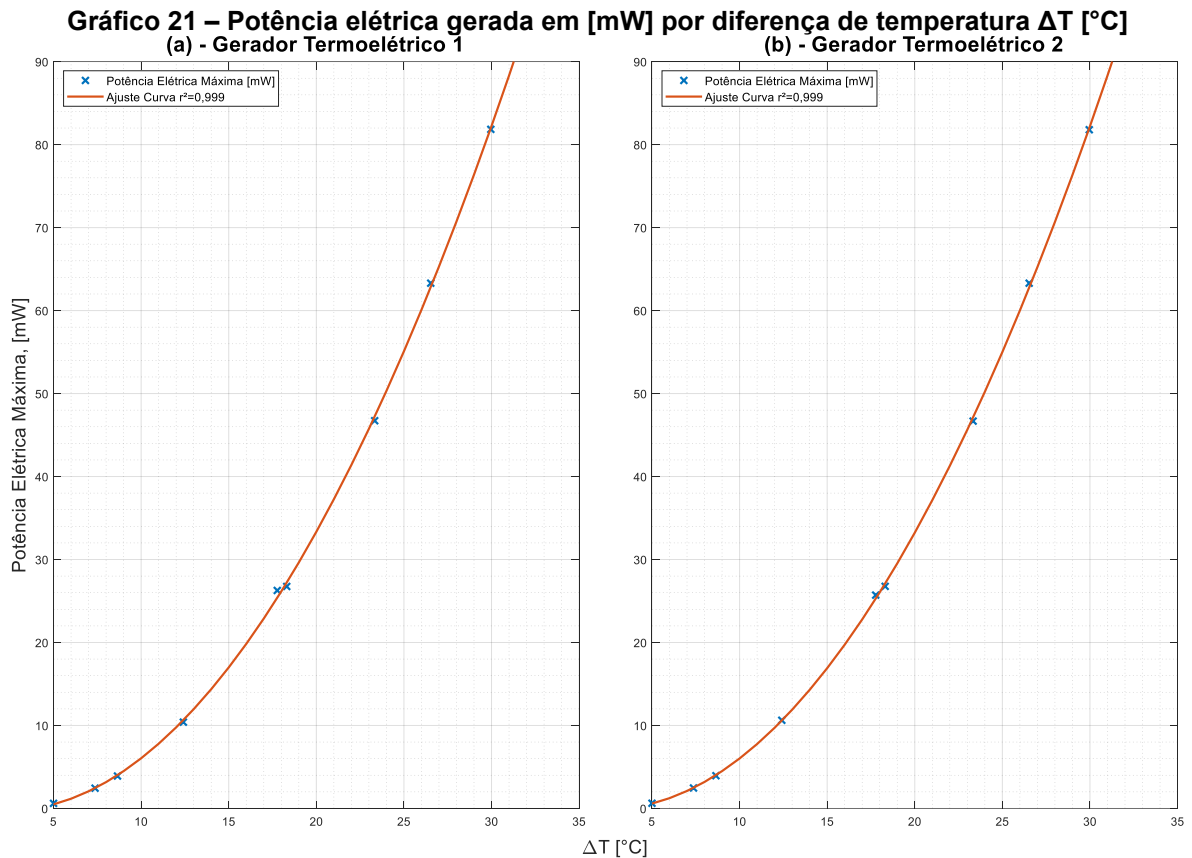
$$U_{TG12} = 16,13 \Delta T - 0,66 i - 44,82, \quad (15)$$

A Equação (15) fornece uma aproximação dos valores de tensão em relação à corrente elétrica para os geradores termoeletricos neste experimento. Essa equação é válida em uma faixa de diferença de temperatura entre 5°C e 30°C.

O comportamento da potência gerada em relação à diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoeletricos é representado no Gráfico 21. Como já era de se esperar, à medida que essa diferença de temperatura aumenta, a potência gerada aumenta de forma quadrática. Esse padrão é



evidenciado pela curva de crescimento acentuado no gráfico, indicando uma relação não linear e ressaltando a importância do gradiente térmico para a geração de energia elétrica. O aumento da diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos resulta em um incremento significativo na potência gerada, destacando a relevância desse fator no desempenho e na eficiência desses dispositivos.



Fonte: Autoria própria (2023)

As Equações (16) e (17) correlacionam os valores de diferença de temperatura para potência elétrica gerada com coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,996 para diferenças de temperatura entre 5°C e 30°C.

$$P_{TG1} = (10,80 \Delta T^2 - 50,97 \Delta T + 34,02) 10^{-2}. \quad (16)$$

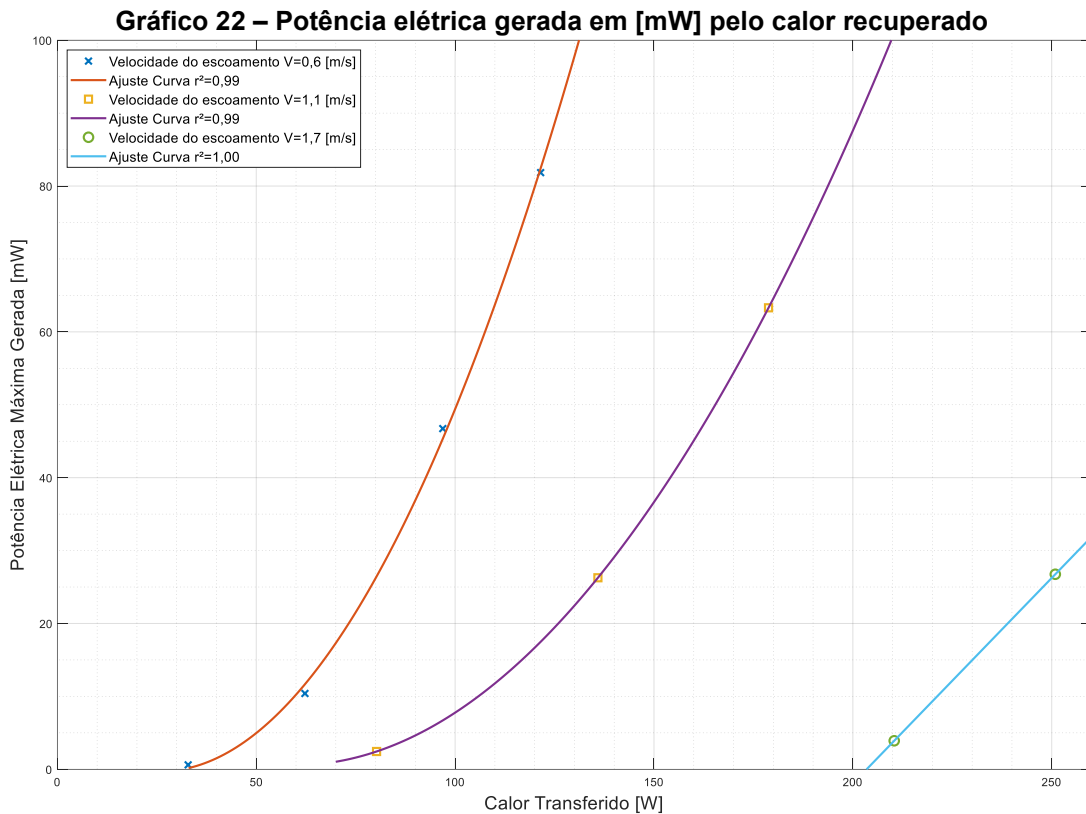
$$P_{TG2} = (10,89 \Delta T^2 - 54,63 \Delta T + 59,42) 10^{-2}. \quad (17)$$

Os desvios padrão entre os termos de maior impacto das equações são pequenos, permitindo o uso das médias dos termos sem afetar de maneira significativa os valores calculados pelas Equações (16) e (17). Assim, a Equação

(18) retrata o comportamento da potência no intervalo de diferença de temperatura ilustrado no Gráfico 21.

$$P_{TG12} = (10,85 \Delta T^2 - 52,80 \Delta T + 46,72)10^{-2}. \quad (18)$$

Com os dados de potência máxima gerada, foi possível entender o comportamento dessa variável em função do calor transferido para o ar de entrada como ilustrado no Gráfico 22.



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Nota-se que há um comportamento quadrático para os valores de potência elétrica gerada em função do calor transferido para o ar de entrada quando o experimento foi condicionado as velocidades de escoamento de 0,6 e 1,1 m/s, para a velocidade de 1,7 m/s o comportamento linear se deu, pois para essa condição foi possível obter somente dois pontos de potência elétrica gerada.

Além disso, é essencial analisar a comparação da potência gerada por diferentes tipos de geradores termoelétricos, levando em consideração não apenas a quantidade de potência em [W], mas também a densidade de potência gerada, em [W/m<sup>2</sup>]. Isso se torna relevante ao considerar a dimensão dos geradores termoelétricos. Para fornecer uma perspectiva mais abrangente, a Tabela 10

apresenta os dados de potência gerada por área do gerador termoelétrico em função do gradiente de temperatura. Essa abordagem permite uma comparação mais precisa e justa do desempenho dos diferentes geradores termoelétricos, considerando a eficiência energética em relação à sua área de superfície.

**Tabela 10 – Potência gerada por área em relação a diferença de temperatura**

$\Delta T$ [°C]	Potência Gerada TG – 1 [W/m <sup>2</sup> ]	Potência Gerada TG – 2 [W/m <sup>2</sup> ]
5,0	0,21	0,21
7,4	0,83	0,84
8,7	1,33	1,35
12,4	3,56	3,64
17,8	9,00	8,81
18,3	9,17	9,17
23,3	16,02	16,00
26,5	21,70	21,46
30,0	28,06	28,05

**Fonte: Autoria própria (2023)**

A partir dos dados apresentados na Tabela 10, é possível observar que, ao somar a potência gerada pelos dois geradores termoelétricos, foi obtido um valor de aproximadamente 56,0W/m<sup>2</sup>, para uma diferença de temperatura de 30°C. Para fins de comparação, é importante mencionar que a potência máxima produzida por um painel solar fotovoltaico *Siemens*<sup>®</sup> SM46, com células monocristalinas, é de 152,6W/m<sup>2</sup>.

Dessa forma, a potência gerada pelos geradores termoelétricos corresponde a cerca de 37% da potência do painel solar fotovoltaico mencionado. Essa comparação destaca as diferentes capacidades de geração de energia dos dois tipos de tecnologias, ressaltando as vantagens e desafios associados a cada uma delas.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais, que abordam as principais contribuições dessa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Além disso, são fornecidas recomendações para projetos futuros a serem desenvolvidos, visando aprimorar e expandir os resultados obtidos.

### 5.1 Conclusões

Nesse estudo, foi realizada uma análise experimental para investigar as características de operação de um conjunto de geradores termoelétricos de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) assistido por termossifões aletados em um túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto, simulando um ambiente industrial. O objetivo geral foi compreender o desempenho desses geradores termoelétricos em diferentes condições operacionais de vazão mássica e gradientes de temperaturas visando explorar seu potencial na recuperação de calor residual.

Essa abordagem experimental permitiu a obtenção de dados valiosos sobre as características de operação dos geradores termoelétricos, incluindo sua eficiência e potência gerada em diferentes faixas de temperatura. Esses resultados experimentais são importantes para o avanço da tecnologia termoelétrica e oferecem informações para futuras aplicações industriais.

A combinação dos geradores termoelétricos de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) com um sistema passivo de transferência de calor (termossifões aletados) se mostrou uma solução promissora na recuperação de calor residual, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade em diversos setores industriais.

Para isso, foi necessário o desenvolvimento de um aparato experimental que simulasse a entrada de gases provenientes do ambiente que seriam aquecidos pelos processos industriais e seriam liberados para a atmosfera. Embora esse aparato experimental tenha apresentado algumas limitações em relação ao aquecimento do escoamento de ar, ele foi capaz de simular adequadamente os parâmetros necessários para obter uma ampla gama de resultados.

Esse aparato experimental foi projetado e construído com cuidado para reproduzir as condições operacionais típicas encontradas em ambientes industriais, garantindo que os geradores termoelétricos pudessem operar em condições realistas.

Os testes experimentais executados permitiram a obtenção de dados confiáveis sobre o desempenho dos geradores termoelétricos e sua capacidade de converter calor residual em energia elétrica. Com isso, foi possível a obtenção das curvas de operação do conjunto de geradores termoelétricos assistidos por termossifões aletados para a faixa de operação de 5°C a 30°C de diferença de temperatura entre as faces dos geradores termoelétricos.

Pode ser notado que os maiores valores de potência entregue pelos geradores termoelétricos foram para as diferenças de temperatura mais altas. Normalizando-se a potência gerada em  $[W/m^2]$ , foi possível gerar  $52,0W/m^2$ , aproximadamente um terço da potência máxima que seria gerada por um painel solar fotovoltaico *Siemens*® SM46.

Além disso, foi realizado um estudo sobre o pré-aquecimento do ar de entrada, o qual permitiu um aumento significativo na temperatura máxima do ar, chegando a quase 10°C. Essa investigação experimental teve como objetivo explorar a integração dos geradores termoelétricos assistidos por termossifões aletados. Ao pré-aquecer o ar de entrada, aproveitando o calor residual, foi possível otimizar ainda mais o desempenho dos geradores termoelétricos.

Essa abordagem de pré-aquecimento do ar de entrada, combinada com os geradores termoelétricos assistidos por termossifões, demonstrou uma sinergia promissora na recuperação de calor residual. Ela contribui para o aumento da eficiência energética e oferece uma solução prática e viável para maximizar a utilização de calor residual em processos industriais.

Como conclusão final, pode ser afirmado que a aplicação de geradores termoelétricos na recuperação de calor residual é uma ótima ferramenta a ser explorada. Esse sistema de geradores termoelétricos assistidos por termossifões aletados é compacto, necessita de baixa manutenção e apresenta uma geometria que pode ser acoplada na maioria dos sistemas industriais.

## **5.2 Sugestão para trabalhos futuros**

Visando o aprofundamento do estudo da recuperação de calor residual de gases aquecidos de meios industriais através do aparato experimental desenvolvido nessa Dissertação de Mestrado, recomenda-se:

- Aplicar geradores termoelétricos composto por outros materiais;

- Aplicar outros tipos de fluidos de trabalho no preenchimento dos termossifões, tais como os nanofluidos;
- Efetuar melhorias no aparato experimental que possibilite explorar vazões mássicas de ar e temperaturas diferentes das abordadas nesse trabalho;
- Instalar outro ventilador centrífugo possibilitando realizar condições de entrada e saída dos gases no túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto (escoamento em paralelo ou em contracorrente);
- Isolar termicamente o túnel de vento, a fim de minimizar os erros experimentais;
- Para valores de tensão abaixo de 0,1 V, utilizar um amplificador de sinal para que os erros associados sejam menos que o valor de leitura;
- Calcular e analisar a eficiência do sistema de conversão de energia térmica em energia elétrica;
- Verificar sistemática de preenchimento dos termossifões para garantir que não haja microbolhas no fluido de trabalho;
- Verificar o ponto ótimo entre a conversão de energia térmica e a potência elétrica gerada.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, V. M. **Influência da razão de preenchimento e da inclinação no desempenho térmico de termossifões**. 2016. 135 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.
- AHAMMED, N.; ASIRVATHAM, L.; WONGWISES, S. Thermoelectric cooling of electronic devices with nanofluid in a multiport minichannel heat exchanger. **Experimental Thermal And Fluid Science**, [s.l.], v. 74, p.81-90, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.023>.
- AKBARZADEH, A.; WADOWSKI, T. Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 16, n. 1, p. 81-87, jan. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-4311\(95\)00012-3](http://dx.doi.org/10.1016/1359-4311(95)00012-3).
- ANTONINI ALVES, T.; KRAMBECK, L.; SANTOS, P. H. Heat pipe and thermosyphon for thermal management of thermoelectric cooling. In: ARANGUREN, P. **Bringing Thermoelectricity into Reality**. Navarra: Intechopen, 2018. Cap. 17. p. 353-373.
- ANTUNES, J. A. A., **Reaproveitamento de calor para geração de energia eléctrica no automóvel**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2011.
- ASSIS, Machado de. **Memórias póstumas de Brás Cubas**. São Paulo: Penguin-Companhia, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 5167-1: Medição de vazão de fluidos por meio de instrumentos de pressão - Parte 1: Placas de orifício, bocais e tubos de Venturi instalados em seção transversal circular de condutos forçados**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 54 p.
- BANGERT, K. (26 de Abril de 2006). **Thermopowers**. *E-futures*, pp. 1-5.
- BENDIG, M.; MARÉCHAL, F.; FAVRAT, D. Defining “waste heat” for industrial processes. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 61, n. 1, p. 134-142, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.020>.
- BROST, O. **Closed two phase thermosyphons**, Class Notes. EMC/UFSC Florianópolis, Brazil (1996).
- CHI, S.W. **Heat pipe theory and practice: a sourcebook**. Washington, DC, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
- EDU, I. S. (18 de 7 de 2011). **Thermal energy conversion**. Obtido em 18 de 7 de 2011, Program os Excellence Energy Science: <http://www.energyscience.ilstu.edu/areas/thermal.shtml>.

ELGHOO, A. *et al.* Enhancing the performance of a thermo-electric generator through multi-objective optimisation of heat pipes-heat sink under natural convection. **Energy Conversion and Management**, vol. 209, p. 112626, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112626>.

**ENERGY INSTITUTE**. Statistical review of world energy. Disponível em:  
<https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 12 nov. 2023.

ESARTE, J., G. Min, and D.M. Rowe, **Modelling heat exchangers for thermoelectric generators**. *Journal of Power Sources*, 2001. 93(1-2): p. 72-76.

FACHINI, L. G. V. *et. al.* **Heat recovery and power generation using thermoelectric generator** [Online First], IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.85122. Available from:  
<https://www.intechopen.com/onlinefirst/heat-recovery-and-power-generation-using-thermoelectric-generator>.

FAGHRI, A. **Heat pipe science and technology**. Washington, DC, USA: Taylor & Francis, 1995.

FAGHRI, A. **Heat pipes: review, opportunities and challenges**. *Frontiers in Heat Pipes*, v. 5/1, p. 1-48, 2014.

FARAJI, A. Y.; DATE, A.; SINGH, R. Base-load thermoelectric power generation using evacuated tube solar collector and water storage tank. **Energy Procedia**. Melbourne, p. 2112-2120. out. 2014.

FERNANDES, A. E. S. S. **Conversão de energia com células de peltier**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

FLEURIAL, J. Thermoelectric power generation materials: technology and application opportunities. **Journal Of The Minerals, Metals And Materials Society**,. New York, p. 79-85. jun. 2009.

GONÇALVES, L. **Microssistema termoelétrico baseado em teluretos de bismuto e antimónio**. 2008 Tese (Doutorado) Universidade do Minho, 2008.

GROLL, M. and ROSLER, S., Operation principles and performance of heat pipes and closed two-phase thermosyphons, **Journal of Non-equilibrium Thermodynamics**, 17, pp. 91-151.,1992.

HOLMAN, J.P. **Experimental methods for engineers**, 6.ed., Singapore, Mcgrall-Hill, 1994.

ISMAIL, B. I.; AHMED, W. Thermoelectric power generation using waste-heat Energy as an alternative green technology. **Recent Patents On Electrical Engineering**, London, v. 2, n. 1, p.27-39, maio 2009.

JAZIRI, N. *et al.* A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. **Energy Reports**, v. 6, pp. 264-287, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.011>.



KIM, Tae Young; NEGASH, Assmelash; CHO, Gyubaek. Experimental and numerical study of waste heat recovery characteristics of direct contact thermoelectric generator. **Energy Conversion And Management**. Daejeon, p. 273-280. mar. 2017.

LEE, H.S., **Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells**. 2010: John Wiley & Sons.

MACHADO, Pedro Leineker Ochoski. **Desenvolvimento de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico para geração de energia elétrica e aquecimento de água utilizando termossifões**. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2022.

MANTELLI, Márcia B.H. Notas de Aula: **Curso sobre termossifões e tubos de calor**. UFSC, Florianópolis, 2009.

MARKETS, Hydrogen energy storage. Global Forecast to 2024. **Research and Markets**, v. 22, 2019.

MONREAL, J. **Thermoelectrics: material advancements and market applications**. Tese (Mestrado) Massachusetts Institute of Technology. 2007

MOURA, J. A. de S. **Filmes nanométricos de fen e aln crescidos por sputtering e aplicações do efeito peltier**. 2010. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Cap. 6.

NADAF, N., A, P. Review on waste heat energy harvesting using teg: applications and enhancements. **8th International Conference on Smart Computing and Communications (ICSCC)**, Kochi, Kerala, India, pp. 334-339, 2021. doi: [10.1109/ICSCC51209.2021.9528196](https://doi.org/10.1109/ICSCC51209.2021.9528196).

NISHIDA, F. B. **Desenvolvimento de termossifões com microranhuradas fabricadas por eletroerosão a fio**. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.

NOLAS, G. S., GOLDSMID, H. J. J. Appl. **Phys.**, 85 1999 4066. DOI: 10.1063/1.370311.

OPERATING PARAMETERS. **MODULE TEG1-PB-12611-6.0**. Ontario: TEC TEG, 2014. 2 p. Disponível em: <https://thermoelectric-generator.com/>. Acesso em: 03 maio 2023.

PEDOTT, Alexandre. Notas de Aula: **Metrologia e ensaios**. UFRGS, Porto Alegre, 2012.

PETERSON, G. P. **an introduction to heat pipes: modeling, testing and application**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1994.

PETERSON, G.P. **Heat pipes**. In: ROHSENOW, W.M.; HARTNETT, J.P.; CHO, Y.I. **Handbook of Heat Transfer**. 3 ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1998. Chap. 12, p. 21.1-12.20.

PIEDADE, P. M. **Efeitos termoelétricos e suas aplicações. Aquisição e Processamento de Sinais 1997.** IST - Lisboa

REAY, D. A.; KEW, P. A.; McGLEN, R. J. **Heat pipes: theory, design and applications.** 6 ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014. 251p.

REMELI, M. F. *et al.* Investigation of counter-flow in a heat pipe-thermoelectric generator (hpteg). **Journal Of Electronic Materials**, [s.l.], v. 46, n. 5, p.3115-3123, 20 dez. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-5196-8>.

REMELI, M. F. **Simultaneous industrial waste heat recovery and power generation using heat pipe assisted thermoelectric generator.** 2016. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Aerospace Mechanical And Manufacturing Engineering, Rmit University, Melbourne, 2015.

REMELI, M. F. *et al.* Experimental investigation of combined heat recovery and power generation using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 111, p.147-157, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.032>.

REMELI, M. F.; VEROJPORN K.; SINGH B. Passive heat recovery system using combination of heat pipe and thermoelectric generator. **Energy Procedia. Bundoora**, p. 608-614. out. 2015.

REMELI, M. F.; KIATBODINA L.; SINGH B. Power generation from waste heat using heat pipe and thermoelectric generator. **Energy Procedia.** Abu Dhabi, p. 645-650. ago. 2015.

RIFFAT S. and Ma X., Thermoelectrics: a review of present and potential applications. **Applied thermal engineering**, 2003. 23(8): p. 913-935.

ROWE, D.M., Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source. **International Journal of Innovations in Energy Systems and Power**, 2006.

RUSSO, G. M.; KRAMBECK, L.; NISHIDA, F. B.; SANTOS, Paulo H.D.; ANTONINI ALVES, Thiago. Desempenho térmico de diferentes fluidos de trabalho em termossifões, **12º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, CIBIM XII, 2015.

SEEBECK, T. J. **Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperatur-differenz.** Abh. Akad. Wiss. Berlin 1820-21, 1822, 289-346.

SHABANY, Y. **Heat Transfer: Thermal management of electronics.** Boca Raton, FL USA: CRC Press, 2010.

SIEMENS SOLAR INDUSTRIES. **Solar module SM46.** Disponível em: [www.siemens.co.uk/sm46.html](http://www.siemens.co.uk/sm46.html). Acesso em: 22 de setembro de 2018.

SINGH, B. *et al.* Experimental analysis of thermoelectric heat exchanger for power generation from salinity gradient solar pond using low-grade heat. **Journal Of Electronic Materials**, [s.l.], v. 46, n. 5, p.2854-2859, 21 out. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-5009-0>.

SINGH, B. *et al.* Experimental investigation on effect of adhesives on thermoelectric generator performance. **Journal Of Electronic Materials**, [s.l.], v. 44, n. 6, p.1864-1869, 7 jan. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-014-3576-5>.

SINGH, B.; SAOUD, A.; REMELIA, M. F. Design and construction of a simple thermoelectric generator heat exchanger for power generation from salinity gradient solar pond. **Jurnal Teknologi**. Malaysia, p. 1-4. maio 2015.

SWART, J. W. Estruturas de dispositivos semicondutores. In: SWART, Jacobus W. **Oficina de Microfabricação: Projeto e Construção de CIs MOS**. Campinas: Unicamp, 2002. p. 1-60. Disponível em: <http://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap09.pdf>. Acesso em: 10 maio 2015.

UNEP. Thermal energy equipment: waste heat recovery. **Energy Efficiency**. 2006. Disponível em: [www.energyefficiencyasia.org](http://www.energyefficiencyasia.org). Acesso em: 01 jul. 2018.

VEROJPORN K.; SINGH B. Passive heat recovery system using combination of heat pipe and thermoelectric generator. **Energy Procedia**. Bundoora, p. 608-614. out. 2015.

YANG, X.; YAN, Y.Y.; MULLEN, D. Recent developments of lightweight, high performance heat pipes. **Applied Thermal Engineering**., v. 33-34, p3 1-14, 2012.

## **APÊNDICE A - Calibração dos termopares do tipo T**

O procedimento de calibração foi executado mediante o método comparativo, contrastando as medições dos termopares com as do termômetro de mercúrio, variando as temperaturas. Para tal, foi utilizado um termômetro químico de vidro *Incoterm*<sup>®</sup>, preenchido com mercúrio, cuja escala abrange de  $-10,0^{\circ}\text{C}$  a  $200,0^{\circ}\text{C}$ , com divisão de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Dada sua natureza analógica, a incerteza do termômetro equivale à metade de sua menor divisão, resultando em uma incerteza de  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ .

Para a calibração, tanto os termopares quanto o termômetro foram imersos em água com temperatura controlada, proporcionada por um banho ultratermostatizado da marca *Solab*<sup>®</sup> modelo SL-130. Os termopares do tipo T foram submersos na água à mesma altura da coluna de líquido até que o termômetro alcançasse uma temperatura estável por um minuto. Em seguida, foram coletadas 10 leituras de temperatura nos termopares utilizando um sistema de aquisição de dados *Agilent*<sup>®</sup> 34970A com um módulo de multiplexador *Agilent*<sup>®</sup> 34901A de 20 canais.

As leituras foram realizadas em 12 temperaturas distintas, variando de  $10,0^{\circ}\text{C}$  a  $96,0^{\circ}\text{C}$ , abrangendo uma parte dos valores obtidos no experimento. A média dessas leituras foi calculada para cada temperatura, seguida pela regressão dos dados de temperatura dos termopares em relação à temperatura do termômetro. O Gráfico 23 ilustra a relação resultante da regressão entre os dados coletados.



Fonte: Autoria própria (2023)

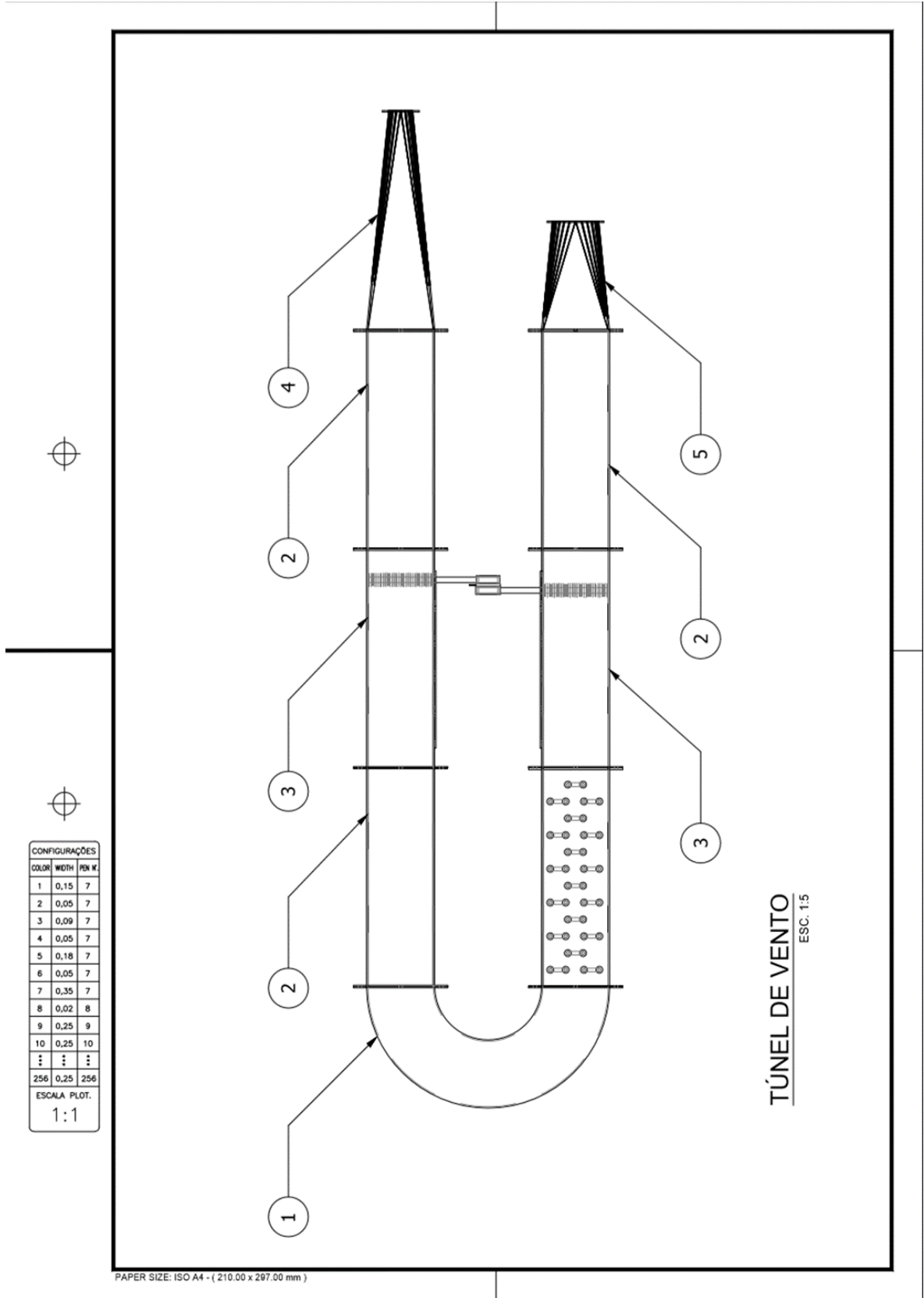
Foi possível obter a regressão linear ilustrada pela Equação (19) através dos dados do termopar e termômetro apresentaram uma tendência linear entre si, com um  $R^2 = 0,9996$ . A partir da equação da reta gerada pela regressão linear, foi possível validar o processo de calibração.

$$Y = 0,9896 - 0,4360X . \quad (19)$$

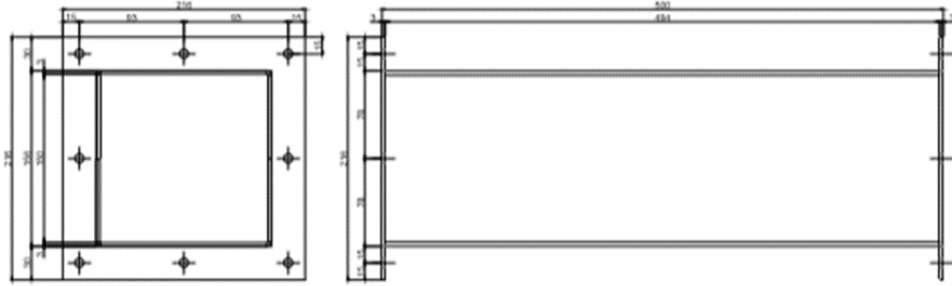
A validação da calibração envolveu a aplicação dos valores médios de leitura do termopar, associados a cada temperatura analisada, na Equação (19) que descreve a reta apresentada no Gráfico 23. Esses valores foram minuciosamente comparados com as leituras registradas pelo termômetro. Em virtude da utilização do método comparativo durante o processo de calibração, torna-se factível afirmar que a incerteza nas leituras do termopar pós-calibração foi equivalente à incerteza associada ao instrumento utilizado no processo.

Essa análise ressalta a importância crucial da calibração precisa de instrumentos de medição. Garantir a confiabilidade e a exatidão dos dados obtidos por esses instrumentos não apenas assegura a qualidade dos resultados experimentais, como também promove a integridade e a validade de todo o processo de medição. A calibração adequada não apenas minimiza as incertezas associadas às medições, mas também contribui para a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis, sendo, assim, um aspecto fundamental em experimentos científicos e práticas de medição.

**APÊNDICE B - Projeto mecânico do túnel de vento  
do tipo soprador de circuito aberto**



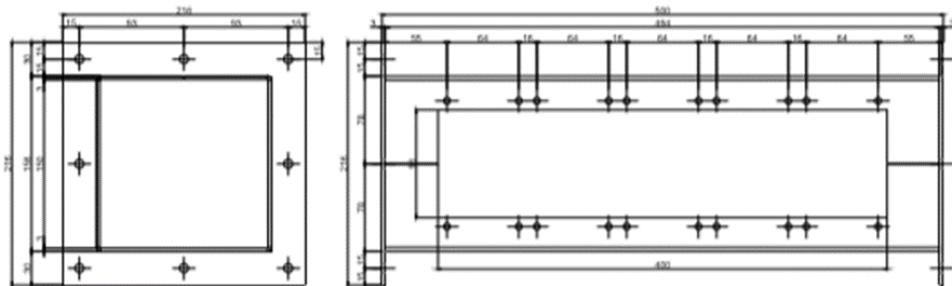




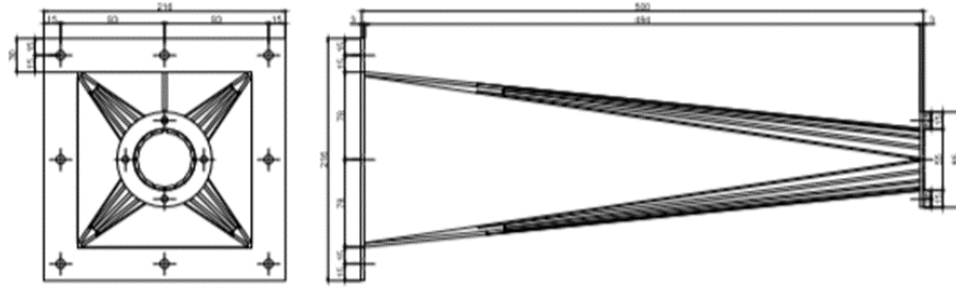
**PEÇA 2- DUTO FLANGEADO**  
ESC. 1:5



CONFIGURAÇÕES		
COLOR	WIDTH	PER #
1	0,15	7
2	0,05	7
3	0,09	7
4	0,05	7
5	0,18	7
6	0,05	7
7	0,35	7
8	0,02	8
9	0,25	9
10	0,25	10
11	0,25	11
256	0,25	256
ESCALA PLOT. 1:1		



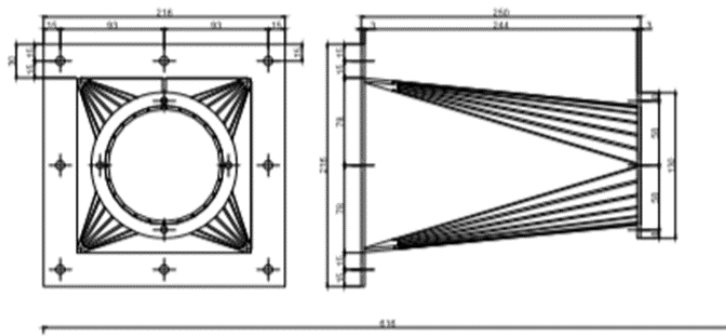
**PEÇA 3- DUTO FLANGEADO - SUPORTE ALETAS**  
ESC. 1:5



PEÇA 4 - REDUÇÃO 150 X 50 mm  
ESC. 1:5



CONFIGURAÇÕES		
COLOR	WEIGHT	PER #
1	0,15	7
2	0,05	7
3	0,09	7
4	0,05	7
5	0,18	7
6	0,05	7
7	0,35	7
8	0,02	8
9	0,25	9
10	0,25	10
11	0,25	10
12	0,25	10
256	0,25	256
ESCALA PLOT.		
1:1		



PEÇA 5 - REDUÇÃO 150 X 100 mm  
ESC. 1:5

**APÊNDICE C - Rotina computacional para comutação de resistências  
e obtenção da potência gerada pelos geradores termoelétricos**

```

//N°:010-ARD-ADD-UTF
//CLIENTE N°: N/A
//CLIENTE:UTFPR-PG
//NOME:SISTEMA DE RELES PARA CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERISTICA DO
TERMOGERADOR
//DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA:
//1-
//2-
//3-
//OBSERVAÇÕES
//
//INDICE DE REVISÕES
//Revisão:04
//Finalidade das Emissões:PI
//Execução: L. VITORIO
//Verificação: R. SZMOSKI
//Aprovação: R. SZMOSKI

//PRE-TRATAMENTO
int delayTime = 7000; //INTERVALO DE LEITURAS
int leituras = 10; // NÚMERO DE LEITURAS PARA SUAVIZAR OS RESULTADOS

//MODULO DE RELES
int Decimal = 0;
int Quociente = 0;
int Resto = 0;
int x = 0;
void ConverteParaBinarios();
int Vetor[11]; //CRIAR VETOR VAZIO COM 11 ESPAÇOS
float R[11] = {1.3, 1.4, 1.8, 2.0, 2.47, 3.5, 5.8, 11.5, 19.7, 34.7,
48.37}; //RESISTENCIAS UTILIZADAS PARA LEVANTAMENTO DA CURVA CARACTERISTICA
DO TEERMOGERADOR
int Portas[11] = {12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2}; //DECLARANDO PORTAS
DIGITAIS
int Vbi[24] = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 31,
32, 63, 64, 128, 256, 512, 1024};
double Req = 0;
int j;
int k;

//TENSAO
int volt_st; //VARIÁVEL PARA LEITURA DA PORTA ANALÓGICA DO SENSOR DE
TENSÃO
float volts; //ARMAZENAR O CÁLCULO PARA OBTENÇÃO DE TENSÃO
float average_volt = 0; //MÉDIA OBTIDA DO NÚMERO DE LEITURAS

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin (9600);

  Serial.println("Posição      Resistência(ohms)    Tensão(mV)    Corrente(mA)
Potência (mW)");

  for (j = 0; j < 11; j++) {
    pinMode(Portas[j], OUTPUT);
    digitalWrite(Portas[j], HIGH);
  }
}

```

```

}
void loop() {

  for (j = 0; j <= 23; j++) {

    if (j >= 0) {

      Decimal = Vbi[j];
      ConverteParaBinarios();
    }
    else {
      for (int k = 0; k < 11; k++)
        Vetor[k] = 0;
    }

    double Req = 0;

    for (int k = 0; k < 11; k++) {
      if (Vetor[k] > 0)
        Req += 1.0 / (Vetor[k] * R[k]);
      digitalWrite(Portas[k], (1 - Vetor[k]) * 255);
    }

    //TEMPO PARA ESTABILIZAR E REALIZAR LEITURA
    delay(7000);

    Req = 1 / Req;
    //TRATAMENTO SENSOR DE TENSÃO
    volts = 0.0;
    for (int i = 1; i <= leituras; i++)
      volts += analogRead(A1); //LEITURA DA PORTA ANALOGICA AO
    average_volt = volts / leituras;
    //average_volt = ((average_volt * 0.00489) * 5); //FATOR DE CÁLCULO
    average_volt = ((average_volt * 5.0) / 1024) * 1000;

    Serial.print(j);
    Serial.print("\t");
    Serial.print("\t");
    Serial.print(Req);
    Serial.print("\t");
    Serial.print("\t");
    Serial.print(average_volt);
    Serial.print("\t");
    Serial.print("\t");
    Serial.print(average_volt / Req);
    Serial.print("\t");
    Serial.print("\t");
    Serial.println(((average_volt * average_volt) / (Req)) / 1000);

    delay(delayTime);

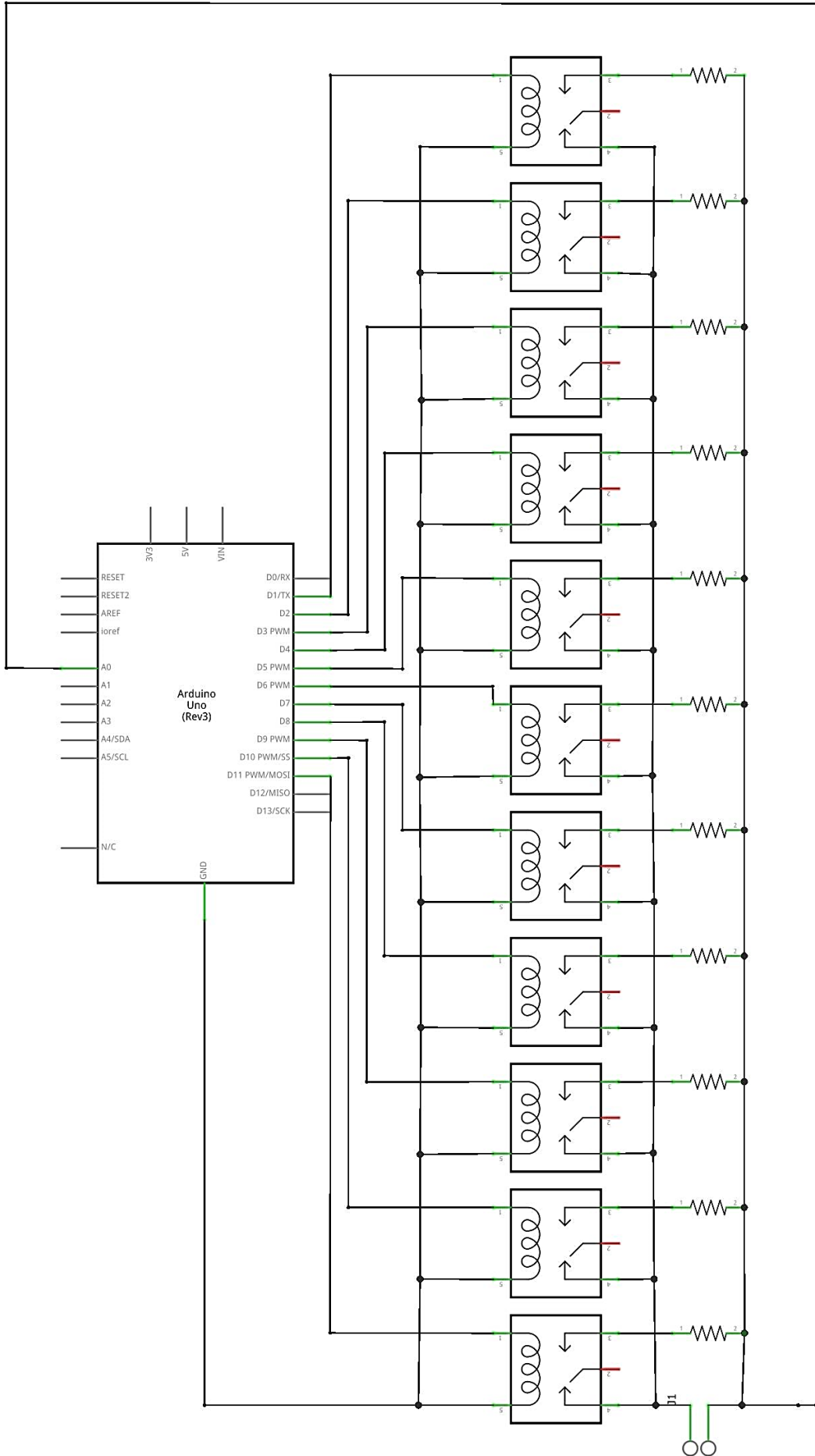
    //DESLIGAR PORTAS
    for (int k = 0; k < 11; k++)
      digitalWrite(Portas[k], HIGH);
    delay(800);
  }
}

//MANIPULACAO
void ConverteParaBinarios()
{

```

```
Quociente = Decimal;
int i = 1;
if (Quociente > 1)
{
    while (Quociente > 1)
    {
        Vetor[i - 1] = Quociente % 2;
        Quociente = Quociente / 2;
        i++;
    }
    Vetor[i - 1] = Quociente;
}
else
{
    Vetor[i - 1] = Quociente % 2;
    Quociente = Quociente / 2;
    i++;
    Vetor[i - 1] = Quociente;
}
}
```

**APÊNDICE D - Esquema eletrônico para o sistema de aquisição  
de curva característica do gerador termoelétrico**





**APÊNDICE E - Cálculos para determinação da vazão mássica de ar  
na entrada do túnel de vento do tipo soprador de circuito aberto**

A velocidade do escoamento interno de ar foi determinada utilizando a Norma NBR-ISO 5167-1 (ABNT, 1994), os cálculos são apresentados para a obtenção da vazão mássica de ar,  $\dot{m}_{ar}$ , que pode ser expressa por:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{e C_d A_{or} \sqrt{2 \rho_g \Delta P_{or}}}{\sqrt{1 - \beta^4}}, \quad (20)$$

sendo que,  $e$  é o fator de compressibilidade que é fornecido pela Equação (20),  $C_d$  é o coeficiente de descarga,  $A_{or}$  é a área do orifício da placa [m<sup>2</sup>],  $\rho_g$  é a massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>],  $\Delta P_{or}$  é a queda de pressão da placa de orifício [Pa] e  $\beta$  é a razão do diâmetro do orifício da placa pelo diâmetro da tubulação que é dada pela Equação (21).

O fator de compressibilidade,  $e$ , é expresso por:

$$e = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta P_{or}}{K P_1} \quad (21)$$

sendo que,  $P_1$  é a pressão absoluta a montante da placa de orifício [Pa] e  $K$  é o coeficiente de perda de carga fornecido pela Equação (23).

A razão do diâmetro do orifício da placa pelo diâmetro da tubulação deve estar na faixa de  $0,15 \leq \beta \leq 0,70$  e  $25\text{mm} \leq D \leq 50\text{mm}$ , e pode ser expressa pela Equação (22)

$$\beta = \frac{d_{or}}{D}, \quad (22)$$

sendo que,  $d_{or}$  é o diâmetro do orifício da placa de orifício [mm] e  $D$  é o diâmetro da tubulação [mm].

O coeficiente de perda de carga,  $K$ , é expresso por:

$$K = \frac{2w}{\rho_g v_{ar,t}^2} \quad (23)$$

sendo que,  $v_{ar,t}$  é a velocidade do ar na tubulação fornecida na Equação (24) e  $w$  é o coeficiente de perda de carga estática fornecida na Equação (25).

$$v_{ar,t} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_g \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)} \quad (24)$$

$$w = \frac{\sqrt{1-\beta^4} - C_d \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4} + C_d \beta^2} \Delta P_{or} \quad (25)$$

sendo que,  $C_d$  é expressa pela Equação (26):

$$C_d = \left[ 0,5991 + \frac{0,0044}{D} + \left( 0,3155 + \frac{0,0175}{D} \right) \left( \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4 + 2 \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^{16} \right) \right] \sqrt{1 - \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4} + \left[ \frac{0,52}{D} - 0,192 + \left( 16,48 - \frac{1,16}{D} \right) \left( \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4 + 4 \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^{16} \right) \right] \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{d_{or}}{D} \right)^4}{Re_D}} \quad (26)$$

sendo que,  $Re_D$  é o número de *Reynolds* da tubulação com faixa de  $Re_D > 1000$ .

A velocidade superficial do ar,  $u_0$ , em [m/s], pode ser expressa pela Equação (27)

$$u_0 = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_g A_{st}}, \quad (27)$$

sendo que,  $A_{st}$  é a área da seção transversal do duto que pode ser expressa pela Equação (28)

$$A_{st} = \frac{\pi D_{int}^2}{4}, \quad (28)$$

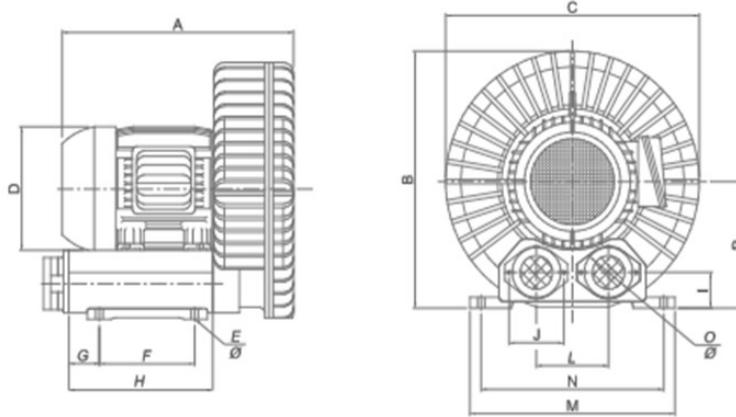
sendo que,  $D_{int}$  é o diâmetro hidráulico interno do duto [m<sup>2</sup>].

**ANEXO A - Catálogo *Aeromack*<sup>®</sup> CRE-04**



\* Opcionais: Bocal de solda / Figura construtiva

4



# Compressores Radiais

## Radial Compressors | Compresores Radiais



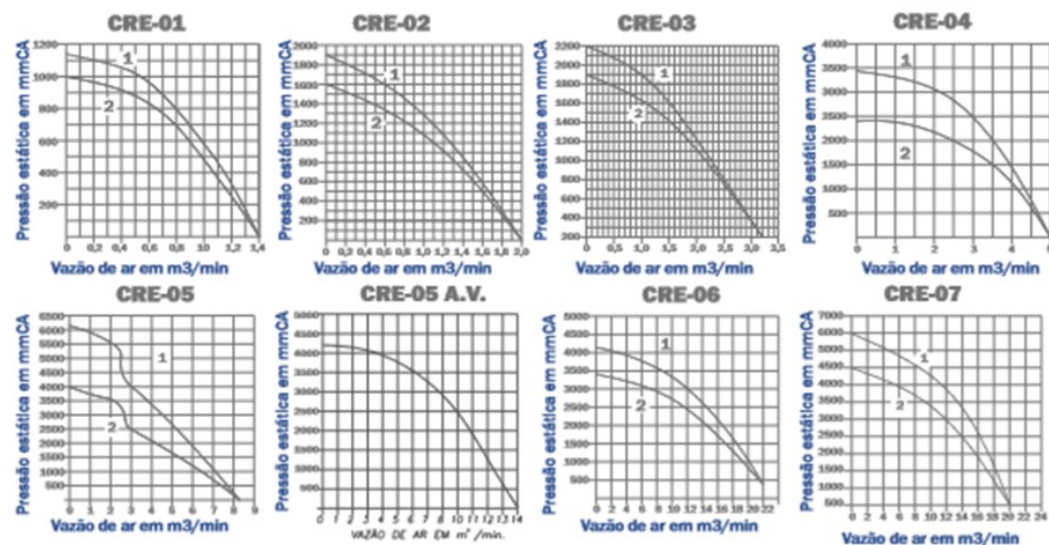
Dimensões dos compressores Radiais ELAM (mm) | ELAM Compressors radial dimensions (mm) | Dimensiones de los compressores radiales ELAM (mm)

Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P
CRE - 01	274,5	260	252,5	125	9/10	80	24	128	36	65,5	88,5	240	215	1 9/16"	131
CRE - 02	282	295	290	142	10	80	26	123	42	64	92	247	222	1 1/4"	147
CRE - 03	330	350	342	160	13	115	13,5	142	53	85	120	300	261	2"	179
CRE - 04	370	405	395	178	15	140	19	174	54	85,5	123	325	289	2"	207
CRE - 05	443	465	485	221	15	166	67	277	65	102	140	392	350	2 2/2"	230
CRE - 05 AV	520	53	515	210	15	165	65	208	90	-	170	383	348	3"	300
CRE - 06	530	690	570	260	M8	446,5	37	520	165	-	250	550	476	8"ext.	688
CRE - 07	560	586	579	260	15	219	72	490	84,5	130	203	464	409	3 1/2"	298

Dados técnicos dos compressores | Compressors technical data | Datos técnicos de los compressores

Modelo	Vazão m <sup>3</sup> /min.	Pressão m.m.c.a	Potência cv	Voltagem	Nível Ruído	Peso kg
CRE - 01	1,4	1200	0,50	220/380	61-dBA	12
CRE - 02	2,0	1800	0,75	220/380	66-dBA	17
CRE - 03	3,2	2300	2,00	220/380	72-dBA	30
CRE - 04	4,2	2900	4,00	220/380	77-dBA	41
CRE - 05	8,2	5880	7,5	220/380	84-dBA	72
CRE - 06	22	4100	15	220/380	85-dBA	72
CRE - 07	20	6000	15	220/380/440	85-dBA	62

Curvas de desempenho | Performance curves | Curvas de desempeño

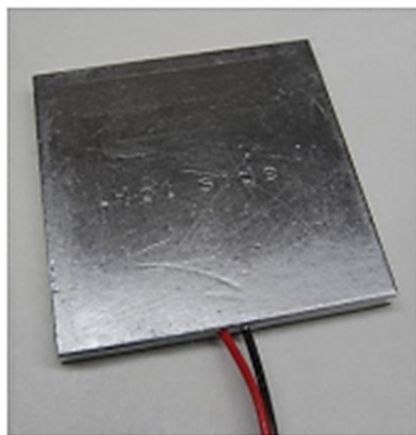


- \* Em 3.500 RPM
- \* Curvas - 1 Descarga
- \* Curvas - 2 Descarga
- \* Ar standart com densidade = 1,205 Kg/m

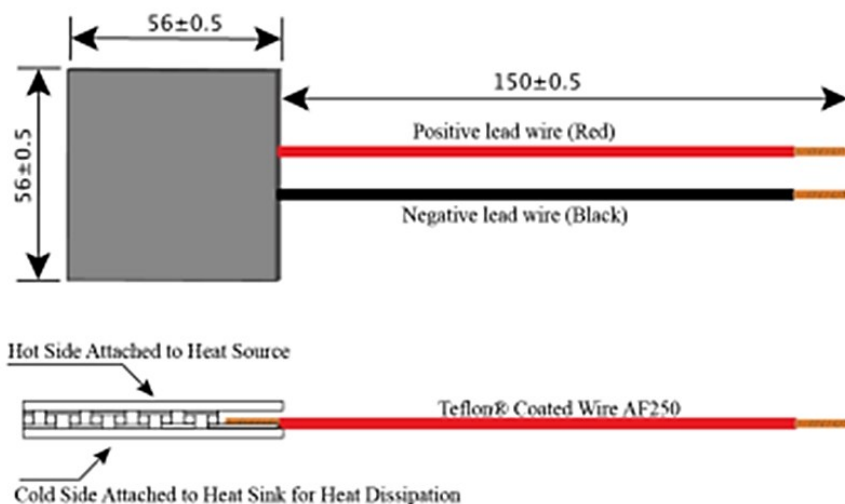
**ANEXO B - Ficha técnica do gerador termoelétrico TEG1-PB-12611-6.0**


**CARBON REDUCING TECHNOLOGY**
**MODULE TEG1-PB-12611-6.0**
**OPERATING PARAMETERS:**

Seebeck Effect thermoelectric power modules are design with high temperature bonding materials that allow them to withstand temperatures of up to 360°C (680°F). As long as the module is placed into a system, whereby the hot side is at a higher temperature than the cold side, DC power will be produced. A unique new class of module is now available. Incorporating 2 optimized semi-conductors of N-type A material & P-type A material to form a **hybrid module** of superior performance & temperature stability. The TEG1-PB class of module is able to operate continuously in higher temperatures than traditional BiTe material only. The ceramic surfaces are equipped with graphite sheets, which displace the need for thermal grease. These novel modules work best in the 220 to 360C Temperature range and offer superior performance over 260C hot side, compared to standard BiTe modules.


**Module Specifications**

Hot Side Temperature (°C)	350
Cold Side Temperature (°C)	30
Open Circuit Voltage (V)	9.2
Matched Load Resistance (ohms)	0.97
Matched Load Output Voltage (V)	4.6
Matched Load Output Current (A)	4.7
Matched Load Output Power (W)	21.7
Heat Flow Across the Module (W)	≈310
Heat Flow Density (W cm <sup>-2</sup> )	≈9.88
AC Resistance (ohms) Measured under 27 °C @ 1000 Hz	0.42~0.52

**Geometric Characteristics (Dimensions In Millimeters)**


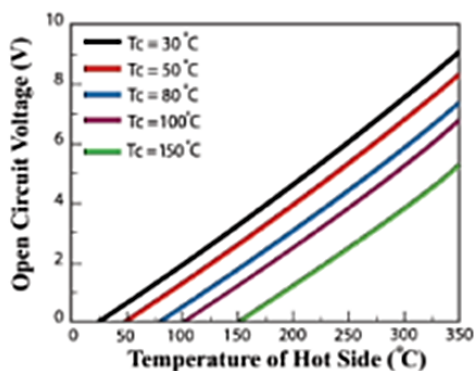




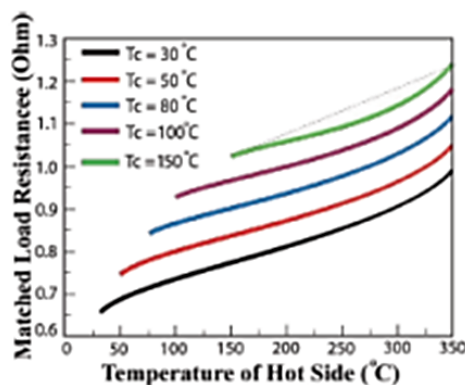
CARBON REDUCING TECHNOLOGY

MODULE TEG1-PB-12611-6.0

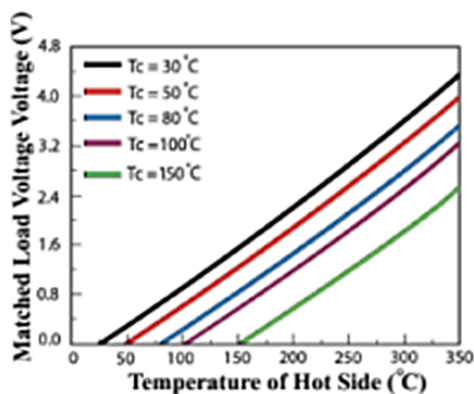
PERFORMANCE CURVES:



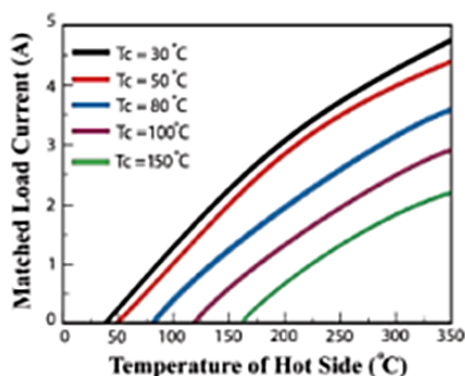
This chart shows open circuit voltage  $V_S$   $T_h$  under various  $T_c$ .



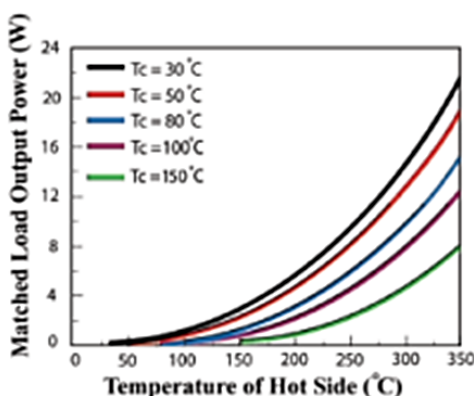
This graph shows open circuit voltage  $V_S$   $T_h$  under various  $T_c$ .



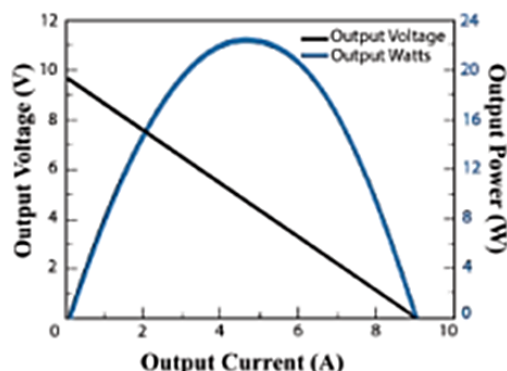
This chart shows the matched load voltage  $V_S$   $T_h$  under various  $T_c$ .



This chart shows the matched load voltage  $V_S$   $T_h$  under various  $T_c$ .



This chart shows the matched load output power  $V_S$   $T_h$  under various  $T_c$ .



This chart shows output voltage and output power where  $V_S$  is output current under  $T_h = 300^\circ\text{C}$  and  $T_c = 30^\circ\text{C}$ .