

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Leticia Borges Silverio**

**ANÁLISE DE UM CONDICIONADOR DE AR  
AUTOMOTIVO UTILIZANDO O EFEITO  
TERMOELÉTRICO**

**Taubaté – SP**

**2012**

**Leticia Borges Silverio**

**ANÁLISE DE UM CONDICIONADOR DE AR  
AUTOMOTIVO UTILIZANDO O EFEITO  
TERMOELÉTRICO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico (Energia)

Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

**Taubaté – SP**

**2012**

**LETICIA BORGES SILVERIO**

**ANÁLISE DE UM CONDICIONADOR DE AR AUTOMOTIVO UTILIZANDO O  
EFEITO TERMOELÉTRICO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico (Energia)

Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

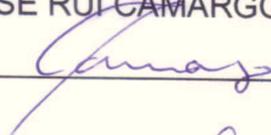
Data: 15/12/2012

Resultado: APROVADO

**BANCA EXAMINADORA**

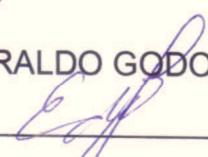
PROF. DR. JOSÉ RUI CAMARGO

Universidade de Taubaté

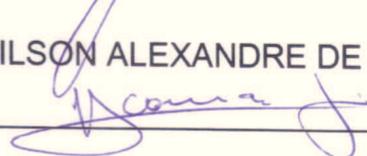
Assinatura 

PROF. DR. EDERALDO GODOY JUNIOR

Universidade de Taubaté

Assinatura 

PROF. DR. EDILSON ALEXANDRE DE CAMARGO DCTA

Assinatura 

*DEDICO ESTE TRABALHO*

A meu esposo Carlos, meu companheiro em todos os momentos.

A meus pais e irmã pelo carinho e apoio.

E aos amigos que me ajudaram neste desafio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela bênção da vida.

Ao Professor Dr. José Rui Camargo pela orientação na condução do trabalho, pelo incentivo, com seus conhecimentos e ajuda.

Ao corpo docente do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté por transmitir conhecimentos.

Ao funcionário Flavinho e todos os estagiários, que auxiliaram na execução dos ensaios.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de viabilidade técnica da utilização de módulos termoelétricos para condicionamento de ar automotivo, com ênfase ao sistema de resfriamento. O sistema termoelétrico de refrigeração baseia-se no efeito descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834, onde uma corrente elétrica flui na junção de dois materiais semicondutores de propriedades diferentes fazendo com que haja um gradiente de temperatura na junção dos materiais. Os módulos termoelétricos são fabricados por materiais semicondutores selados entre duas placas e, conforme o sentido que a corrente flui, uma superfície da placa torna-se aquecida e a outra resfriada. A refrigeração proveniente dos fenômenos termoelétricos surgiu como uma alternativa aos meios convencionais de refrigeração, pois não gera impactos ambientais, não produz barulho, não possui partes móveis, podendo ser montado em variadas posições de acordo com a necessidade, além de ocupar um volume pequeno em comparação com os outros sistemas. Os efeitos termoelétricos e suas aplicações são apresentados neste estudo, assim como o modelo matemático do sistema de refrigeração, que permite determinar o desempenho do sistema. Dissipadores de calor comercialmente disponíveis são analisados para a determinação da melhor troca térmica para o sistema e protótipos são montados para a obtenção de resultados experimentais de um refrigerador, a fim de verificar sua viabilidade e funcionalidade.

**Palavras-chave:** Efeito termoelétrico, Peltier, Condicionador de Ar

## **ABSTRACT**

This paper aims to present a technical feasibility study of the use of thermoelectric modules for automotive air conditioning, with emphasis on the cooling system. The thermoelectric cooling system is based on the effect discovered by Jean Charles Athanase Peltier in 1834, where an electric current flows at the junction of two semiconductor materials of different properties so that there is a temperature gradient at the junction of the materials. The thermoelectric modules are manufactured by semiconductor material sealed between two sheets and, as the current flows, a plate surface becomes heated and the other cooled. Thermoelectric cooling from phenomena like Peltier effect has emerged as an alternative to conventional cooling systems, it does not generate environmental impact, do not produce noise, has no moving parts, the system can be mounted in various positions according to the need, and occupies a small volume in comparison with other systems. Thermoelectric effects and their applications are presented in this study, as well as the mathematical modeling of the cooling system, which determines system performance. Heat sinks commercially available are analyzed for determining the best heat transfer to the system and prototypes are assembled to obtain the experimental results for a refrigerator in order to verify its feasibility and functionality.

**Keywords:** Thermoelectric Effect, Peltier, Air Conditioner

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	–	Efeito Seebeck	22
Figura 2.2	–	Efeito Peltier	23
Figura 2.3	–	Efeitos Peltier em semicondutores	25
Figura 2.4	–	Arranjo do módulo termoelétrico	26
Figura 2.5	–	Exemplos de módulos termoelétricos	26
Figura 2.6	–	Módulo termoelétrico	28
Figura 2.7	–	Diversas geometrias de dissipadores de calor	30
Figura 3.1	–	Esquema do módulo termoelétrico utilizado para refrigeração	35
Figura 3.2	–	Curvas de COP versus $dT$ , analisadas de acordo com variações de $Z$	38
Figura 3.3	–	Desempenho de um refrigerador termoelétrico em função de $T$	41
Figura 4.1	–	Representação esquemática da conexão módulo-dissipador	42
Figura 4.2	–	Resultados para o dissipador nº 0	44
Figura 4.3	–	Resultados para o dissipador nº 1	45
Figura 4.4	–	Resultados para o dissipador nº 2	46
Figura 4.5	–	Resultados para o dissipador nº 3	47
Figura 4.6	–	Resultados para o dissipador nº 1H	48
Figura 4.7	–	Resultados para o dissipador nº 2H	49
Figura 4.8	–	Resultados para o dissipador nº 3H	50
Figura 4.9	–	Resultados para o dissipador nº 4H	51
Figura 4.10	–	Resultados para o dissipador nº 5H	52
Figura 4.11	–	Gráfico Tempo x $\Delta T$ para todos os dissipadores de calor	53
Figura 4.12	–	Bancada experimental – Visão geral	55
Figura 4.13	–	Bancada experimental – Módulos e dissipadores	55
Figura 4.14	–	Bancada experimental – Vista superior dos módulos e dissipadores	56
Figura 4.15	–	Esquema da bancada experimental com quatro módulos	56
Figura 5.1	–	COP em função da corrente elétrica – Um módulo	59
Figura 5.2	–	COP em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Um módulo	59
Figura 5.3	–	Potência em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Um módulo	59
Figura 5.4	–	COP em função da corrente elétrica – Dois módulos	60
Figura 5.5	–	COP em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Dois módulos	60
Figura 5.6	–	Potência em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Dois módulos	60
Figura 5.7	–	COP em função da corrente elétrica – Três módulos	61
Figura 5.8	–	COP em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Três módulos	61

Figura 5.9	–	Potência em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Três módulos	61
Figura 5.10	–	COP em função da corrente elétrica – Quatro módulos	62
Figura 5.11	–	COP em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Quatro módulos	62
Figura 5.12	–	Potência em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Quatro módulos	62
Figura 5.13	–	COP em função da corrente elétrica – Média	63
Figura 5.14	–	COP em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Média	64
Figura 5.15	–	Potência em função de $\Delta T$ da placa termoelétrica – Média	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	–	Especificações de módulo termoelétrico fornecidas por fabricante	27
Tabela 2.2	–	Propriedades químicas, físicas e termoelétricas do BiTe tipo N	28
Tabela 2.3	–	Aplicações de módulos termoelétricos para refrigeração	32
Tabela 4.1	–	Características geométricas dos dissipadores de calor utilizados	43
Tabela 4.2	–	Especificações do módulo TE Technology 0,04 x 0,04	54

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	– Área da secção transversal	$[m^2]$
$C_p$	– Calor Específico	$[J/kg.K]$
$I$	– Intensidade de corrente elétrica	$[A]$
$k$	– Condutividade térmica	$[W/°C.m]$
$K$	– Condutância térmica	$[W/°C]$
$\dot{m}$	– Vazão mássica	$[kg/s]$
$P$	– Potência elétrica	$[W]$
$Q_f$	– Taxa de bombeamento de calor	$[W]$
$Q_j$	– Calor de Joule liberado de cada fonte térmica por unidade de tempo	$[W/m^3]$
$Q_P$	– Taxa de calor de Peltier por unidade de área da junção	$[W]$
$Q_1$	– Calor absorvido na junção quente	$[W]$
$Q_0$	– Calor dissipado na junção fria	$[W]$
$Q_T$	– Calor de Thomson	$[W]$
$R$	– Resistência elétrica total	$[\Omega]$
$R_c$	– Resistência de contato na junção quente	$[\Omega]$
$T$	– Temperatura	$[°C, K]$
$T_1$	– Temperatura na junção quente	$[°C, K]$
$T_0$	– Temperatura na junção fria	$[°C, K]$
$T_i$	– Temperatura de ar de entrada	$[°C, K]$
$T_o$	– Temperatura de ar de saída	$[°C, K]$
$\bar{T}$	– Temperatura média da junção	$[°C]$
$T_f$	– Temperatura do lado frio do módulo termoelétrico	$[°C, K]$
$T_q$	– Temperatura do lado quente do módulo termoelétrico	$[°C, K]$
$u$	– Sinal de controle	
$V$	– Tensão elétrica	$[V]$
$x, l$	– Comprimento dos elementos semicondutores	$[m]$
$W$	– Potência gerada	$[W]$

Z – Figura de Mérito

[°C<sup>-1</sup>]

COP – Coeficiente de desempenho

Adimens.

## SIMBOLOGIA GREGA

$\alpha$	– Coeficiente de Seebeck	[V/°C]
$\gamma$	– Razão A/L	[m]
$\rho$	– Resistividade elétrica	[ $\Omega$ .m]
$\rho'$	– Resistividade elétrica aparente	[ $\Omega$ .m]
$\tau$	– Coeficiente de Thomson	[V/°C]
$\phi$	– Coeficiente de desempenho	Adimens.
$\sigma$	– Condutividade Elétrica	[1/ $\Omega$ .m]
$\Delta T$	– Diferença de temperatura entre os lados quente / frio do módulo termoelétrico	[°C]
$\pi$	– Coeficiente de Peltier da ligação térmica	[V]

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2. OBJETIVOS .....	16
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1. PESQUISAS BIBLIOGRÁFICAS .....	18
2.2. BREVE HISTÓRICO DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS .....	22
2.3. O EFEITO PELTIER.....	24
2.4. O MÓDULO TERMOELÉTRICO.....	25
2.1.1. <i>Parâmetros do Módulo Termoelétrico.....</i>	<i>26</i>
2.1.2. <i>Propriedades do Telureto de Bismuto (<math>Bi_2Te_3</math>) .....</i>	<i>27</i>
2.1.3. <i>Dissipador de calor.....</i>	<i>29</i>
2.1.4. <i>Controle de temperatura.....</i>	<i>30</i>
2.1.5. <i>Aplicações em Refrigeração e Condicionamento de Ar.....</i>	<i>32</i>
2.1.6. <i>Vantagens e Desvantagens da Utilização de Módulos Termoelétricos.....</i>	<i>33</i>
<b>CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO PARA REFRIGERAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE AR .....</b>	<b>34</b>
3.1. COEFICIENTE DE DESEMPENHO.....	37
3.2. FIGURA DE MÉRITO .....	37
3.3. MÁXIMA TAXA DE BOMBEAMENTO DE CALOR .....	39
3.4. BALANÇO ENERGÉTICO DE RESFRIAMENTO .....	40
3.5. DESEMPENHO DO REFRIG. TERMOELÉTRICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	40
<b>CAPÍTULO 4 – MODELO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>42</b>
4.1. ESCOLHA DO DISSIPADOR DE CALOR .....	42
4.2. MODELO EXPERIMENTAL DO CONDICIONADOR DE AR TERMOELÉTRICO .....	53
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>58</b>
5.1. RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS .....	58
5.2. DISCUSSÕES .....	63
<b>CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>65</b>
6.1. CONCLUSÃO.....	65
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	66
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A – Tabelas de Medições de dados do Experimento .....</b>	<b>70</b>

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Os processos de refrigeração e condicionamento de ar são usados em grande escala diariamente em diversas áreas, como por exemplo: militar, industrial, aeroespacial, médica, entre outras.

Devido a preocupações ambientais com o aquecimento global, destruição da camada de ozônio e baixa eficiência energética, torna-se necessário investigar tecnologias alternativas de refrigeração que não utilizem gases refrigerantes e ciclos de compressão. Neste contexto, a refrigeração proveniente dos fenômenos termoelétricos, por meio do efeito Peltier, surgiu como uma alternativa. Não gera impactos ambientais, não produz barulho, e ainda ocupa um volume pequeno em comparação com os outros métodos de refrigeração.

O sistema termoelétrico é baseado no fenômeno descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834, segundo o qual, quando uma corrente elétrica e contínua flui na junção de dois materiais semicondutores de propriedades diferentes, há um gradiente de temperatura na junção dos materiais.

Um módulo termoelétrico típico usa duas pastilhas cerâmicas finas, sendo fabricado com materiais semicondutores dopados dos tipos n e p. O material tipo n tem excesso de elétrons livres e o material tipo p tem excesso de lacunas em seu interior. Pares de materiais tipo p e tipo n (junção p-n) são utilizados em módulos termoelétricos, sendo que os pares estão ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Um mesmo módulo pode conter até centenas de junções de semicondutores p e n.

Os efeitos termoelétricos podem ser utilizados para a produção de energia elétrica e para refrigeração. A principal dificuldade tem sido o desenvolvimento de materiais apropriados e tecnologia para conseguir melhor coeficiente de desempenho. Pesquisadores têm estudado sistemas termoelétricos utilizando

módulos termoelétricos e dissipadores de calor disponíveis comercialmente com objetivo de conseguir um rendimento melhor.

No ambiente automotivo, a utilização de sistemas termoelétricos pode proporcionar a redução de emissões e impacto ambiental, devido à economia na utilização de combustíveis para funções que podem ser desempenhadas por módulos termoelétricos. Prevê-se também maior desenvolvimento do mercado de eletrônica automotiva e melhoria contínua do conforto dos passageiros, devido ao fato de que sistemas termoelétricos poderiam ser utilizados, por exemplo, para o aquecimento de assentos dos veículos em países frios e em mini-refrigeradores para bebidas, entre outras aplicações.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é desenvolver e analisar um condicionador de ar termoelétrico automotivo, por meio da utilização de módulos termoelétricos comercialmente disponíveis.

Para tanto, o presente trabalho apresenta a realização de um estudo metodológico da utilização do efeito Peltier em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar e o desenvolvimento de um protótipo de um condicionador de ar automotivo, que utiliza como fonte de energia a bateria do próprio veículo. É desenvolvida também uma análise de diversos dissipadores de calor, para escolha do dissipador que melhora o desempenho do protótipo. Espera-se analisar teoricamente o modelo proposto e obter dados práticos por meio da montagem de modelos experimentais, para validar as estimativas teóricas.

É também objetivo do trabalho aprimorar conhecimentos sobre a utilização dos efeitos termoelétricos para refrigeração e condicionamento de ar, assim como fornecer informações úteis para trabalhos futuros.

## **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está organizado em seis capítulos. No segundo capítulo são apresentados o estado da arte das pesquisas utilizando efeitos termoelétricos, os

conceitos teóricos sobre os efeitos Peltier e Seebeck e a utilização de módulos termoelétricos.

O terceiro capítulo apresenta o modelo matemático para condicionamento de ar e refrigeração utilizando o Efeito Peltier.

No capítulo 4, são descritos os ensaios experimentais, incluindo materiais e métodos utilizados para o experimento. No capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos experimentalmente e comparados com o modelo matemático.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. PESQUISAS BIBLIOGRÁFICAS

Heikes & Ure Junior (1961) fizeram um estudo referente aos fenômenos termoelétricos e apresentaram as equações que permitem o estudo e análise de um sistema de refrigeração termoelétrico.

Sofrata (1996) relatou que o uso de um ventilador duplo em uma posição adequada pode aumentar significativamente a eficiência do trocador de calor em relação ao uso do ventilador único em um refrigerador termoelétrico. Uma longa chaminé para troca de calor por convecção natural pode também melhorar o desempenho do refrigerador sem a necessidade de usar ventiladores que consomem energia elétrica.

Riffat *et al* (2001) relataram um sistema de refrigeração termoelétrica que utiliza um material de mudança de fase como o lado frio de um trocador de calor para resfriamento e melhoria do Coeficiente de Desempenho. O sistema de refrigeração foi primeiramente fabricado e testado usando um dissipador de calor convencional no lado frio. A fim de melhorar o desempenho e a capacidade, o sistema foi reconstruído e testado usando um material encapsulado de mudança de fase como dissipador do lado frio.

Cosnier *et al* (2007) descreveram um estudo experimental e um modelo numérico de um sistema de aquecimento ou refrigeração de um fluxo de ar por meio de módulos termoelétricos, a fim de verificar a possibilidade de utilização dos dispositivos termoelétricos para refrigeração de edifícios. O dispositivo consistiu de quatro módulos termoelétricos com um lado em contato com um fluxo de ar circulante e o outro lado em contato com trocadores de calor a água. Para a refrigeração, nos resultados experimentais atingiu-se COP acima de 1,5 e foi necessária a aplicação de uma intensidade máxima de corrente elétrica na faixa de

4 a 5 A, mantendo a diferença de temperatura entre lados quente e frio dos módulos termoelétricos tão pequena quanto possível, de aproximadamente 5 a 10°C.

Vián & Astrain (2007) estudaram um trocador de calor para o lado frio de módulos termoelétricos para refrigeração, com base no princípio de um termossifão com mudança de fase e ação capilar. O dispositivo, colocado com uma de suas faces em contato com o lado frio do módulo termoelétrico e outra face em contato com a sala refrigerada, aumentou a superfície de troca de calor, tendo como vantagem também a mudança de fase e a ação capilar através de um meio poroso que permitiu aumentar a superfície de evaporação. Cálculos analíticos foram realizados e foram feitos testes experimentais com protótipos em que a geometria, o meio poroso e a carga de fluido de trabalho foram variadas. O dispositivo melhorou a resistência térmica entre o lado frio de um módulo Peltier e o ambiente refrigerado em 37%.

Souza (2007) apresentou proposições geométricas para o dissipador de calor, visando otimizar o seu efeito. Utilizou uma modelagem matemática de um sistema termoelétrico e dissipador de calor. A simulação realizada para o sistema em questão mostrou que dentre as geometrias analisadas, a geometria pino fornece uma área superficial maior e conseqüentemente uma maior dissipação térmica. Esta geometria, dentre os casos analisados se mostrou superior, em relação ao desempenho energético, pois proporcionou maiores valores de eficiência, observadas por meio do Coeficiente de Desempenho, e menores valores de potência exigida pelo sistema de alimentação elétrica.

Farias *et al* (2008) fizeram o estudo do processo de resfriamento da água, por convecção natural, em um reservatório fechado, por meio do efeito termoelétrico. No estudo, foram feitas simulações numéricas em uma geometria tridimensional do reservatório no software FLUENT, que discretiza as equações a partir do método de volumes finitos. Experimentalmente, o reservatório do equipamento foi preenchido por completo com água, a uma temperatura de aproximadamente 27°C. Devido ao efeito Peltier na pastilha termoelétrica, o calor começa a ser retirado do volume de água através do dissipador interno e é transferido para o dissipador externo que então libera este calor no ambiente. Em aproximadamente 2 horas, a temperatura da água se aproximou de 5°C. As curvas das simulações apresentaram a mesma tendência de queda gradual na temperatura, apesar de haver alguma diferença quanto aos valores finais do tempo de resfriamento.

Camargo *et al* (2008) apresentaram as equações para avaliação do desempenho de um sistema de condicionamento de ar baseado no efeito termoelétrico, e desenvolveram um modelo experimental utilizando módulos e dissipadores de calor disponíveis no mercado. O dispositivo montado serviu para avaliar as temperaturas superficiais dos módulos termoelétricos nos lados frio e quente, a entrada de ar tomada nos dissipadores de calor nos lados quente e no frio, a tensão e a corrente elétrica aplicadas nos módulos. Diversos testes foram feitos para um, dois, três e quatro módulos acoplados em paralelo usando dois fluxos de ar com velocidades controladas nos lados quentes e frios dos módulos. Por meio dos experimentos, pôde-se verificar que o Coeficiente de Desempenho (COP) do sistema de condicionamento de ar pode ser aumentado com a redução da diferença de temperatura entre os lados frio e quente dos módulos termoelétricos ou com a redução da corrente elétrica.

Jugsujinda *et al* (2010) montaram um refrigerador (25×25×35cm) utilizando módulos termoelétricos. Foi aplicada potência de 40W e a temperatura do refrigerador foi medida em 10 pontos para verificar o sistema de resfriamento. Foram analisados a corrente, a diferença de temperatura e o coeficiente de desempenho (COP). A temperatura do lado frio de cada módulo termoelétrico passou de 30 °C para -4.2 °C em uma hora e continuou caindo para -7.4 °C em 24 horas. A temperatura do refrigerador como um todo passou de 30 °C para 20 °C em uma hora e continuou caindo lentamente em 24 horas. O máximo COP atingido pelos módulos termoelétricos foi de 3,0 e o refrigerador atingiu COP de 0,65.

Camargo & Oliveira (2010) apresentaram a concepção de um sistema de ar condicionado automotivo que utiliza os efeitos Peltier e Seebeck. Os módulos termoelétricos foram utilizados para refrigerar o interior do veículo e para fornecer a energia necessária para este arrefecimento. O gerador utiliza o calor residual dos gases de escape do motor para gerar energia para o condicionador de ar. Pôde ser observado que o Coeficiente de Desempenho (COP) diminui quando a diferença de temperatura aumenta. A potência requerida é maior ao aumentar a diferença de temperatura.

Silva (2010) apresentou a modelagem matemática que permite avaliar o desempenho do sistema para condicionamento de ar baseado no efeito termoelétrico e apresentou os resultados experimentais dos módulos termoelétricos confinados em uma caixa para a simulação de um sistema de condicionamento de

ar automotivo. Foi feito um experimento utilizando uma caixa de isopor de 125 litros, dois dissipadores de calor, um do lado quente e outro do lado frio, ventiladores com fluxos de ar com velocidade constante nos lados quente e frio dos módulos. Os módulos foram alimentados por uma bateria automotiva de 60Ah no primeiro experimento e pelo alternador do veículo no segundo experimento. Foram feitos diversos testes e análises do desempenho do sistema, sendo possível verificar a potência, a tensão e a corrente elétrica que maximizam o coeficiente do desempenho do sistema termoelétrico. Foi possível verificar que com o aumento da tensão aplicada ao módulo, consegue-se uma corrente elétrica maior e conseqüentemente uma taxa de bombeamento de calor maior. A maximização do Coeficiente de Desempenho (COP) para cada diferença de temperatura pode ser feito com o ajuste da tensão aplicada.

Du & Wen (2011) realizaram uma investigação experimental e análise numérica para um refrigerador termoelétrico de um estágio, considerando efeito Thomson. Três modelos de coeficiente Seebeck foram aplicados para o estudo analítico e experimental do efeito Thomson no refrigerador termoelétrico. A temperatura do lado quente, a temperatura do lado frio, tensão e corrente do refrigerador foram medidas. Os resultados mostram que para maior corrente, maior a temperatura do lado quente, ou a menor carga de calor pode aumentar a diferença de temperatura entre os lados frio e quente. Tendências opostas são encontradas para o COP. Uma corrente específica deve ser escolhida como o limite superior no projeto de um refrigerador termoelétrico. O desempenho de refrigeração pode melhorar quando o calor Thomson se mantém positivo.

Karimi *et al* (2011) analisaram um refrigerador termoelétrico multi-estágio tipo pirâmide, enfocando a importância do máximo fluxo de calor e o coeficiente de desempenho, COP. Para um fluxo de calor de refrigeração fixo, a razão entre a resistência térmica do dissipador de calor para o respectivo valor em um único estágio e o COP atingível em um refrigerador em cascata são determinados como uma função do número de estágios. Simulações numéricas indicaram que a resistência térmica do dissipador de calor do lado quente é o fator de controle na determinação do desempenho global de um refrigerador termoelétrico multi-estágio. Verificou-se que o desenho ideal de um refrigerador termoelétrico multi-estágio pode ser feito tanto baseando-se no valor máximo de COP quanto na melhor tecnologia de dissipadores de calor disponível.

Martínez *et al* (2011) estudaram o conceito de auto-refrigeração termoelétrica. Para tal, foi concebido um dispositivo dotado de uma fonte de calor interno, que necessita ser refrigerado. Módulos termoelétricos foram conectados a este dispositivo, gerando eletricidade. A eletricidade gerada foi utilizada em um sistema de refrigeração para o mesmo dispositivo. Os resultados experimentais e analíticos mostraram que a resistência térmica entre a fonte de calor e o ambiente foi reduzida em 25 a 30% quando o sistema de auto-resfriamento termoelétrico foi instalado, indicando a aplicabilidade desta tecnologia para dispositivos que geram grandes quantidades de calor, tais como conversores elétricos de potência, sistemas de controle e transformadores.

## 2.2. BREVE HISTÓRICO DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

Na primeira metade do século XIX, dois fenômenos elétricos bastante surpreendentes foram descobertos, o que demonstrou que um fluxo de corrente pode ter outras conseqüências térmicas além do aquecimento ôhmico do condutor.

O primeiro deles foi descoberto em meados de 1820 por Thomas Johann Seebeck (1770-1831), um físico alemão. Ele descobriu que, quando dois condutores diferentes são combinados em um circuito fechado e as junções mantidas a diferentes temperaturas, flui uma corrente. Alternativamente, se o circuito é aberto longe da junção, uma força eletromotriz pode ser observada. Esta é a base do termopar e este é o chamado Efeito Seebeck. A Figura 2.1 ilustra este efeito.

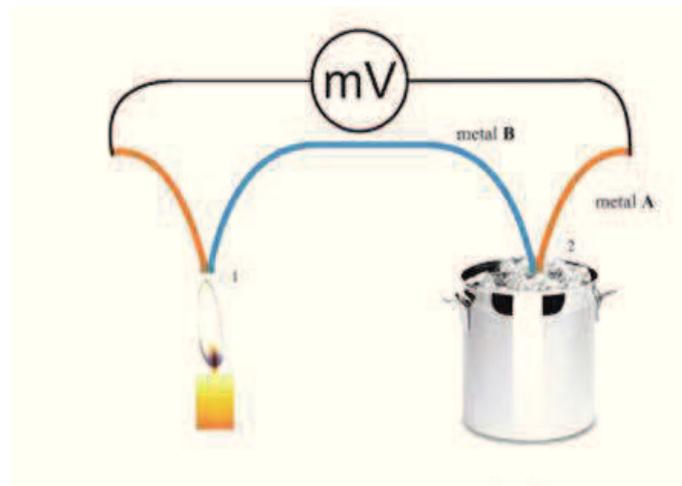


Figura 2.1 - Efeito Seebeck (Fonte: MOURA, 2010)

De acordo com Moura (2010), a diferença de potencial  $V$  gerada pelo efeito Seebeck é dada pela Equação 2.1:

$$V = \alpha_{ab}\Delta T \quad (2.1)$$

Onde  $\alpha_{ab}$  é o coeficiente Seebeck e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre as junções.

O segundo efeito foi descoberto em 1834 por Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845). Ele observou que se uma corrente elétrica passa através de uma junção entre dois condutores, então o calor será absorvido ou liberado na junção a uma taxa que depende da magnitude da corrente e com um sinal que depende da direção da corrente. Este efeito, chamado efeito Peltier, foi ignorado pela comunidade científica e voltou a ser estudado após 1950. Um esquema básico do Efeito Peltier pode ser visto na Figura 2.2.

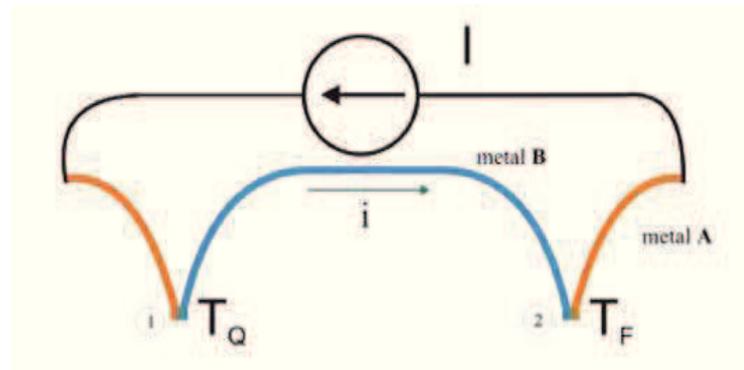


Figura 2.2 - Efeito Peltier (Fonte: MOURA, 2010)

Ao considerar os efeitos Seebeck e Peltier, William Thomson (1824-1907), em 1855, estabeleceu as relações termodinâmicas entre os dois efeitos e previu um terceiro efeito, o efeito Thomson. Este efeito é relacionado, segundo Alves (2007), à absorção de calor dinamicamente reversível num condutor.

Quando existe corrente, modifica-se em cada fio a distribuição de temperatura em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Essa variação adicional na distribuição da temperatura denomina-se efeito Thomson. O efeito Thomson depende do metal de que é feito o fio e da temperatura média da região considerada. Então, com a circulação de corrente ao longo de um fio condutor, a

distribuição de temperatura neste condutor se modificará, tanto pelo calor dissipado por efeito Joule, como pelo efeito Thomson.

### 2.3. O EFEITO PELTIER

O efeito Peltier é a produção de um gradiente de temperatura em uma junção de dois semicondutores de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado. Uma parte desse gradiente de temperatura é o “calor de Joule”, que é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica. Há uma parcela adicional de calor denominado “calor de Peltier”, que é linear com a corrente e é o principal efeito referente ao bombeamento de calor e refrigeração termoelétrica. O calor de Peltier é dado pela Equação 2.2.

$$Q_p = -\pi I = -\alpha T I \quad (2.2)$$

Onde  $\pi$  é o coeficiente Peltier e  $I$  é a corrente elétrica que percorre a junção.

A refrigeração termoelétrica baseada no efeito Peltier acontece quando uma corrente contínua é forçada através de um ou mais pares de materiais semicondutores do tipo n e do tipo p, sendo que o fluxo de elétrons deve passar do material semicondutor tipo n para o tipo p. Dessa forma haverá uma absorção de calor do ambiente e a temperatura da placa fria diminuirá. Invertendo a polaridade da tensão aplicada, ocorrerá aquecimento na junção, ou seja, dissipação de calor. A Figura 2.3 ilustra uma junção de semicondutores onde ocorre o efeito Peltier, ou seja, há o resfriamento ou aquecimento da junção.



Figura 2.3 – Efeito Peltier em semicondutores (Fonte: adaptado de BELL, 2008)

Segundo Souza (2007), o resfriamento ocorre quando elétrons passam do nível baixo de energia no semicondutor do material tipo p através do condutor interconectado para um nível de energia mais elevado no material semicondutor tipo n. O calor absorvido é transferido através dos materiais semicondutores por transporte eletrônico até a outra junção que se encontra a temperatura mais elevada, sendo liberado à medida que os elétrons retornam ao baixo nível de energia no material tipo p.

Tal comportamento observado é semelhante ao dos fluidos de trabalhos em ciclos de refrigeração por compressão ou por absorção. Sendo assim, eles aquecem um lado e refrigeram o outro, sendo necessária a interposição de um isolante térmico entre os mesmos com a finalidade de diminuir a condução de calor natural gerada pelo gradiente de temperatura.

## 2.4. O MÓDULO TERMOELÉTRICO

O módulo termoelétrico consiste num arranjo de pequenos blocos semicondutores tipo n e tipo p montados alternadamente e eletricamente em série entre duas placas cerâmicas de boa condutividade térmica. Este arranjo faz com que todos os termoelementos bombeiem o calor na mesma direção, termicamente em paralelo. A Figura 2.4 apresenta este arranjo.

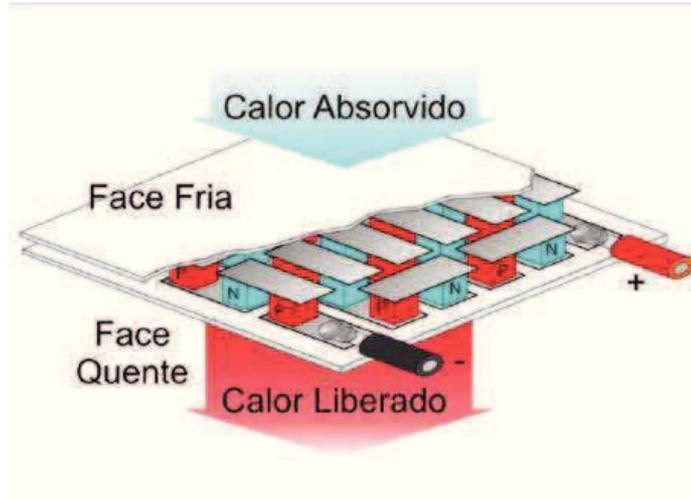


Figura 2.4 – Arranjo do módulo termoelétrico (Fonte: Adaptado de ADEYANJU e COMPTON, 2010)

No mercado estão disponíveis módulos termoeétricos em tamanhos que variam de 0,6×0,6 cm a 5×5 cm, sendo que estes podem ser utilizados individualmente ou agrupados eletricamente em série, paralelo ou série-paralelo. A Figura 2.5 apresenta exemplos de módulos termoeétricos.

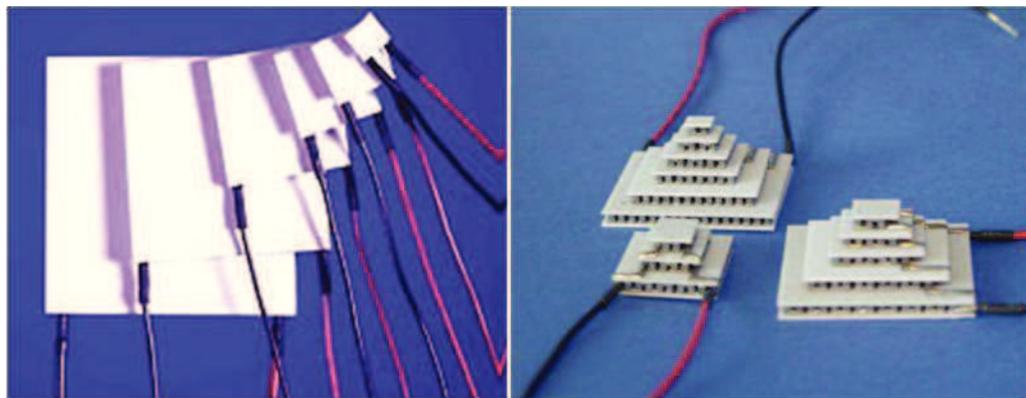


Figura 2.5 – Exemplos de módulos termoeétricos (Fonte: MOURA, 2010)

### 2.1.1. Parâmetros do Módulo Termoeétrico

De acordo com Alves (2007), um dispositivo termoeétrico depende de três parâmetros: a temperatura da superfície quente ( $T_q$ ), a temperatura da superfície fria ( $T_f$ ), e a máxima quantidade de calor a ser absorvido na superfície fria ( $Q_f$ ). A face quente do módulo termoeétrico é o lado onde o calor é liberado quando uma fonte de tensão contínua é aplicada.

Os fabricantes de módulos termoelétricos apresentam suas especificações para os parâmetros de desempenho e curvas de desempenho para as temperaturas de trabalho dos módulos. A Tabela 2.1 abaixo apresenta um exemplo das especificações fornecidas para o módulo HT4-12-40 da marca MELCOR, obtida em catálogo. A partir destas especificações, é possível escolher o módulo que será mais adequado para cada tipo de aplicação.

Tabela 2.1 – Especificações de módulo termoelétrico fornecidas por fabricante

<b>Módulo HT4-12-40 - MELCOR</b>		
Temperatura do lado Quente (°C)	25°C	50°C
$Q_f$ (Watts)	32	36,2
$\Delta T_{max}$ (°C)	67	75
$I_{max}$ (Ampères)	3,7	3,85
$V_{max}$ (Volts)	14,4	15,13
Resistência do Módulo ( $\Omega$ )	3,49	3,93

### 2.1.2. Propriedades do Telureto de Bismuto ( $Bi_2Te_3$ )

O material mais comumente utilizado nos módulos termoelétricos é a liga de Telureto de bismuto ( $Bi_2Te_3$ ). De acordo com Alves (2007), o composto Telureto de bismuto é um semicondutor da família V-VI, que apresenta características termoelétricas. Desta família, é o composto simples mais importante para aplicações em dispositivos refrigeradores, utilizando associação de semicondutores tipo p e tipo n. Os materiais com excesso de  $Bi$  são do tipo p e materiais com excesso de  $Te$  são do tipo n.

A Tabela 2.2 abaixo apresenta-se como exemplo das propriedades químicas, físicas e termoelétricas do telureto de bismuto tipo n, com o objetivo de apresentar uma ordem de grandeza para as referidas propriedades.

Tabela 2.2 – Propriedades químicas, físicas e termoelétricas do telureto de bismuto tipo n

Propriedades	Valor
Condutividade Elétrica $\sigma$ (1/ $\Omega$ .m)	$2,11 \times 10^4$
Condutividade térmica $k$ (W/mK)	1,8
Coeficiente de Seebeck $\alpha$ ( $\mu$ V/K)	190
Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	7530
Coeficiente de Expansão Térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$13,0 \times 10^4$
Calor Específico (J/kg.K)	544

A Figura 2.6 apresenta a desmontagem de uma placa termoelétrica de 51W contendo Telureto de bismuto fabricada pela empresa Melcor, onde foram retirados os paralelepípedos com dimensões de aproximadamente 1,0 x 1,2 x 1,0 mm.

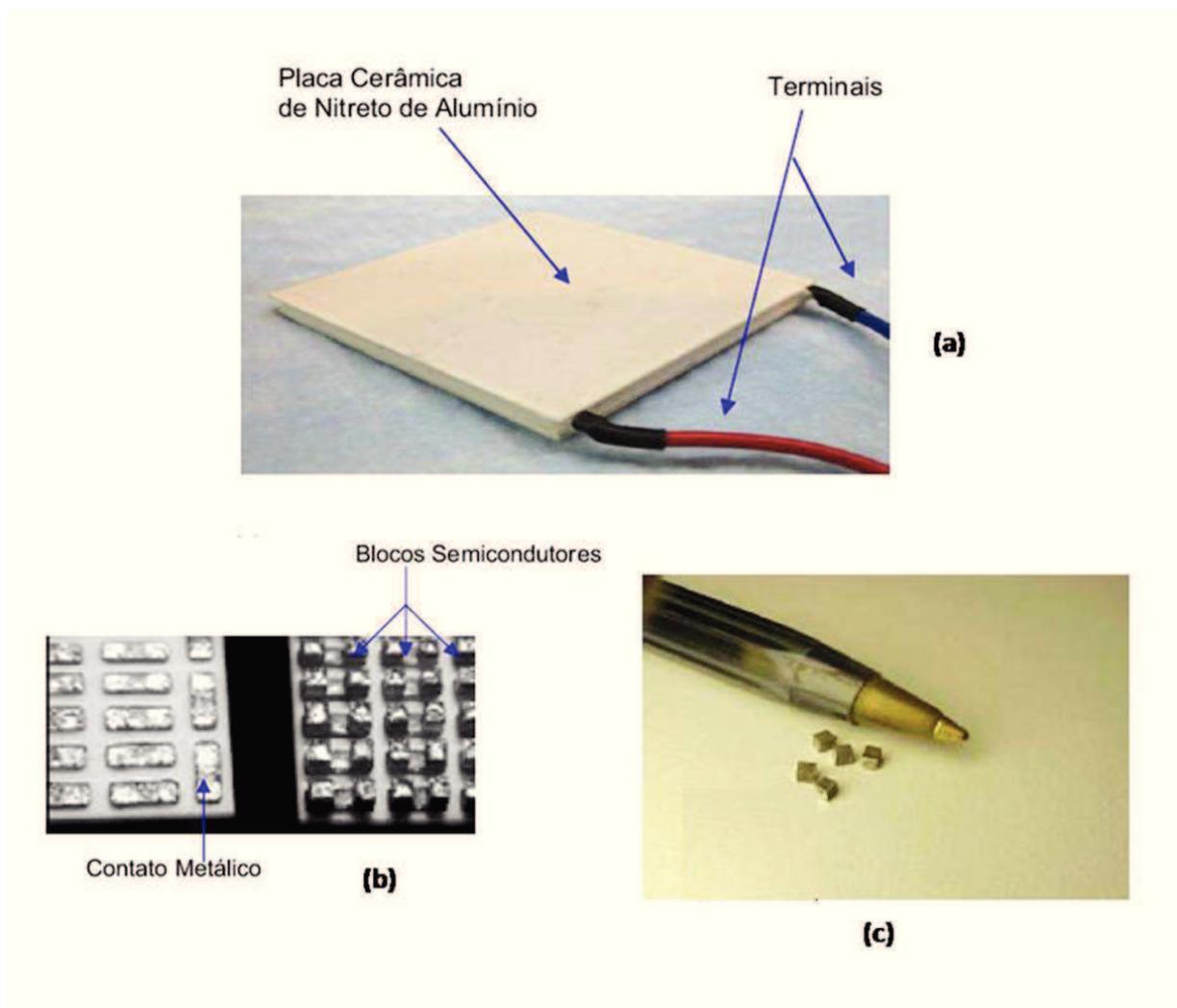


Figura 2.6 – Módulo termoelétrico (a) Placa termoelétrica comercial; (b) Placa sem a cerâmica; (c) Amostras de telureto de bismuto no formato de paralelepípedo (Fonte: ALVES, 2007)

### 2.1.3. Dissipador de calor

Para que o módulo tenha um desempenho dentro do esperado para um determinado projeto, o dissipador de calor tem um papel fundamental, pois deve manter a face quente abaixo da temperatura limite de projeto  $T_q$ , sendo  $T_q$  específica para cada módulo.

Alguns critérios práticos a serem adotados no dimensionamento de dissipadores:

- A temperatura de trabalho da junção semicondutora do módulo deve ser 20% a 30% menor que seu valor máximo, para permitir a proteção do componente sem super-dimensionar o dissipador;
- Caso o dissipador fique dentro de algum bastidor ou caixa na qual a temperatura possa se elevar acima dos 40°C deve-se considerar sempre a máxima temperatura do ar com o qual o dissipador troca calor.
- Deve-se verificar a necessidade do uso de isolantes (mica, teflon ou mylar) e não desconsiderar suas resistências térmicas.
- O emprego de pastas térmicas é sempre recomendado e se deve considerar também sua resistência térmica.

Ao selecionar dissipadores de calor, deve-se levar em consideração que determinadas geometrias de dissipadores são mais eficazes com velocidades de ar elevadas, enquanto outras geometrias são mais eficientes com velocidades baixas do ar. Com o controle da densidade do número de aletas, os dissipadores de calor podem ser caracterizados para fluxos de ar diferentes.

Os valores tipicamente usados para expressar a eficiência de um dissipador são a resistência térmica e a “queda de pressão”. A resistência térmica é expressa como o aumento da temperatura por Watt ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ). Quanto menor o valor, melhor o desempenho térmico do dissipador. A queda de pressão é a resistência encontrada pelo ar se movendo através do dissipador expressa em unidades de  $\text{mmH}_2\text{O}$ , e deve ser idealmente a mais baixa possível. Em geral estes dispositivos são construídos em alumínio, por sua boa condutividade térmica, baixo custo e peso. Alguns são construídos em cobre e outros são uma mistura dos dois.

Segundo Alves (2007), para fluxos de ar elevados, um número de densidade de aletas elevado é preferível desde que o fluxo de ar seja poderoso o bastante para fluir através do dissipador de calor. Com fluxos de ar baixos, um pequeno número de

densidade de aletas é recomendado porque a força do ar não é forte o bastante para penetrar numa configuração mais densa de aletas.

Na Figura 2.7, apresenta-se uma série de geometrias de dissipadores.



Figura 2.7 – Diversas geometrias de dissipadores de calor (Fonte: SOUZA, 2007)

O tipo mais simples de dissipador de calor é o dissipador resfriado por convecção natural, que normalmente consiste apenas de um bloco com várias aletas. Esse tipo de dissipadores deve normalmente ter suas aletas espaçadas de 10 a 15 mm, pois um menor espaçamento das aletas reduz significativamente o efeito de refrigeração convectiva natural.

Os dissipadores que utilizam ventilação forçada devem ter um espaçamento pequeno entre as aletas, não ultrapassando poucos milímetros. A circulação forçada de ar reduz significativamente o valor efetivo da resistência térmica do dissipador. Neste caso, o ar cria uma turbulência significativa entre as aletas e realça suas habilidades de refrigeração.

#### **2.1.4. Controle de temperatura**

Nos refrigeradores a compressores convencionais, em geral, o controle de temperatura é conseguido pela operação de ligar e desligar usando um sensor/interruptor de expansão térmica. Este tipo de controle de temperatura causa flutuações senoidais de temperatura. Para fazer o controle de temperatura de refrigeradores termoelétricos e minimizar a condução de calor através do módulo, pode ser empregado um controle PID (proporcional integral derivativo).

Nogueira (2005) propôs em seu trabalho um controle proporcional integral (PI) para um sistema termoeletrônico. A ação integral consiste em aplicar um sinal de controle  $u(t)$  proporcional à integral do sinal de erro  $e(t)$ , conforme a Equação 2.3.

$$u(t) = \frac{1}{t_r} \int e(t) dt \quad (2.3)$$

Onde  $t_r$  é denominado de tempo integral ou reset-time.

A ação integral tem função armazenadora de energia. Se a partir de um determinado tempo  $t$  o erro é igual a zero, o sinal de controle  $u(t)$  é mantido em um valor constante proporcional à energia armazenada até o instante  $t$ . Este fato permite num sistema de malha fechada obter-se o seguimento de uma referência com erro nulo em regime permanente, pois a ação integral garante a aplicação de um sinal de controle constante.

A ação de controle proporcional e integral (PI) atua no retificador controlando a variação da corrente contínua e da tensão elétrica aplicadas no módulo termoeletrônico, o que influi nas temperaturas do lado frio e do lado quente da placa. Não há controle na vazão de ar do lado frio, podendo manter um valor constante para a mesma.

Um controle proporcional e derivativo (PD) também poderia ser utilizado, sendo que quanto maior a taxa de mudança do sinal de erro, mais rápida é a resposta do controlador à mudança. De acordo com Guerra (2009), um grande problema neste tipo de controle é a existência de erro em regime permanente quando o sistema estabiliza. Este erro depende do sistema e da constante de proporcionalidade e se deve ao fato de que quando o desvio se torna nulo, a saída do controlador também se anula. Assim o sistema tende a se equilibrar num ponto em torno do valor desejado e não exatamente no valor desejado.

O controle de PID pode ser também incorporado ao computador para obter-se uma operação de refrigeração programável. A temperatura do refrigerador pode ser pré-ajustada e controlada convenientemente para obter um perfil de refrigeração requerido e um grau mais elevado de estabilidade. Um refrigerador termoeletrônico com características programáveis fornece uma facilidade de refrigeração controlável que pode ser útil em uma variedade de aplicações, em particular, na medicina e na biotecnologia.

### 2.1.5. Aplicações em Refrigeração e Condicionamento de Ar

Desde a descoberta do efeito Peltier no início do século XIX, tornou-se possível construir mecanismos de refrigeração de estado sólido. Com os materiais atualmente disponíveis, a tecnologia termoelétrica é adequada para diversas aplicações.

Exemplos de aplicações incluem diodos de laser refrigerados, refrigeração eletrônica, geladeiras portáteis e ar condicionado em automóveis de passageiros. A Tabela 2.3 abaixo cita outros exemplos de aplicações.

Tabela 2.3 – Aplicações de módulos termoelétricos para refrigeração

<b>Área</b>	<b>Aplicações</b>
Militar e Aeroespacial	Resfriamento eletrônico, refrigeradores portáteis, sensores infravermelhos refrigerados, diodos de laser refrigerados, equipamentos de visão noturna.
Produtos de consumo	Refrigeradores domésticos móveis, adega climatizada, purificadores residenciais de água, desumidificador, mini ar condicionado.
Equipamentos de laboratório e Científicos	Refrigeradores de circuito integrado, placas frias de laboratório, câmaras frias, higrômetro de ponto de orvalho, analisadores de sangue, pesquisa de DNA
Controle de Temperatura Industrial	Proteção de componentes importantes em ambientes insalubres, microprocessador de computador, trocadores de calor.
Uso Variado	Refrigerador farmacêutico portátil, ar condicionado automotivo, equipamentos de diagnóstico médico, frigobares de quarto de hotel.

Existe também, de acordo com Yang *et al* (2008), a possibilidade de, ao invés de utilizar somente o sistema de resfriamento termoelétrico, fazer uma associação com sistemas tradicionais de compressão a vapor, que são os chamados "sistemas híbridos" ou "sistemas integrados". Estes sistemas híbridos aproveitam do fato de que os sistemas termoelétricos apresentam excelente eficiência em pequenas elevações de temperatura. Uma das vantagens dos sistemas híbridos é tornar mais

largamente utilizadas as aplicações termoelétricas para condicionamento de ar e refrigeração.

### **2.1.6. Vantagens e Desvantagens da Utilização de Módulos Termoelétricos**

De acordo com Tavera (2006), a utilização de módulos termoelétricos para refrigeração apresenta as seguintes vantagens em relação aos refrigeradores convencionais:

- O controle de temperaturas requeridas é facilmente conseguido por meio da variação da corrente elétrica aplicada;
- Os módulos termoelétricos têm tamanho e peso reduzidos, e são úteis em aplicações que não dispõem de muito espaço e onde o peso é fator fundamental, por exemplo nos dispositivos portáteis;
- Baixo custo de manutenção, devido à ausência de partes móveis. Não sofrem desgastes e são mais silenciosos;
- Alta confiabilidade, controle preciso de temperatura e quantidade de calor removida diretamente proporcional à corrente elétrica;
- Os módulos podem ser montados em paralelo para aumento do calor removido.

As seguintes desvantagens devem ser lembradas:

- Os módulos termoelétricos têm baixo coeficiente de desempenho em relação aos dispositivos convencionais de refrigeração;
- Cada módulo tem um limite de temperatura que não deve ser ultrapassado, pois poderá danificar o mesmo. Portanto, em cada aplicação, deve-se garantir que este limite não seja atingido;
- Seu uso não é indicado sob choques mecânicos e vibrações, pois os módulos termoelétricos não são muito resistentes sob forças de tensão e cisalhamento;
- Em locais úmidos, se o lado frio do módulo trabalhar a uma temperatura abaixo do ponto de orvalho, poderá ocorrer condensação e a água entrará em contato com os semicondutores e poderá provocar corrosão e curto-circuito.

## CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO PARA REFRIGERAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE AR

Uma das aplicações da tecnologia termoelétrica é o condicionamento de ar, usando como fundamento básico o efeito Peltier. Para o projeto de um condicionador de ar por efeito termoelétrico, vários parâmetros devem ser considerados para se obter um melhor aproveitamento do sistema. Os mais importantes deles são o coeficiente de desempenho, a taxa de calor transferido (ou bombeado) e a máxima diferença de temperatura produzida entre as faces quente e fria do módulo termoelétrico.

O modelo matemático descrito neste trabalho descreve os parâmetros principais para um melhor desempenho do sistema termoelétrico. O desenvolvimento e as equações estão de acordo com Heikes e Ure Jr. (1961).

A energia térmica transferida das fontes térmicas quente e fria em uma associação termoelétrica é a soma de três componentes: o calor de Joule, a taxa de transferência de calor para corrente igual a zero entre os dois corpos quente e frio e a taxa de absorção de calor Peltier de cada reservatório.

O calor de Joule liberado de cada corpo por unidade de tempo é dado pela Equação 3.1.

$$Q_j = \frac{1}{2} I^2 R \quad (3.1)$$

Onde:

$$R = \left( \frac{\rho_n}{\gamma_n} \right) + \left( \frac{\rho_p}{\gamma_p} \right) \quad (3.2)$$

E  $\rho_n$  e  $\rho_p$  são as resistividades dos braços n e p da Figura 3.1, respectivamente;  $\gamma_n$  e  $\gamma_p$  são razões entre a área e o comprimento para os braços,  $A/L$ . Na Figura 3.1, os elementos  $T_q$  e  $T_f$  são as fontes térmicas e os elementos p e n são os braços ou ramais, formados por materiais semicondutores tipo n e tipo p. O elemento p normalmente tem um coeficiente de Seebeck absoluto positivo e o elemento n tem um coeficiente negativo.

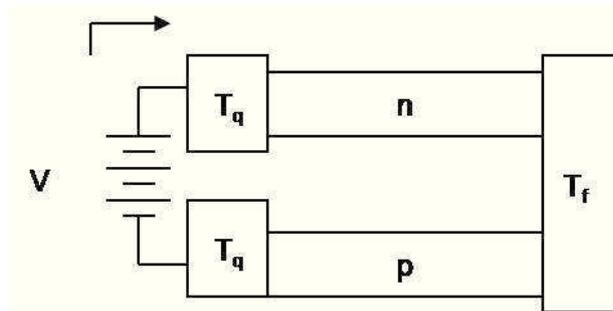


Figura 3.1 - Esquema do módulo termoelétrico utilizado para refrigeração  
(Fonte: SILVA, 2010)

A taxa de transferência de calor para corrente igual a zero entre os dois reservatórios quente e frio é dada pela Equação 3.3.

$$Q = K\Delta T \quad (3.3)$$

Onde:

$$K = k_n\gamma_n + k_p\gamma_p \quad (3.4)$$

Sendo  $k_n$  e  $k_p$  condutividades térmicas dos ramais n e p, respectivamente. A taxa de absorção de calor Peltier de cada reservatório é dada pela Equação 3.5.

$$Q_p(T) = -\pi_{pn}(T)I_{pn} \quad (3.5)$$

Onde  $\pi_{pn}(T)$  é o coeficiente de Peltier na temperatura  $T$  da associação composta pelo material p e pelo material n da fonte térmica.  $I_{pn}$  é a corrente fluindo do ramal p ao ramal n na junção. Das Equações 2.2 e 3.5, resulta a Equação 3.6.

$$-\pi_{pn}(T)I_{pn} = -T\alpha I_{pn} \quad (3.6)$$

A taxa de bombeamento de calor transferido do reservatório frio é dada pela soma de três termos: o calor de Joule liberado de cada corpo por unidade de tempo (Equação 3.1); a taxa de transferência de calor para corrente igual a zero entre os corpos quente e frio (Equação 3.3); e a taxa de absorção de calor de Peltier de cada corpo (Equação 3.6):

$$Q_f = \alpha T_f I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (3.7)$$

Como a tensão nos terminais é dada pela soma das tensões termoelétrica e a tensão Joule:

$$V = \alpha \Delta T \quad \rightarrow \text{Tensão Termoelétrica}$$

$$V = IR \quad \rightarrow \text{Tensão de Joule}$$

Então, temos a Equação 3.8.

$$V = \alpha \Delta T + IR \quad (3.8)$$

A corrente é obtida pela Equação 3.9.

$$I = \frac{V - \alpha \Delta T}{R} \quad (3.9)$$

A potência fornecida pode ser calculada pela Equação 3.10:

$$P = VI \quad (3.10)$$

Então teremos a Equação 3.11.

$$P = VI = \alpha I \Delta T + I^2 R \quad (3.11)$$

Que pode ser escrita em função de V de acordo com a Equação 3.12.

$$P = \frac{V(V - \alpha\Delta T)}{R} \quad (3.12)$$

### 3.1. COEFICIENTE DE DESEMPENHO

O coeficiente de desempenho é o quociente da taxa de remoção de calor do corpo frio dividido pela potência aplicada ao circuito, e é dado pela Equação 3.13.

$$\varphi = \frac{Q_f}{P} \quad (3.13)$$

O coeficiente de desempenho (COP) depende da diferença de temperatura entre os corpos quente e frio, e será maior com uma diferença de temperatura menor. É determinado substituindo as Equações 3.7 e 3.11 na Equação 3.13, o que resulta na Equação 3.14.

$$\varphi = \frac{\alpha T_f I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{(\alpha I \Delta T + I^2 R)} \quad (3.14)$$

### 3.2. FIGURA DE MÉRITO

Este conceito visa caracterizar uma medida de desempenho de um sistema termoelétrico. A Figura de Mérito é representada por  $Z$  ou  $ZT$  (adimensional), e relaciona o coeficiente de Seebeck ( $\alpha$ ), a resistividade elétrica ( $\rho$ ) e a condutividade térmica ( $\kappa$ ) de um sistema termoelétrico. É obtida pela Equação 3.15.

$$Z_i = \frac{\alpha_i^2}{\rho_i k_i} \quad (3.15)$$

Onde  $i$  é representado por cada material tipo n ou tipo p. A equação também pode ser representada em duas parcelas, conforme a Equação 3.16.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\left[ (\rho_n k_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p k_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (3.16)$$

Este parâmetro mostra que quanto maior a resistividade do material, maior é o aquecimento por efeito Joule e pior a Figura de Mérito. As variáveis  $k$  e  $\rho$  representam o cálculo equivalente de todas as condutâncias térmicas e resistências do módulo. O parâmetro  $Z$  frequentemente é substituído por  $ZT$ , onde o material é caracterizado para uma determinada temperatura, conforme a Equação 3.17.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho k} T \quad (3.17)$$

O máximo coeficiente de desempenho depende das propriedades dos materiais através da Figura de Mérito  $Z$ . A Figura 3.2 apresenta algumas curvas de COP em relação a  $dT$ , analisadas de acordo com variações de  $Z$ .

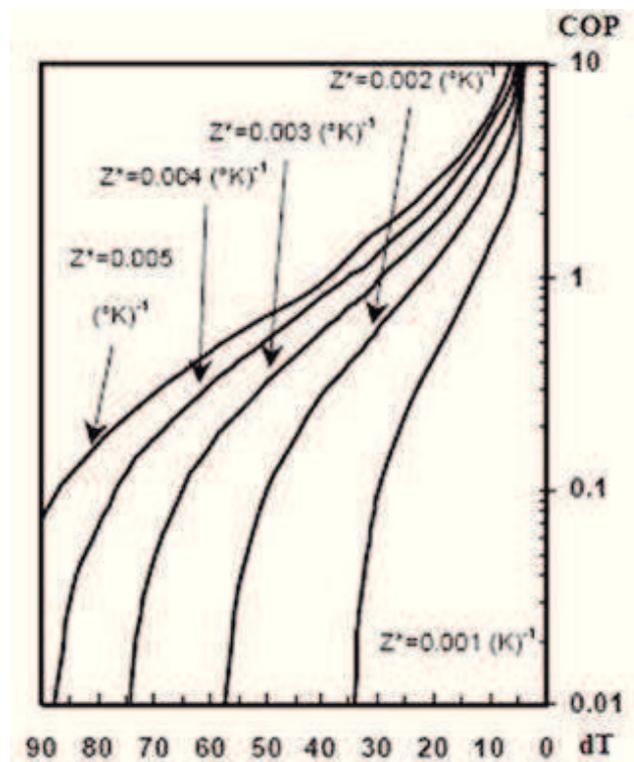


Figura 3.2 - Curvas de COP versus  $dT$ , analisadas de acordo com variações de  $Z$

(Fonte: SOUZA, 2007)

Assim,  $Z$  e  $ZT$  dependem das propriedades termoelétricas dos materiais utilizados, mas a Figura de Mérito não tem um comportamento constante com a temperatura, pois a alteração de uma das três variáveis  $\alpha$ ,  $\rho$  e  $k$  afeta a variação de pelo menos uma das outras. Um bom material termoelétrico possui uma elevada Figura de Mérito ( $ZT > 1$ ).

### 3.3. MÁXIMA TAXA DE BOMBEAMENTO DE CALOR

Derivando a taxa de transferência de calor com relação a  $I$  e igualando-se o resultado a zero, determina-se a corrente que maximiza a taxa de bombeamento de calor.

Da Equação 3.7, determina-se a corrente que satisfaz a condição  $\frac{dq}{dI} = 0$ , ou seja, o valor ótimo de corrente para a taxa de bombeamento de calor.

$$\frac{dq}{dI} = \alpha T_f - IR$$

Portanto, a corrente é dada pela Equação 3.18.

$$I = \frac{\alpha T_f}{R} \tag{3.18}$$

Substituindo a Equação 3.18 na Equação 3.7, a taxa de bombeamento para o valor ótimo de corrente é dada pela Equação 3.19.

$$Q_f = \alpha \left( \frac{\alpha T_f}{R} \right) T_f - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha T_f}{R} \right)^2 R - K \Delta T \tag{3.19}$$

$$Q_f = \left( \frac{\alpha^2 T_f^2}{2R} \right) - K \Delta T \tag{3.20}$$

Onde  $R$  e  $K$  são dadas pelas Equações 3.2 e 3.4.

### 3.4. BALANÇO ENERGÉTICO DE RESFRIAMENTO

A quantidade de calor transferido de um corpo ( $Q$ ) é dada pelo produto do calor específico pela sua massa ( $m$ ) e variação de temperatura  $\Delta T$  (FARIAS, 2009). Se o dispositivo termoelétrico atua como um condicionador de ar, o balanço energético do resfriamento resulta na Equação 3.21.

$$Q_f = \dot{m}_a C_p (T_i - T_o) \quad (3.21)$$

Onde:  $\dot{m}_a$  é o fluxo de massa de ar sendo resfriado,  $C_p$  é o calor específico à pressão constante,  $T_i$  é a temperatura do ar de entrada e  $T_o$  é a temperatura do ar de saída do condicionador.

### 3.5. DESEMPENHO DO REFRIGERADOR TERMOELÉTRICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

A Figura 3.3 apresenta um gráfico do coeficiente de desempenho, taxa de bombeamento de calor e potência fornecida de um refrigerador em função da diferença de temperatura. Esta figura apresenta graficamente a formulação apresentada para o refrigerador termoelétrico.

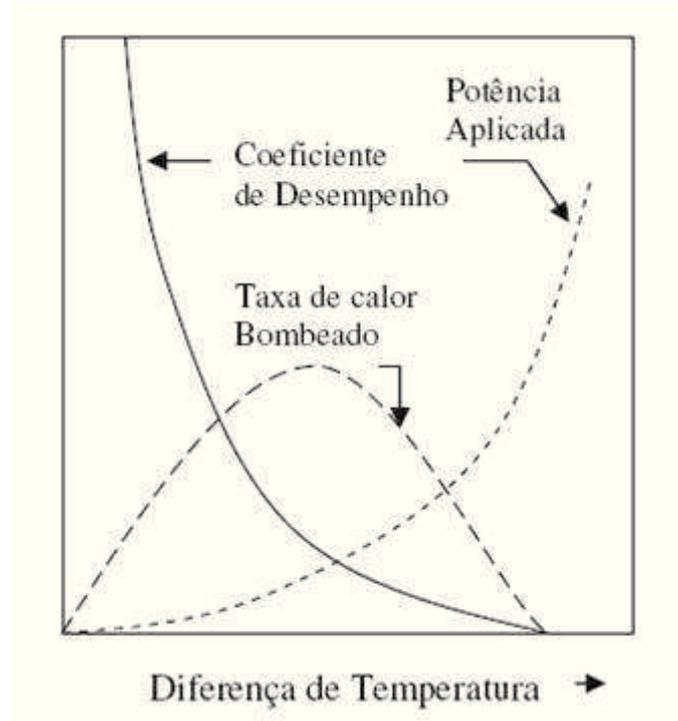


Figura 3.3 – Desempenho de um refrigerador termoelétrico em função da temperatura  
(Fonte: HEIKES e URE JUNIOR, 1961)

Para cada variação de temperatura ( $\Delta T$ ), a tensão aplicada pode ser ajustada para maximizar o coeficiente de desempenho. Quando a diferença de temperatura diminui o coeficiente de desempenho tende a um valor máximo. A taxa de bombeamento de calor inicia em zero, atinge um valor máximo e depois diminui quando a diferença de temperatura aumenta. A taxa de bombeamento de calor será pequena para pequenas diferenças de temperatura. Porém, os parâmetros devem ser ajustados para maximizar o coeficiente de desempenho. Quando a diferença de temperatura se aproxima de zero, a potência se aproxima de zero o mesmo acontece com a taxa de bombeamento de calor.

## CAPÍTULO 4 – MODELO EXPERIMENTAL

### 4.1. ESCOLHA DO DISSIPADOR DE CALOR

Como os dissipadores de calor têm papel fundamental no bom desempenho de sistemas termoelétricos, foi montado um sistema experimental para teste de diversos tipos de dissipadores de calor disponíveis comercialmente, a fim de escolher dissipadores que possam otimizar a transferência de calor nos lados quente e frio dos módulos termoelétricos empregados neste estudo. Foi realizada também simulação computacional, utilizando o software ANSYS, para analisar o comportamento dos dissipadores de calor, pressupondo-se as mesmas condições utilizadas para o modelo experimental.

O módulo termoelétrico utilizado para estes testes é do modelo TE Technology (0,04 x 0,04) m e 16,5 V. O sistema módulo-dissipador é montado conforme a Figura 4.1 a seguir:

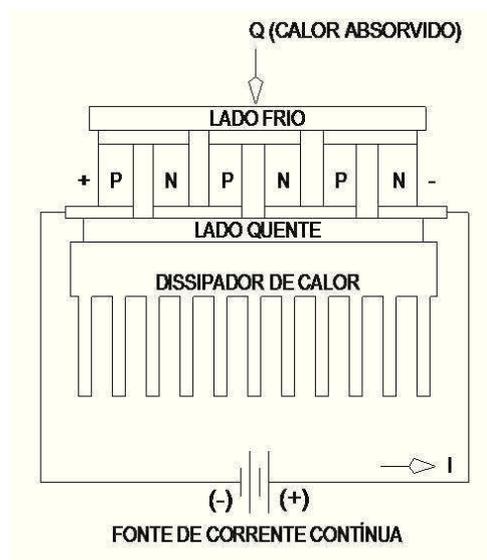


Figura 4.1 - Representação esquemática da conexão módulo-dissipador

Fonte: CAMARGO, 2009

Os dissipadores de calor utilizados nos testes de otimização têm suas características geométricas apresentadas na Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1 - Características geométricas dos dissipadores de calor utilizados

<b>Características Geométricas</b>					
<b>Dissipador</b>	<b>A (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>e<sub>base</sub> (mm)</b>	<b>N<sup>o</sup> aletas</b>	<b>Espaçamento (mm)</b>	<b>H aletas (mm)</b>
0	225	9	40	3	35
1	104	5	13	8	20
2	194	5	20	10	29
3	154	8	12	13	42
1H	104	5	13	8	20
2H	155	8	12	13	52
3H	155	10	14	11,3	49
4H	102	6	11	9,7	28
5H	154	8	12	13,1	42

Para cada um dos dissipadores de calor, foram medidas no decorrer do tempo, as temperaturas nos lados quente e frio do módulo termoelétrico, e foi calculado o  $\Delta T$  entre os lados do módulo.

As medições de temperatura das placas foram realizadas por termopares tipo J modelo TE-AA.

Os resultados para cada dissipador podem ser vistos nos quadros das Figuras 4.2 a 4.10 a seguir.

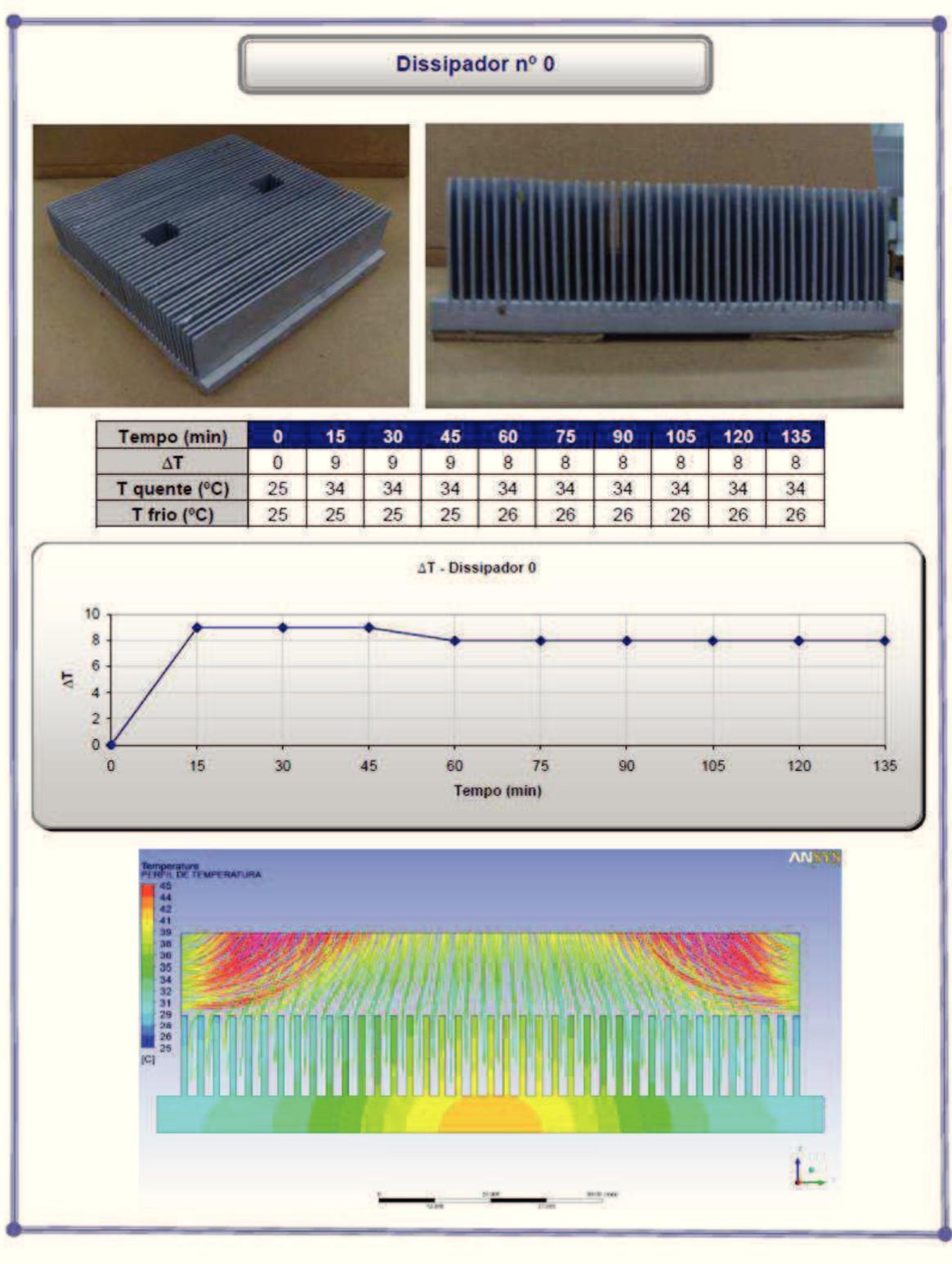


Figura 4.2 – Resultados para o dissipador nº 0

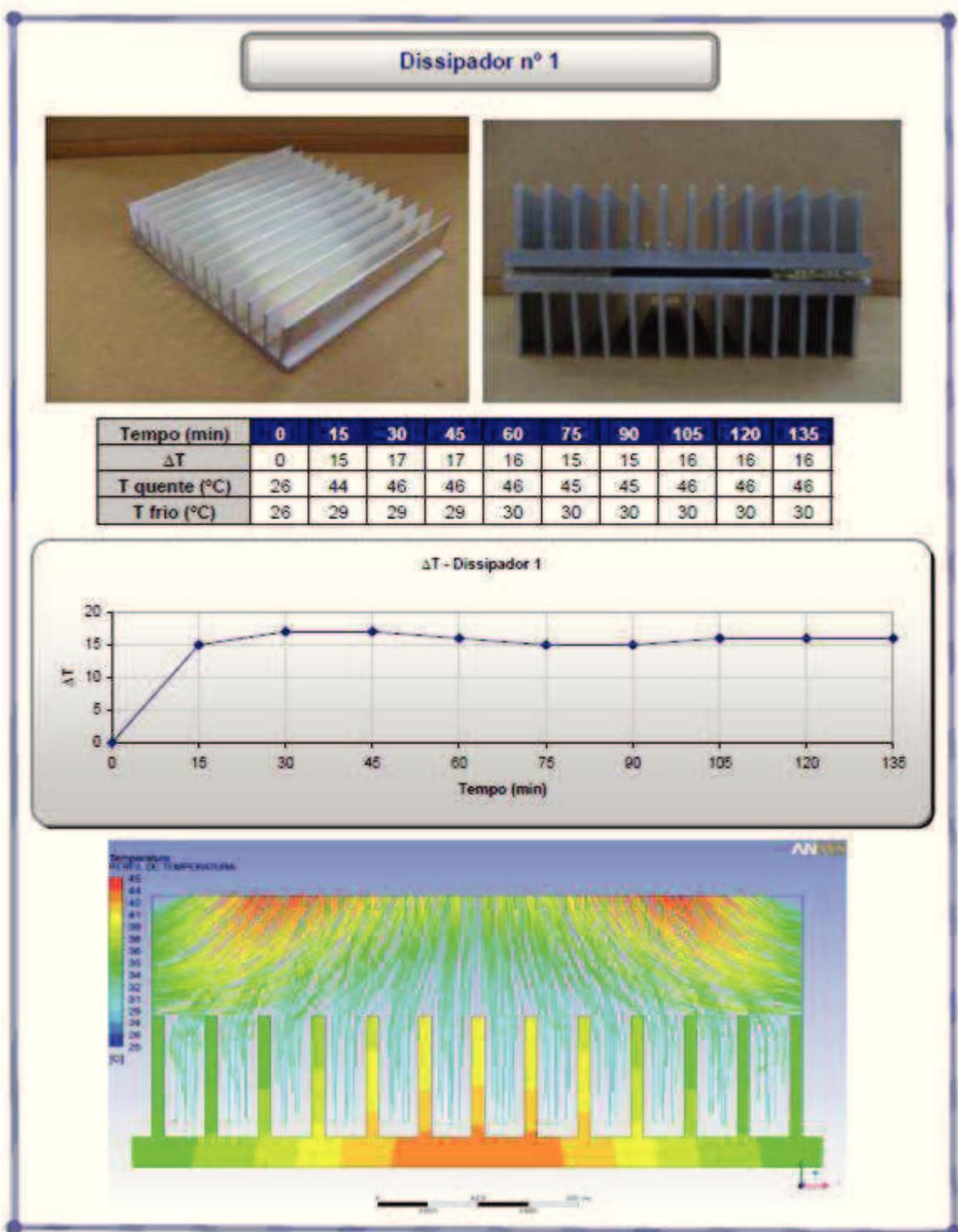


Figura 4.3 – Resultados para o dissipador nº 1

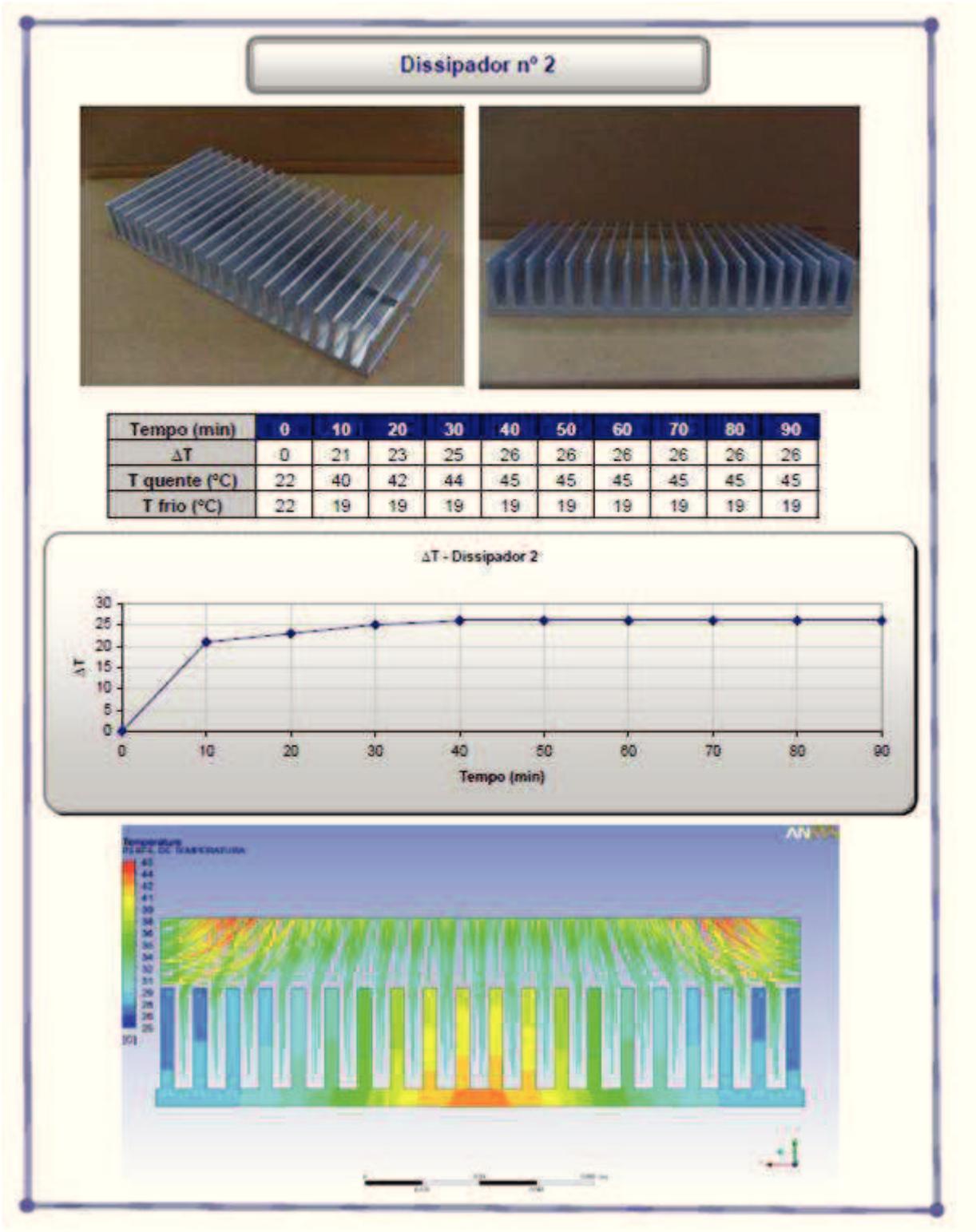


Figura 4.4 – Resultados para o dissipador nº 2

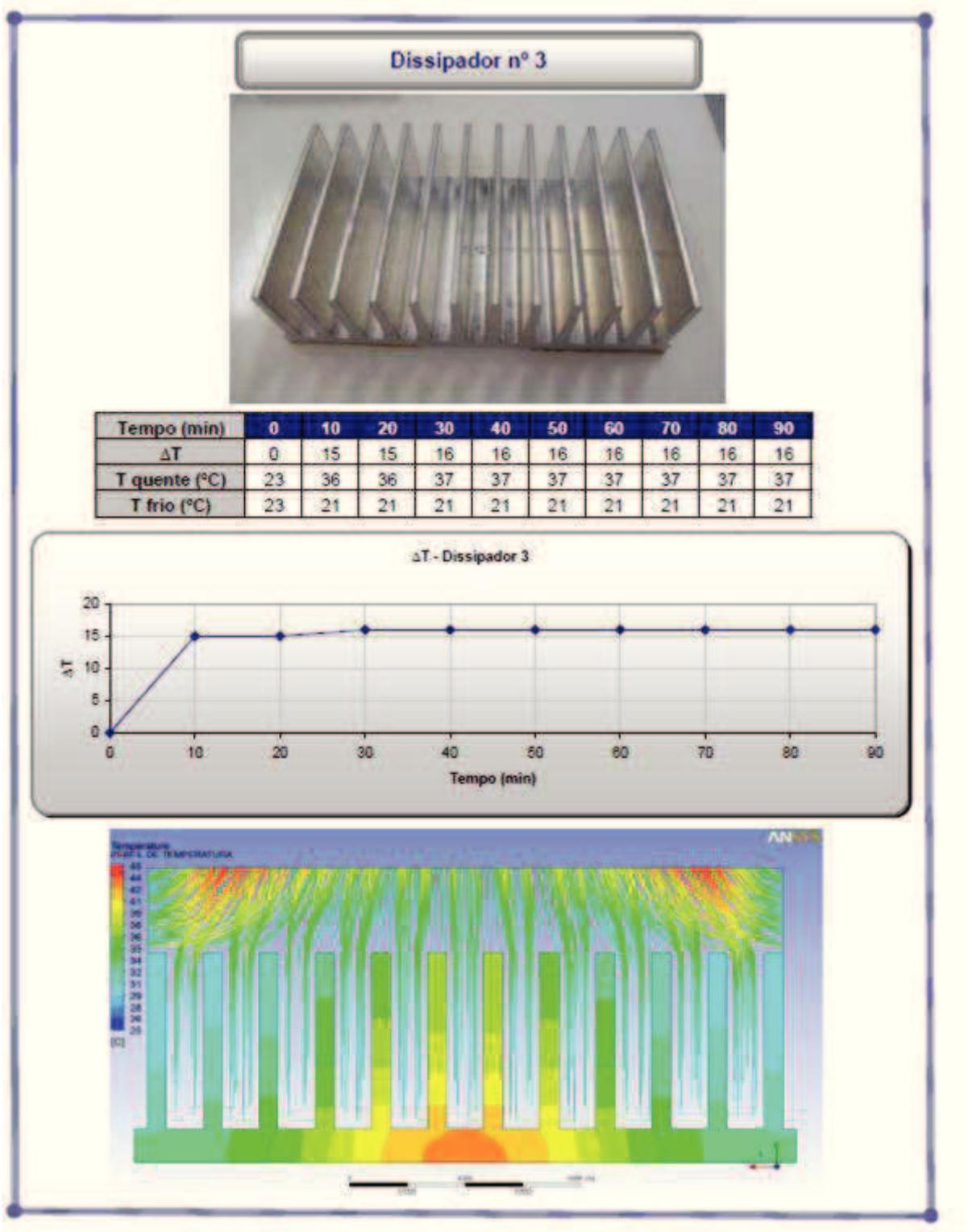


Figura 4.5 – Resultados para o dissipador nº 3

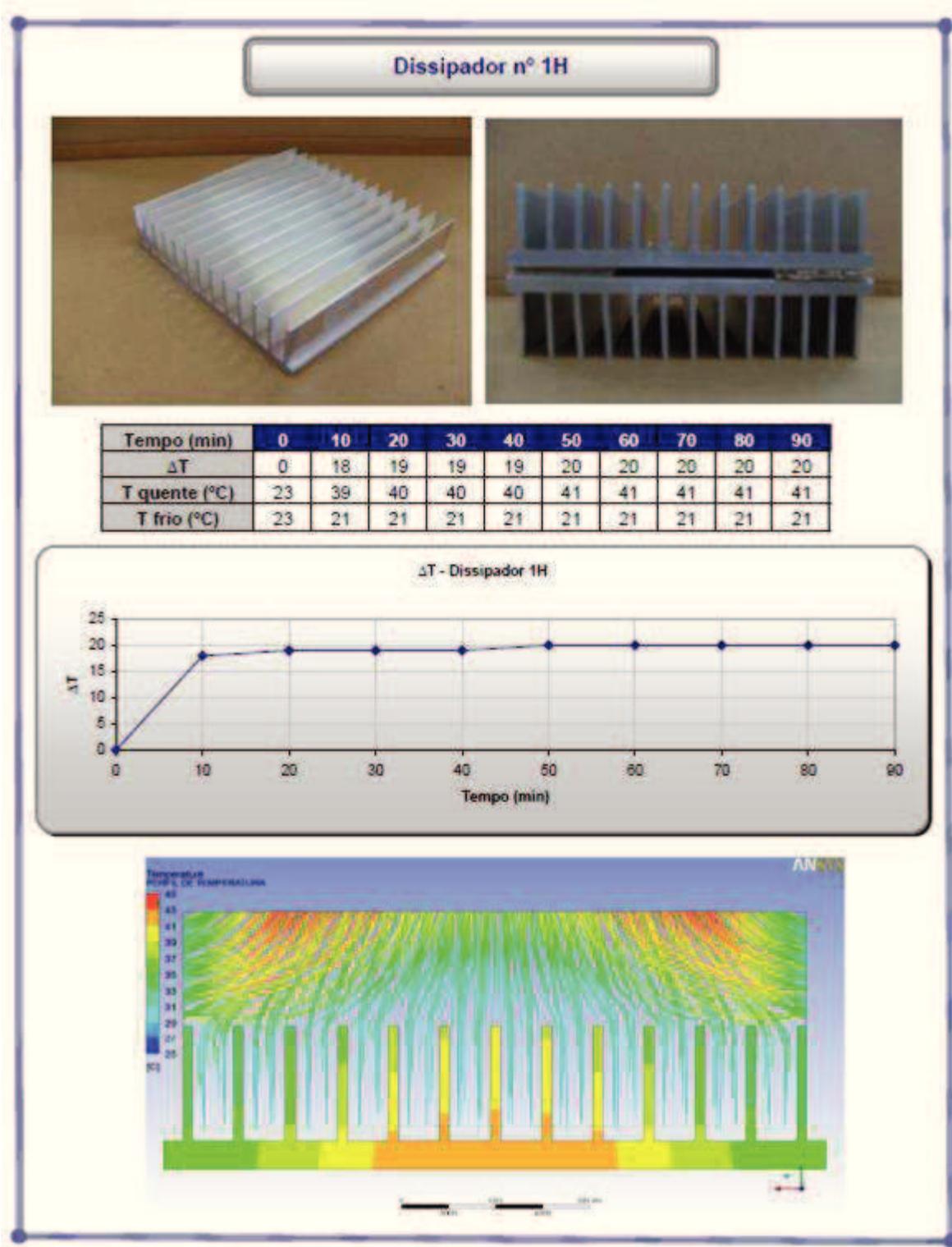


Figura 4.6 – Resultados para o dissipador nº 1H

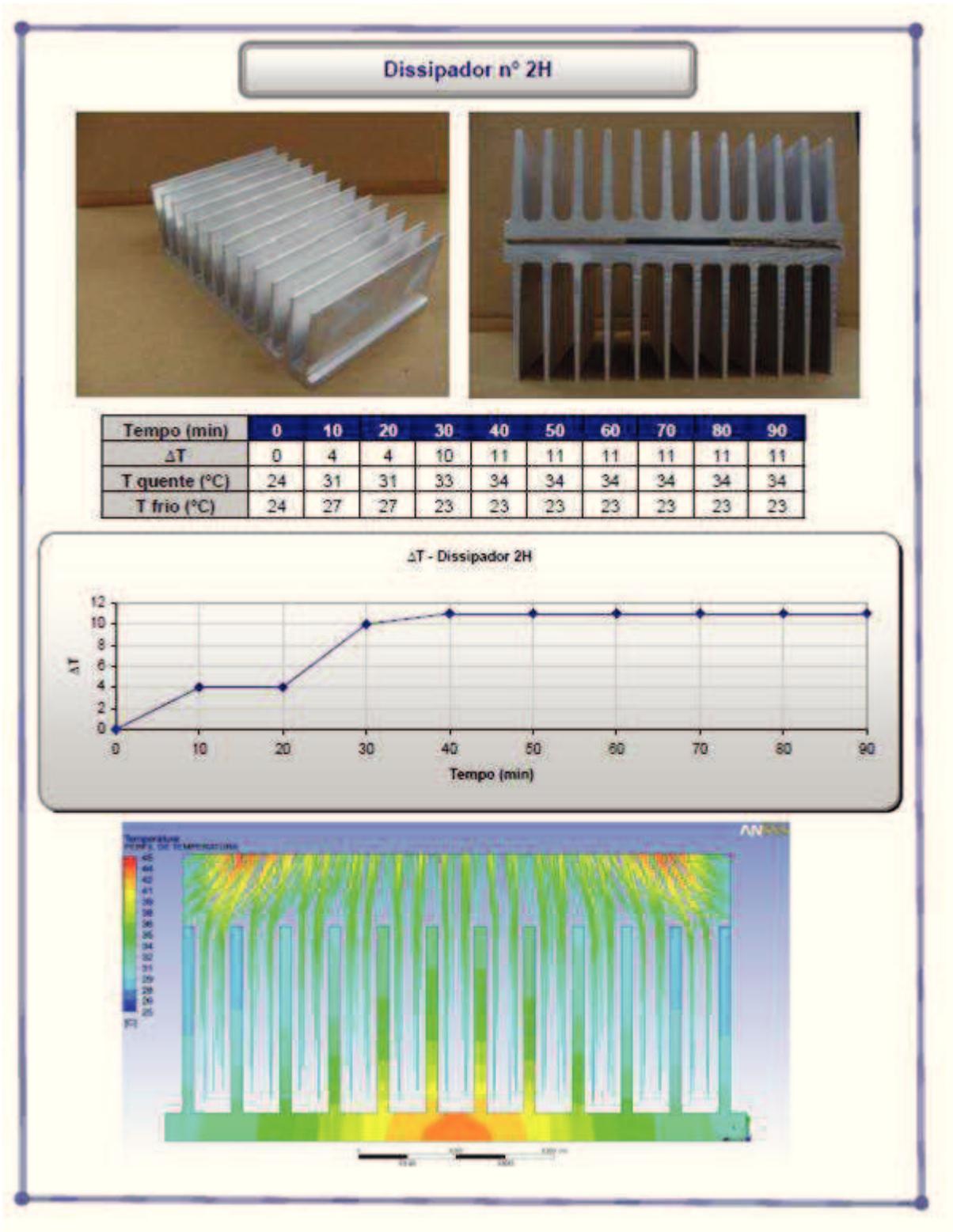


Figura 4.7 – Resultados para o dissipador nº 2H

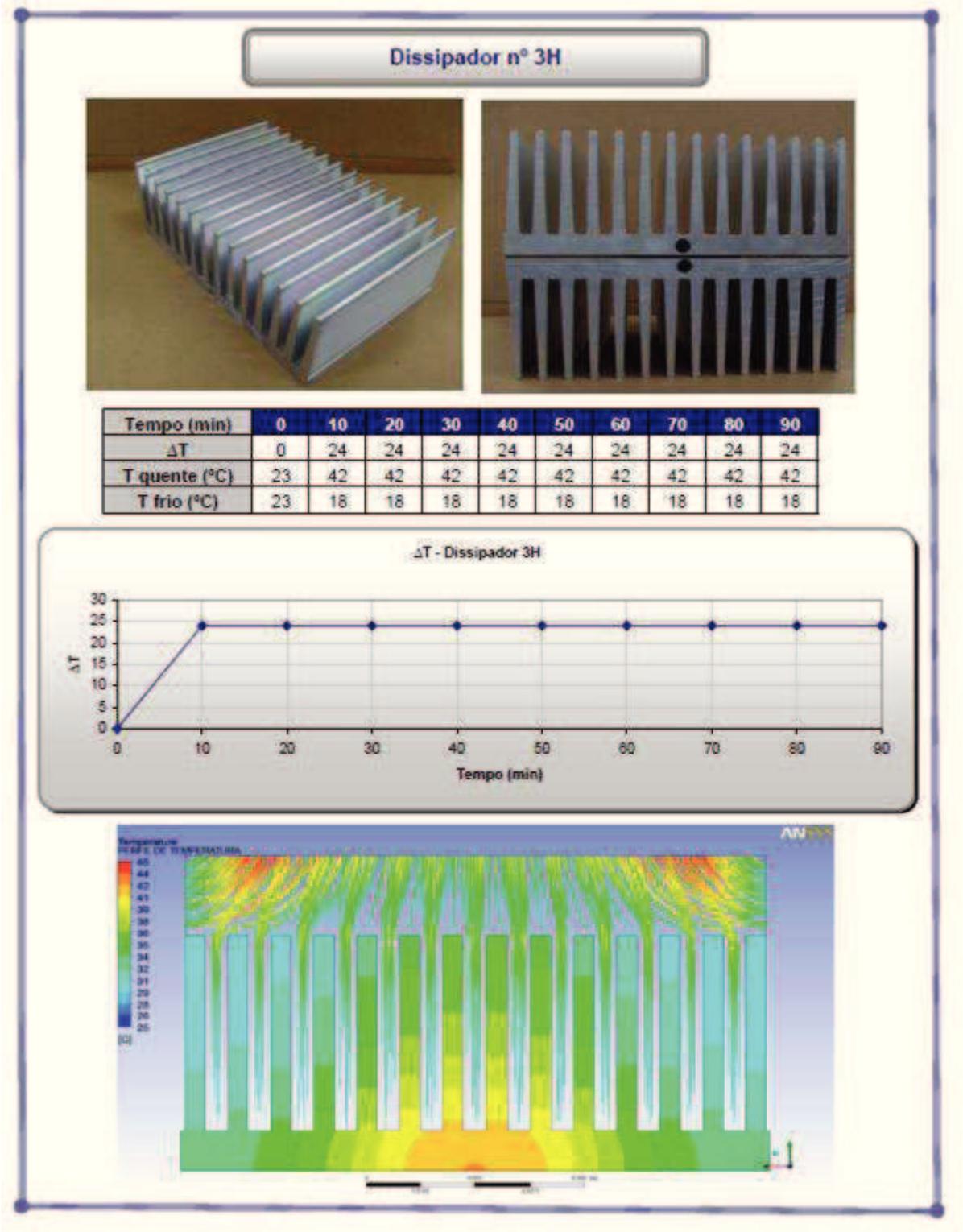


Figura 4.8 – Resultados para o dissipador nº 3H

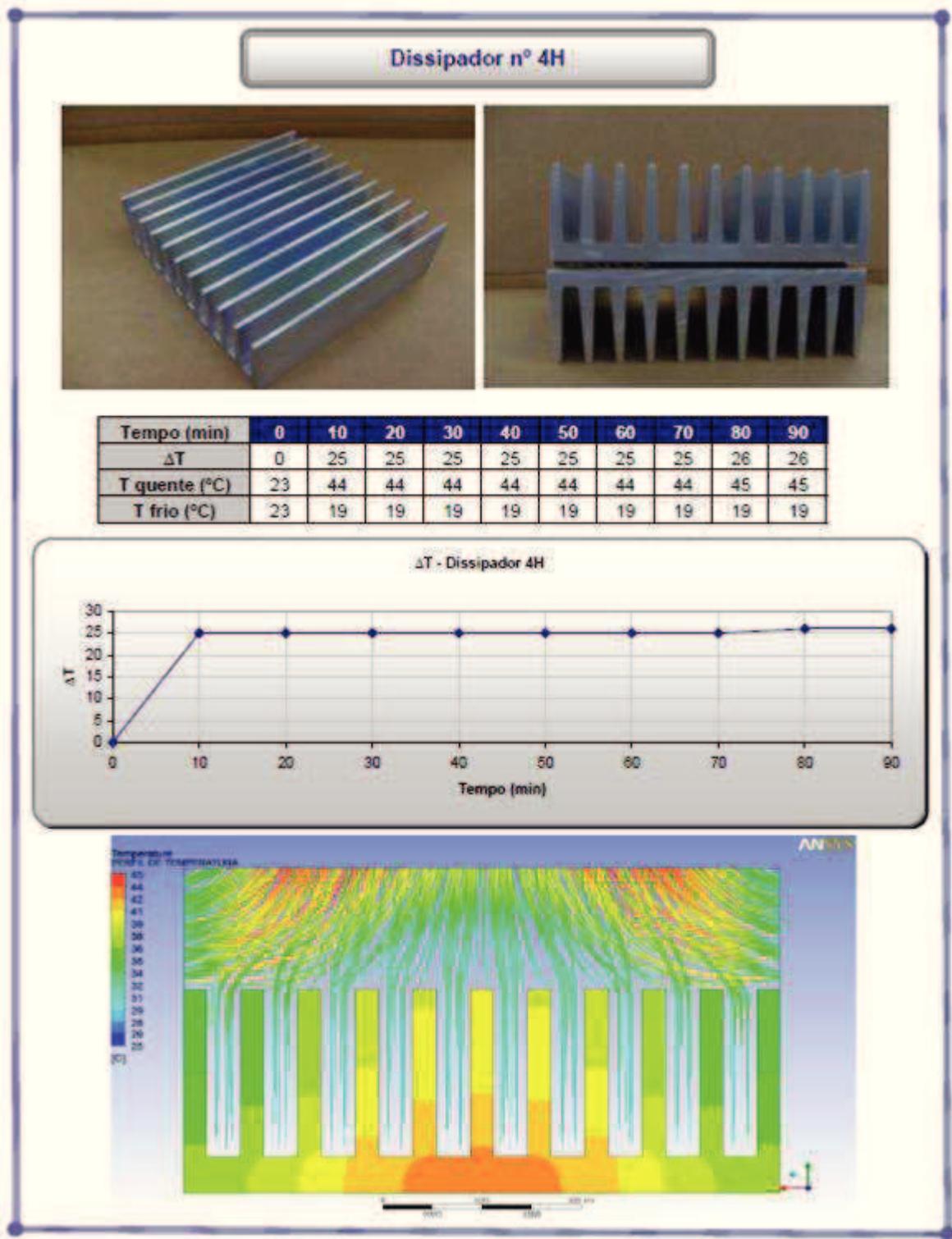


Figura 4.9 – Resultados para o dissipador nº 4H

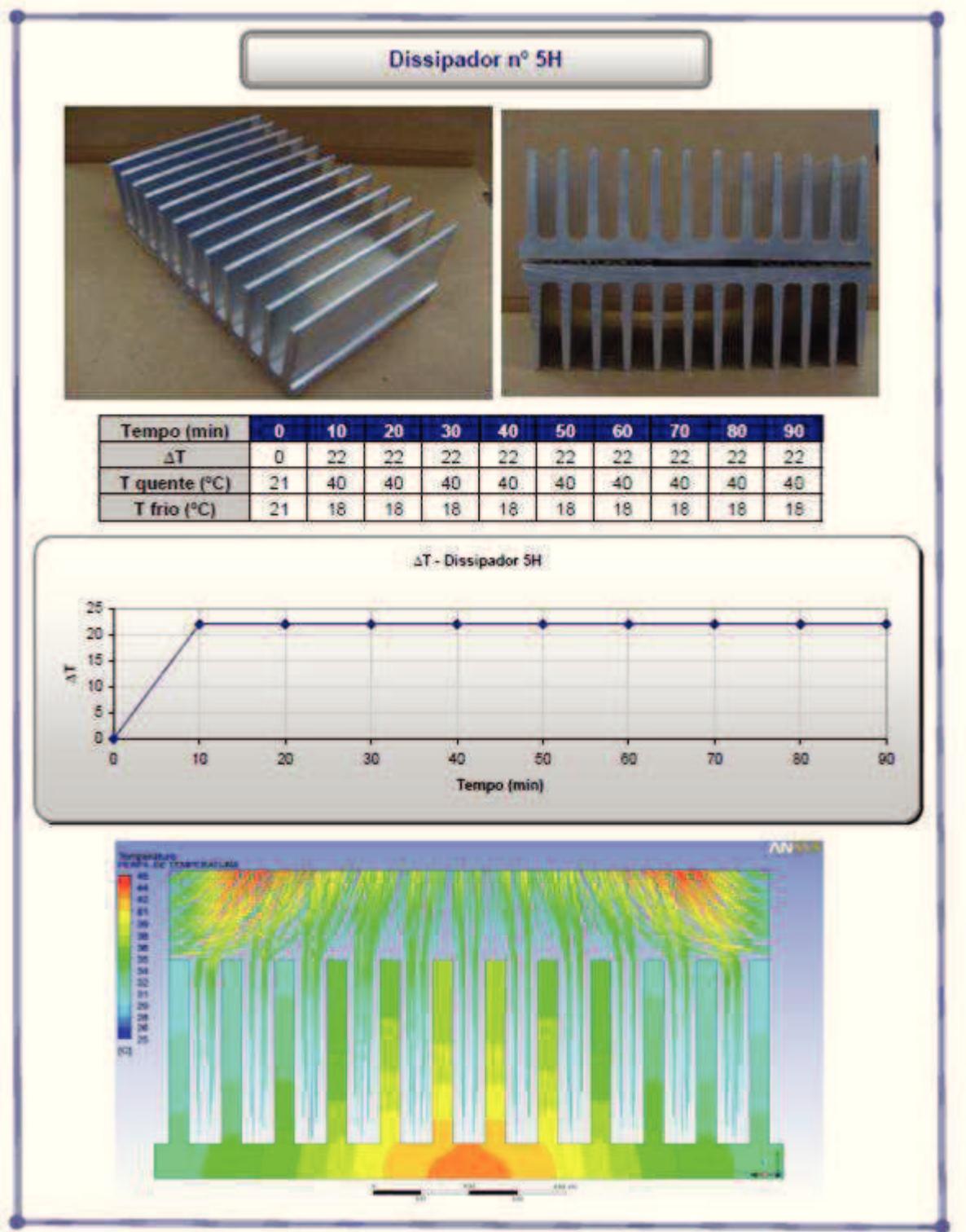


Figura 4.10 – Resultados para o dissipador nº 5H

Avaliando-se os resultados experimentais para os dissipadores de calor 0, 1, 2, 3, 1H, 2H, 3H, 4H e 5H, e de acordo com o gráfico da Figura 4.11, verifica-se que os dissipadores nº 2 e 4H são os que apresentam maiores diferenças de temperatura média entre os lados quente e frio. O dissipador nº 2 também é o que apresenta menor concentração de temperatura elevada ao estudo de simulação computacional. Desta forma, o dissipador nº 2 foi escolhido para utilização no modelo experimental do condicionador de ar, a fim de otimizar a transferência de calor entre os lados quente e frio do módulo termoelétrico.

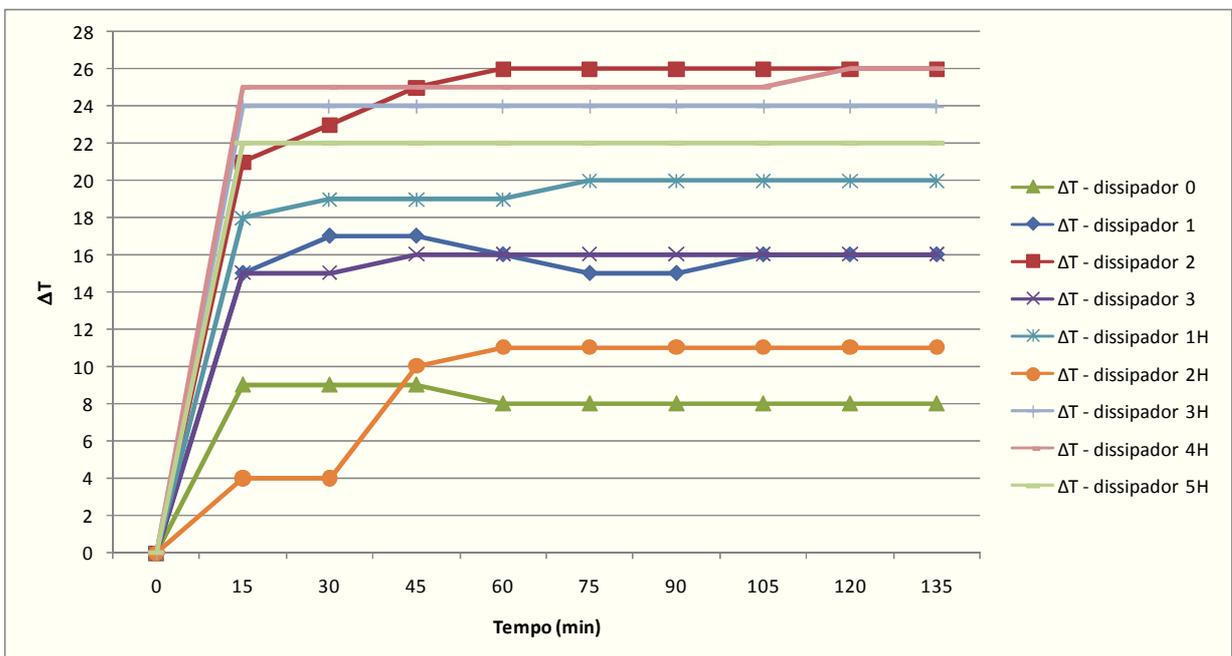


Figura 4.11 – Gráfico Tempo x  $\Delta T$  para todos os dissipadores de calor

## 4.2. MODELO EXPERIMENTAL DO CONDICIONADOR DE AR TERMOELÉTRICO

O protótipo consiste em um conjunto de módulos termoelétricos acoplados fisicamente a dissipadores de calor e a um duto de ar, que deverá ser resfriado. O dissipador de calor do lado quente é feito de alumínio, com 20 aletas, com espaçamento de 10 milímetros e base de 5 milímetros, correspondendo às características do dissipador nº 2 escolhido anteriormente.

Os fluxos de ar frio e quente têm suas velocidades reguláveis. O fluxo de ar frio é controlado por um gerador de fluxo de ar modelo *Marotec 8203-B*. O fluxo de ar quente é mantido constante e as velocidades, tanto do ar quente quanto frio são

medidas por meio de anemômetros *Instrutherm TAFR-180*. A temperatura do ar e a umidade são medidos com termo-higrômetros modelo *Instrutherm HT-210*. A corrente e tensão são medidas com multímetros *Minipa ET-1502* e *ET-2052*. Os módulos termoelétricos são do modelo *TE Technology* 0,04 x 0,04 m e 16,5V. As especificações do módulo são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Especificações do módulo TE Technology 0,04 x 0,04 m

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Figura de Mérito	0,00268 1/K
Condutância Térmica	0,46 W/K
Coefficiente de Seebeck	0,0513 V/°C
Condutividade Térmica	0,151 W/°C m
Resistividade Elétrica	0,00101 Ωcm
Número de associações	127
Resistência total	2,12 Ω

A medição da temperatura das placas é feita com um controlador de temperatura com dois termopares modelo *Gefran 600 220V*. Todo o experimento foi executado com as placas ligadas eletricamente em corrente contínua de 12V, fornecida pela bateria e os módulos foram montados ligados em paralelo.

A bancada experimental é ilustrada pelas foto das Figuras 4.12, 4.13 e 4.14. O esquema gráfico é apresentado na Figura 4.15.

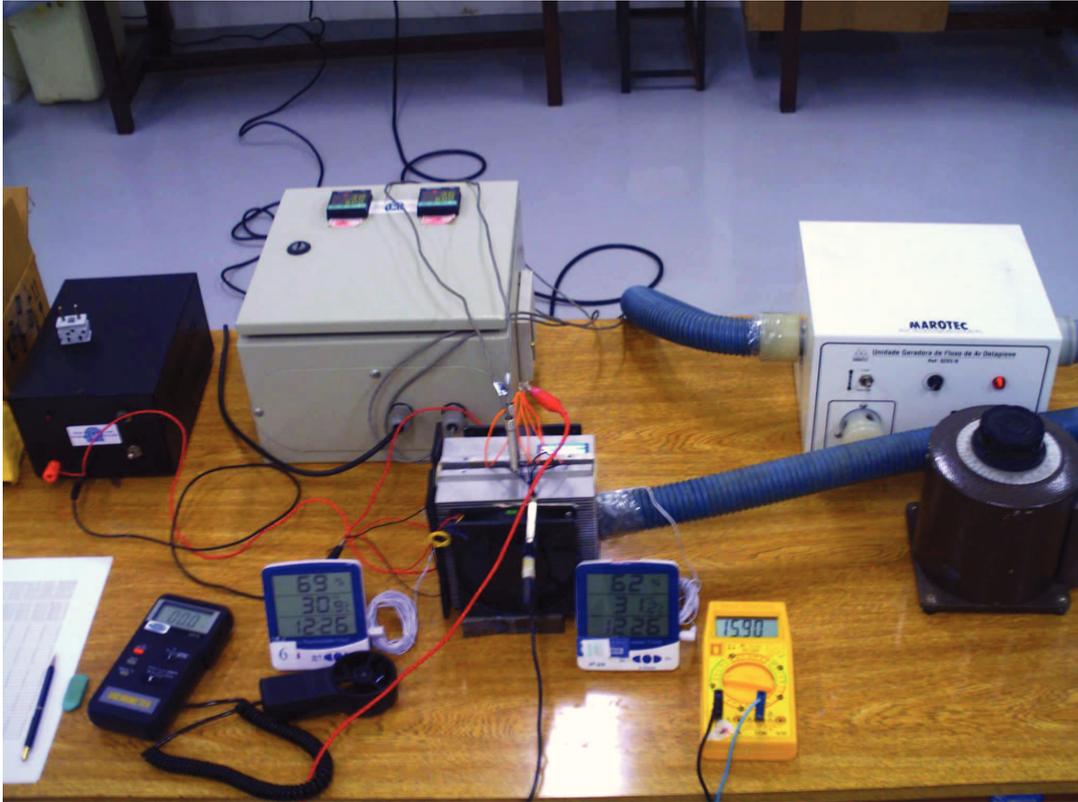


Figura 4.12 – Bancada experimental – Visão geral

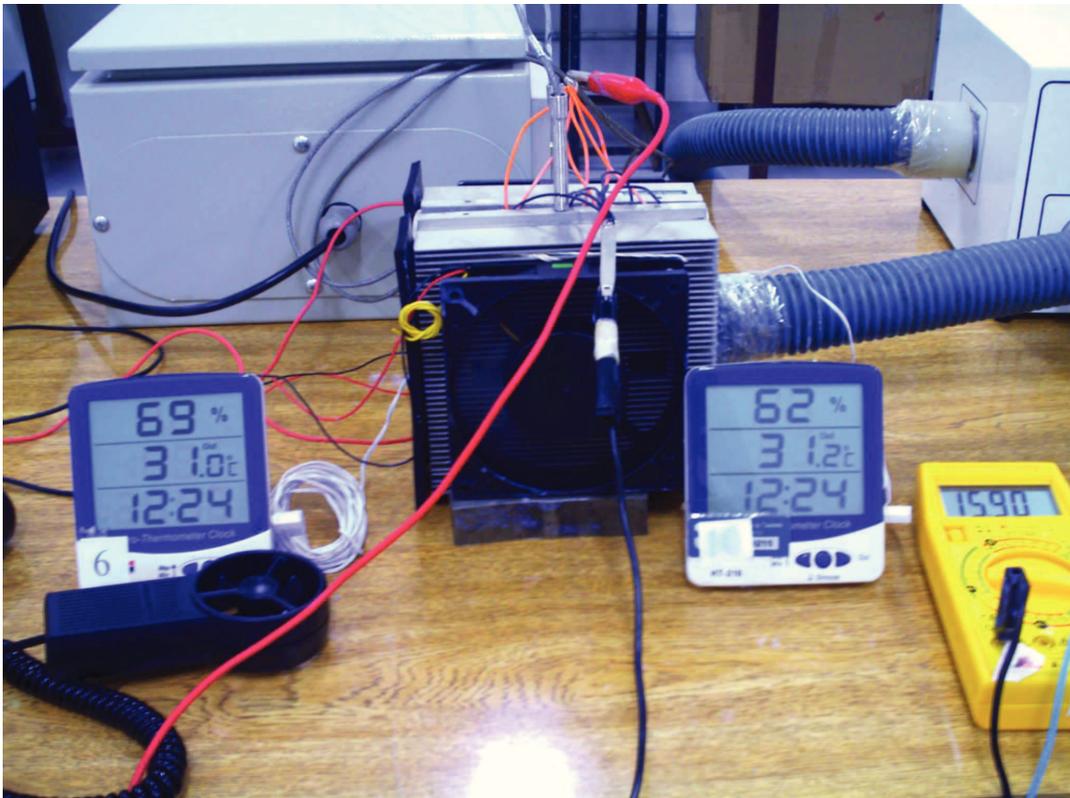


Figura 4.13 – Bancada experimental – Módulos e dissipadores

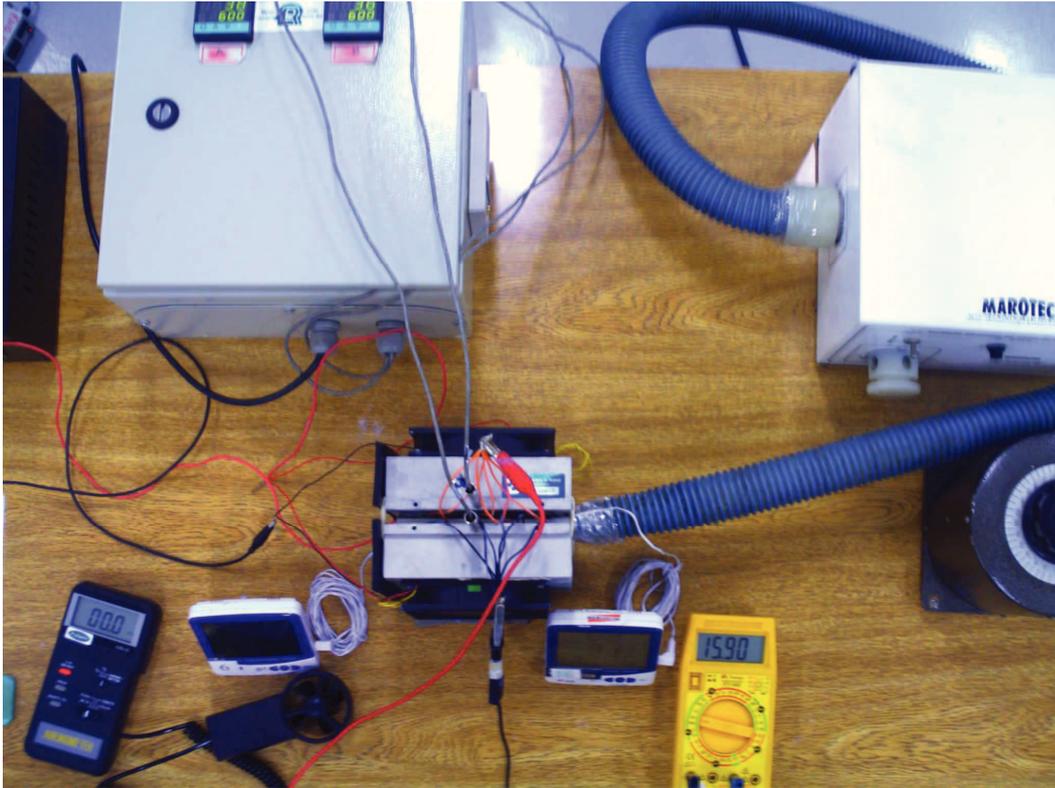


Figura 4.14 – Bancada experimental – Vista superior dos módulos e dissipadores

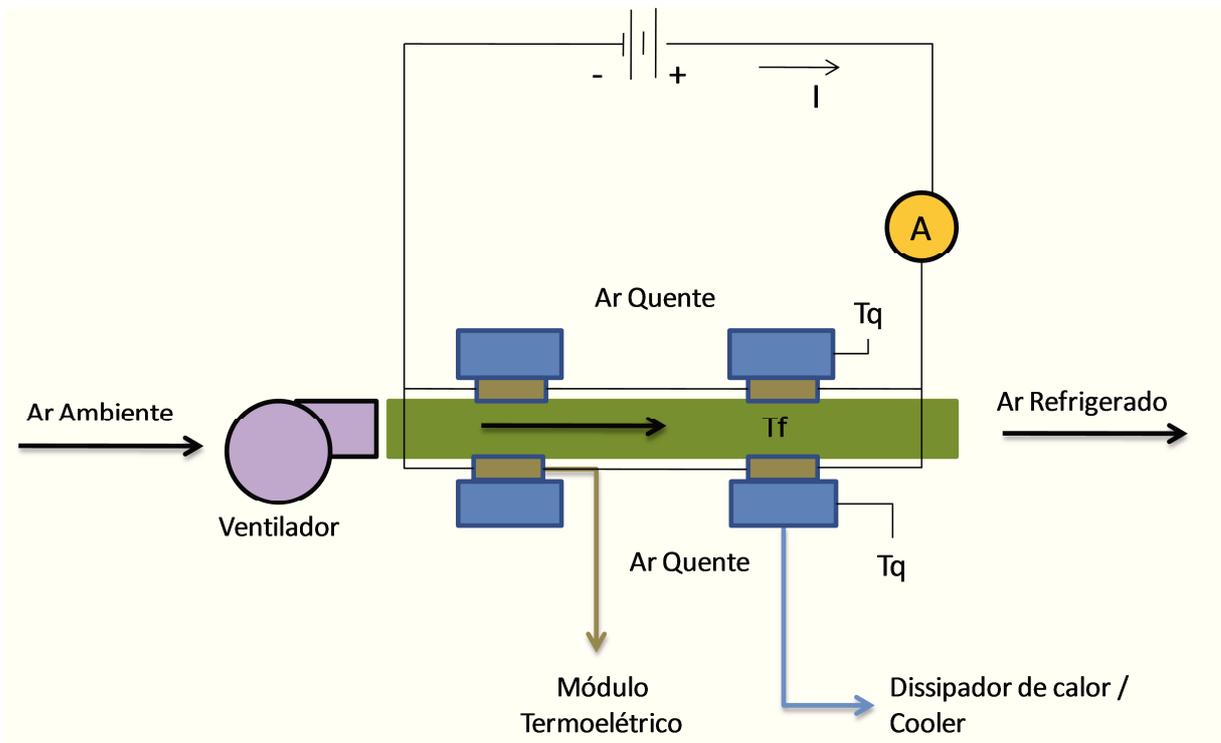


Figura 4.15 – Esquema da bancada experimental com quatro módulos

Quatro séries de testes foram realizadas, cada um com dez medições, a começar com apenas um módulo termoelétrico e, em cada novo conjunto de teste, outro módulo foi acrescentado, ligado em paralelo.

Para cada série, a velocidade do ar no lado quente foi mantida constante e igual a 8 m/s, a velocidade do ar no duto do lado frio foi sendo alterada em 0,5 m/s desde 0,5 m/s até 5 m/s. O gerador de fluxo de ar que recebia tensão controlada através do reostato foi monitorado com auxílio do anemômetro, assim no momento que encerrava uma medição aumentava-se a tensão no reostato até o momento em que o anemômetro registrava 0,5 m/s a mais que a medição anterior. Cada uma das medições foi anotada assim que observou-se constância das temperaturas registradas pelo controlador de temperatura e pelos quatro termo-higrômetros.

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

Foram realizados quatro conjuntos de testes, com um, dois, três e quatro módulos termoelétricos ligados em série. As seguintes grandezas foram monitoradas:

- *Velocidades do ar no lado frio*
  - A medição da velocidade do ar no duto permitiu calcular a vazão mássica de ar  $\dot{m}$ , grandeza necessária para o cálculo da taxa de transferência de calor no lado frio  $Q_f$  (Equação 3.21).
- *Tensão elétrica nos módulos*
  - A tensão elétrica medida nos módulos permitiu o cálculo da potência (Equação 3.10), e conseqüentemente, do COP (Equação 3.13).
- *Corrente elétrica nos módulos*
  - A corrente elétrica medida nos módulos permitiu o cálculo da potência (Equação 3.10), e conseqüentemente, do COP (Equação 3.13).
- *Temperatura do ar na entrada e saída do duto frio*
  - As temperaturas medidas na entrada e saída do duto de ar permitem o cálculo da taxa de transferência de calor no lado frio  $Q_f$  (Equação 3.21).
- *Temperatura na superfície dos dissipadores de calor*
  - As temperaturas nos lados quente e frio dos dissipadores de calor permitiram o cálculo do  $\Delta T$  do módulo e da taxa de transferência de calor do lado frio  $Q_f$  (Equação 3.7).

Os resultados são exibidos graficamente. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 representam os resultados da série com um módulo termoelétrico.

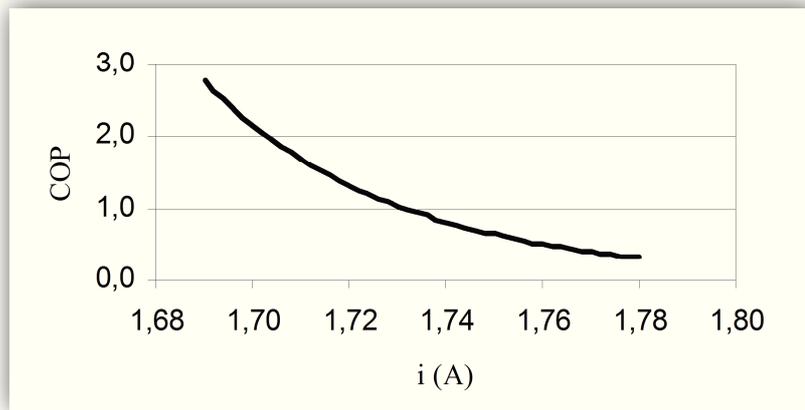


Figura 5.1 - COP em função da corrente elétrica – Um módulo

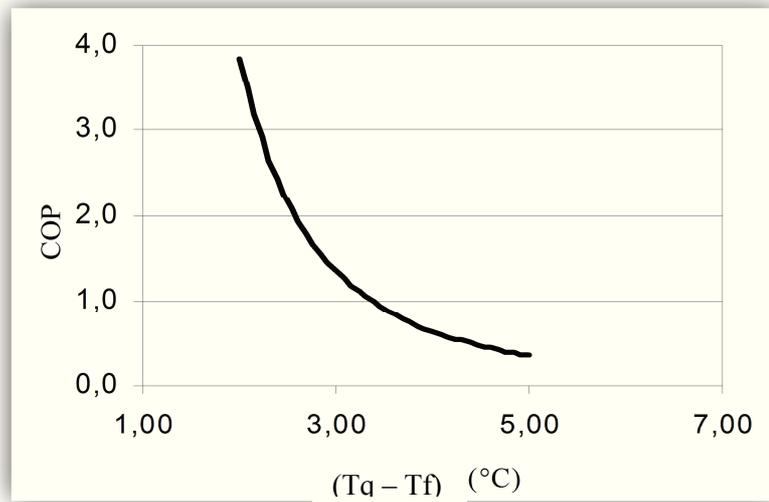


Figura 5.2 - COP em função de  $\Delta T$  da placa termoeétrica – Um módulo

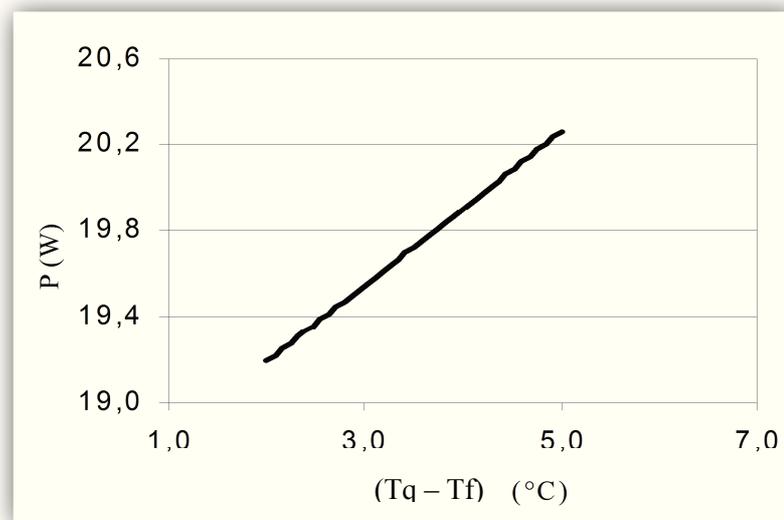


Figura 5.3 - Potência em função de  $\Delta T$  da placa termoeétrica – Um módulo

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 representam os resultados da série com dois módulos termoeétricos.

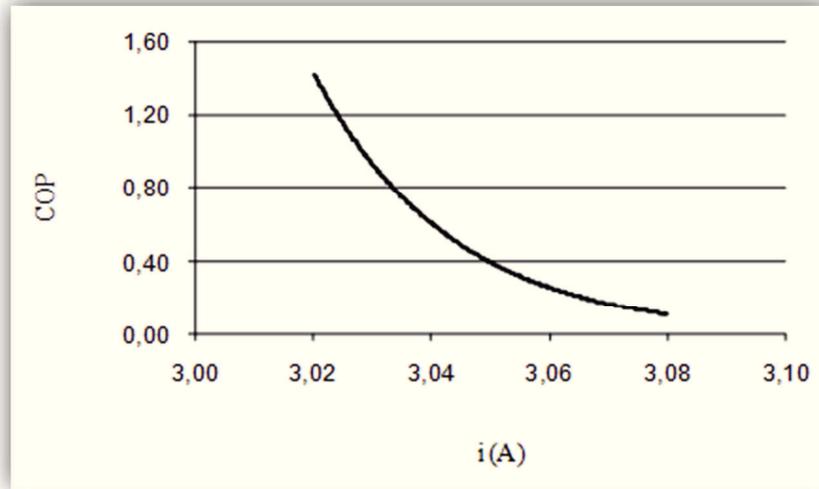


Figura 5.4 - COP em função da corrente elétrica – Dois módulos

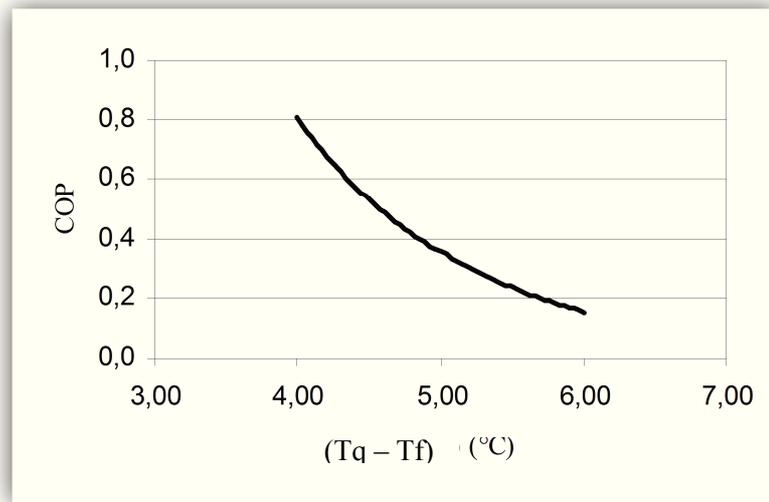


Figura 5.5 - COP em função de  $\Delta T$  da placa termoeétrica – Dois módulos

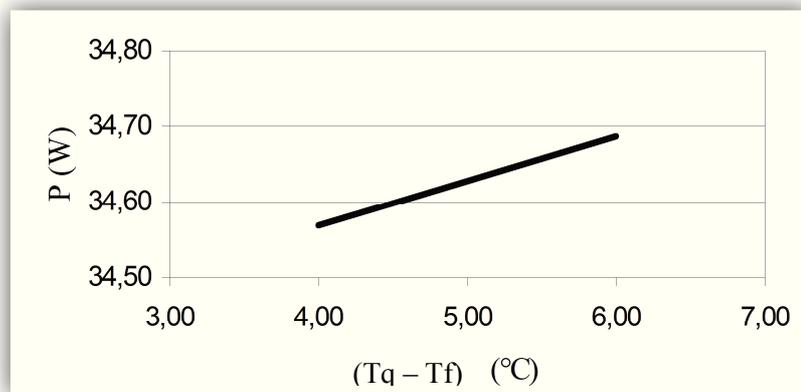


Figura 5.6 - Potência em função de  $\Delta T$  da placa termoeétrica – Dois módulos

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 representam os resultados obtidos com três módulos termoeletricos.

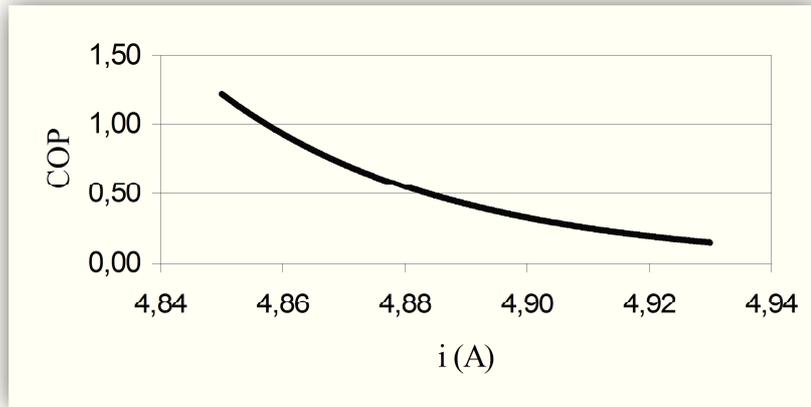


Figura 5.7 - COP em função da corrente elétrica – Três módulos

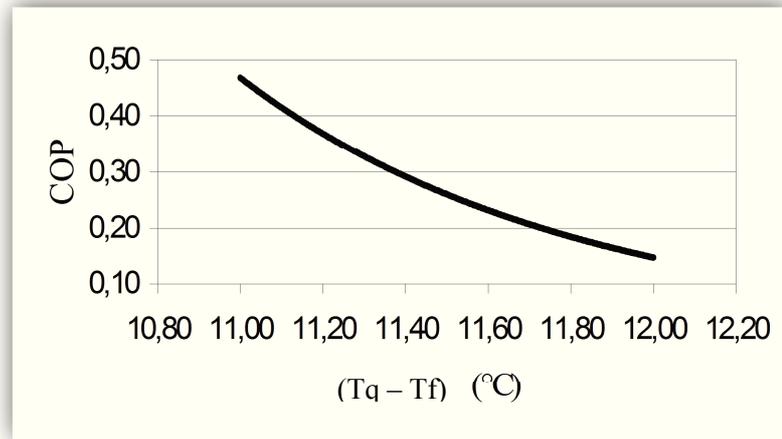


Figura 5.8 - COP em função de  $\Delta T$  da placa termoeletrica – Três módulos

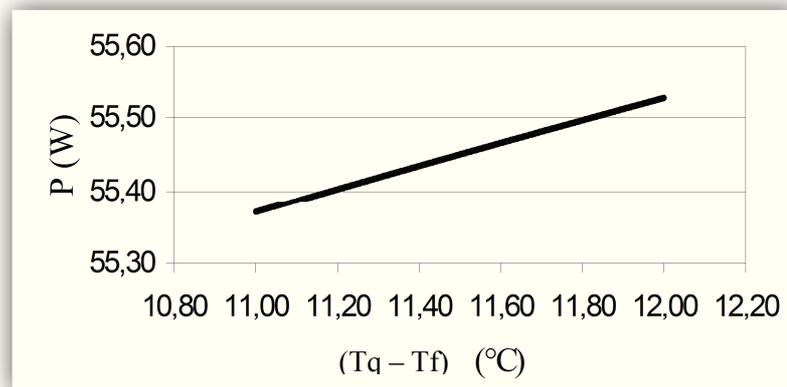


Figura 5.9 - Potência em função de  $\Delta T$  da placa termoeletrica – Três módulos

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 representam os resultados obtidos com quatro módulos termoelétricos.

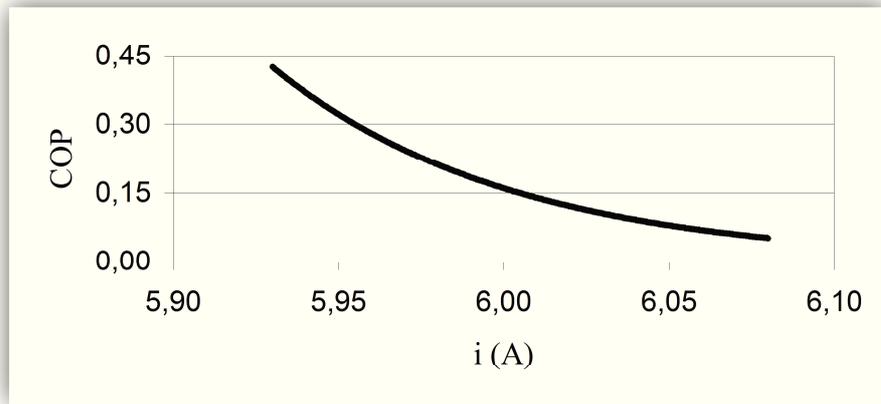


Figura 5.10 - COP em função da corrente elétrica – Quatro módulos

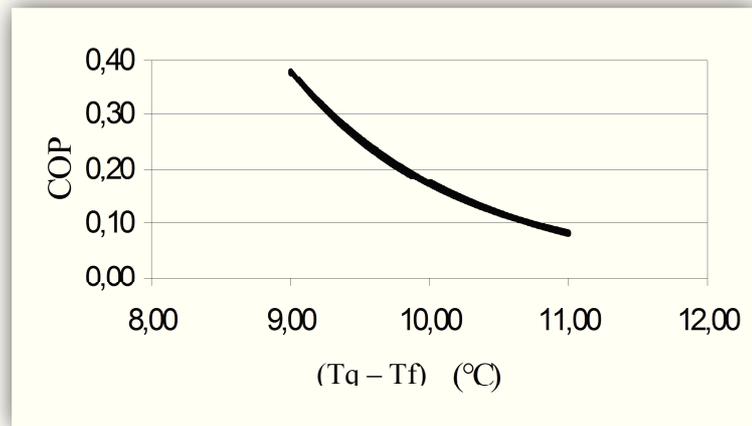


Figura 5.11 - COP em função de  $\Delta T$  da placa termoelétrica – Quatro módulos

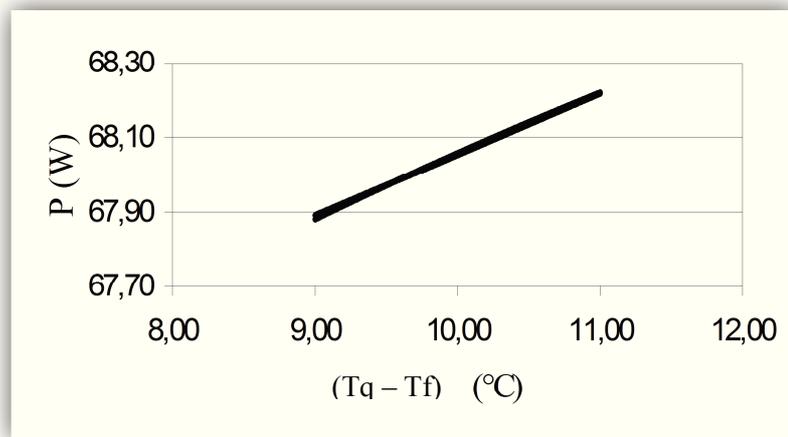


Figura 5.12 - Potência em função de  $\Delta T$  da placa termoelétrica – Quatro módulos

## 5.2. DISCUSSÕES

A partir dos resultados obtidos apresentados, foi avaliado o desempenho do condicionador de ar termoelétrico, tomando por base o modelo teórico e matemático apresentado anteriormente. As Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 a seguir ilustram os gráficos utilizando-se a média aritmética das séries de valores medidos e calculados.

No gráfico da Figura 5.13, verifica-se que o coeficiente de desempenho diminui com o aumento da corrente elétrica. De acordo com a Equação 3.13, o coeficiente de desempenho é o quociente da taxa de remoção de calor do corpo frio pela potência. Sendo a potência diretamente proporcional à corrente elétrica, o aumento da corrente ocasionará a redução do COP, como esperado.

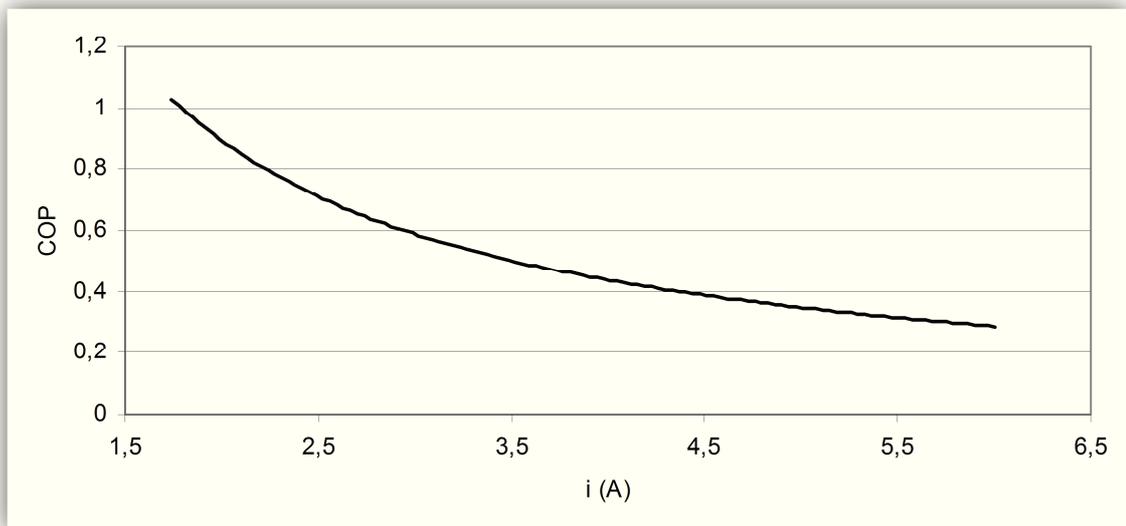


Figura 5.13 - COP em função da corrente elétrica – Média

No gráfico da Figura 5.14, é apresentado o COP em função da diferença de temperatura entre os lados quente e frio do módulo termoelétrico. Pela Equação 3.14, pode-se verificar que o coeficiente de desempenho depende da diferença de temperatura, e será maior com uma diferença de temperatura menor, o que se confirma no gráfico abaixo.

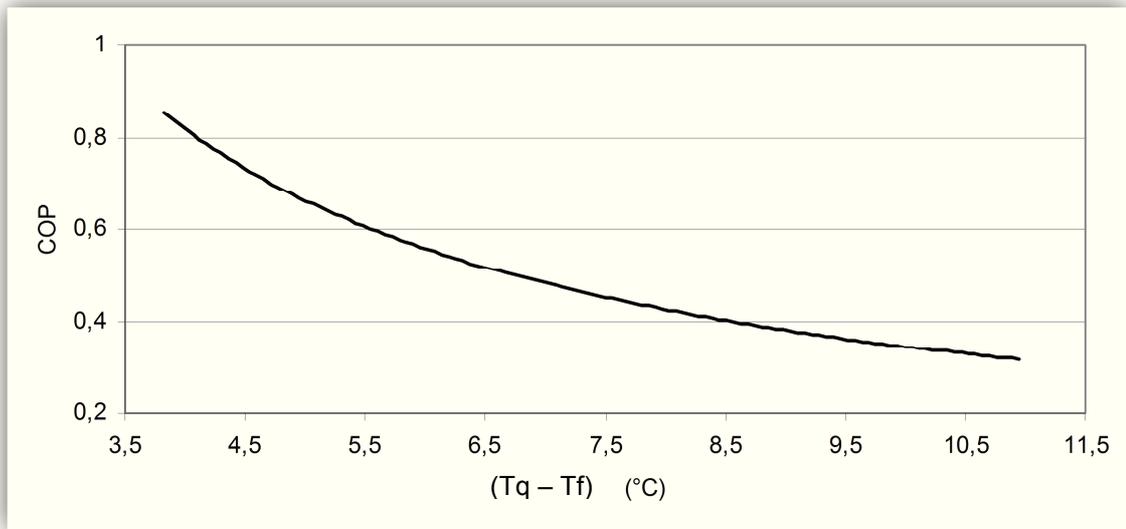


Figura 5.14 - COP em função de  $\Delta T$  das placas termoeletricas – Média

O gráfico da Figura 5.15 apresenta a potência do sistema em função da diferença de temperatura. Conforme a Equação 3.8, a tensão do sistema é dada pela soma das tensões termoeletrica e a tensão Joule. Como a potência está diretamente relacionada à tensão, quanto maior a diferença de temperatura, maior a parcela de tensão termoeletrica, e maior será a potência.

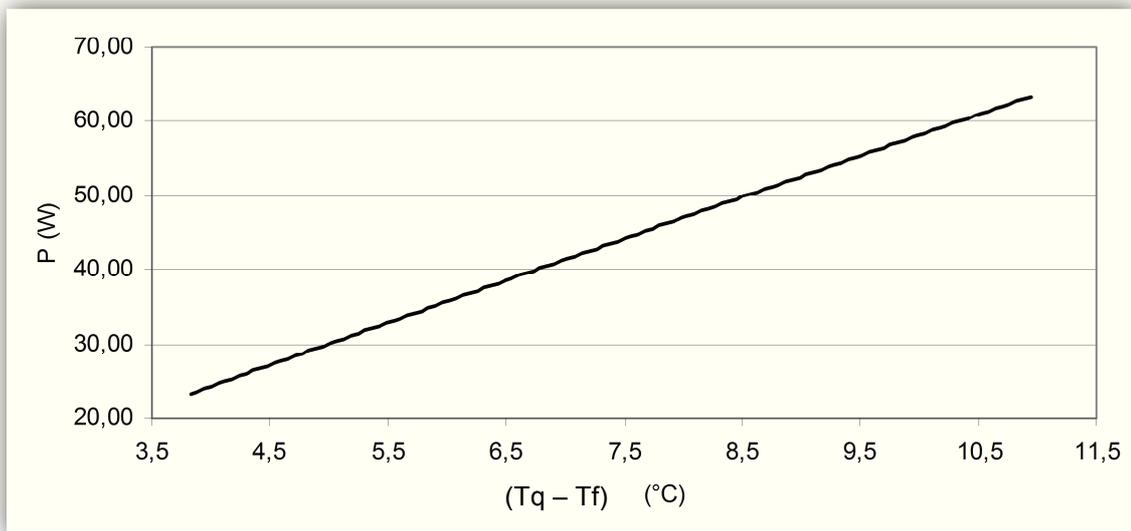


Figura 5.15 - Potência em função de  $\Delta T$  das placas termoeletricas – Média

## **CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **6.1. CONCLUSÃO**

Os sistemas de refrigeração termoelétrica têm sido cada vez mais procurados para resfriamento de componentes eletrônicos e outras aplicações. No ambiente automotivo, espera-se que a utilização de sistemas termoelétricos possa proporcionar a redução de emissões e impacto ambiental, maior eficiência do combustível e maior desenvolvimento do mercado de eletrônica.

Nos ensaios experimentais, observou-se que os parâmetros mais importantes para a análise do desempenho de um sistema termoelétrico para condicionamento de ar são a taxa de bombeamento de calor, a diferença de temperatura entre as placas do lado quente e do lado frio do módulo termoelétrico e o coeficiente de desempenho (COP).

O protótipo implementado mostrou-se capaz de reproduzir, de maneira bastante aproximada, o comportamento do sistema de refrigeração termoelétrica e os dados obtidos apresentaram concordância com a teoria apresentada por Heikes & Ure Junior, apesar de cada aplicação do sistema possuir peculiaridades (geométricas e funcionais) que devem ser consideradas em sua análise.

Conclui-se que a tecnologia estudada traz resultados promissores quanto ao objetivo almejado. Maiores investimentos em pesquisa e desenvolvimento para esta tecnologia podem trazer novos materiais com maior potencial termoelétrico e mais avançados, de modo a viabilizar economicamente e aperfeiçoar a sua aplicação neste campo.

## **6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir do trabalho desenvolvido, sugere-se o aprofundamento de estudos no tema, e alguns novos trabalhos podem ser desenvolvidos, dentre eles:

- Modelagem computacional do sistema de refrigeração, conectado ao sistema de geração termoelétrica automotiva, de maneira a possibilitar que virtualmente possam ser feitas alterações na configuração e montagem do sistema, e verificar de forma mais rápida e com menos custos quais configurações têm maior probabilidade de êxito para montagem de protótipos.
- Montagem de modelo experimental utilizando o ambiente veicular, para confirmar resultados obtidos em bancada de testes.
- Conexão do refrigerador a um gerador termoelétrico que utiliza como fonte de energia o calor dos gases de exaustão do veículo.

## REFERÊNCIAS

- ADEYANJU, A. A; COMPTON, W., **Theoretical Determination of a Thermoelectric Module and Heat Sinks Sizing**. International Journal of Electrical and Power Engineering. Vol 4. 2010. Pag 66-72
- ALVES, E. O., **Propriedades Físicas do Semicondutor  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$** . Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2007. 132p.
- BELL, L. E., **Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems**. Science magazine. Vol 321. 2008. Pag 1457-1461
- CAMARGO, J. R.; OLIVEIRA, M. C. C.; GODOY JUNIOR, E., **Experimental Performance of Thermoelectric modules applied to Air Conditioning**. 12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences. 2008
- CAMARGO, J. R.; OLIVEIRA, M. C. C., **Projeto de um Condicionador de Ar automotivo Peltier-Seebeck auto-sustentável**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2010
- CATÁLOGO MELCOR (Trenton, USA)., **Thermoelectric Cooler HT4-12-14**. USA. 2010. 4p.
- COSNIER, M.; FRAISSE, G.; LUO, L., **An Experimental and Numerical Study of a Thermoelectric Air-cooling and Air-heating System**. International Journal of Refrigeration. Vol 31. 2008. Pag 1051–1062.
- DU, C.; WEN, C., **Experimental Investigation and Numerical Analysis for One-Stage Thermoelectric Cooler Considering Thomson Effect**. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Pag 4875-4884

FARIAS, R. M.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O., **Numerical Study of Reservoir Cooling by Means of Peltier Effect**. Revista Vetor. Rio Grande. Vol 18. 2008. Pag. 56-66

FARIAS, S. R. A., **Protótipo de um Microgerador Termoelétrico de Estado Sólido: Cogeração a Gás**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009. 98p.

GUERRA, W. A., **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. Monografia de Especialização da Universidade Federal de Pernambuco. 2009. 40p.

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

JUGSUJINDA, S.; VORA-UD, A.; SEETAWAN, T., **Analyzing of Thermoelectric Refrigerator Performance**. Procedia Engineering. Vol 8. 2010. Pag 154-159

KARIMI, G.; CULHAM, J. R.; KAZEROUNI, V., **Performance Analysis of Multi-Stage Thermoelectric Coolers**. International Journal of Refrigeration. 2011. Pag 2129-2135

MARTÍNEZ, A.; ASTRAIN, D.; RODRÍGUEZ, A., **Experimental and Analytical Study on Thermoelectric Self Cooling Devices**. Energy Journal. 2011. Pag 5250-5260

MOURA, J. A. S., **Filmes Nanométricos de FeN e AlN Crescidos por Puttering e Aplicações do Efeito Peltier**. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2010. 124p.

NOGUEIRA, E., **Análise de Desempenho e Proposta de controle de um Sistema Termoelétrico para Condicionamento de Ar**. Dissertação de Mestrado da Universidade de Taubaté – Unitau. 2005. 86p.

RIFFAT, S. B., OMER, S. A.; XIAOLI, M. A., **A Novel Thermoelectric Refrigeration System Employing Heat Pipes and a Phase Change Material: An Experimental Investigation**. Renewable Energy. Vol 23. 2001. Pag 313-323.

SILVA, R. E., **Análise e Otimização de um Sistema Termoelétrico para Condicionamento de Ar** . Dissertação de Mestrado da Universidade de Taubaté - Unitau. 2010. 65 p.

SOFRATA, H., **Heat Rejection Alternatives For Thermoelectric Refrigerators**. Energy Convers Manage. Vol 37. 1996. Pag 269-280.

SOUZA, D. H. C., **Otimização do Uso de Refrigeradores Termoelétricos em Processos de Refrigeração**. Projeto de Graduação da Universidade de Brasília. 2007. 61 p.

TAVERA, J. E. M., **Estudio Del Comportamiento de Un Sistema de Refrigeración Mecánico Utilizando un Módulo Termoelétrico como Intercambiador**. Tesis de Ingeniería Mecánica do Instituto Politécnico Nacional. México. 2006. 114 p.

VIÁN , J.G.; ASTRAIN, D., **Development of a Heat Exchanger for the Cold Side of a Thermoelectric Module**. Applied Thermal Engineering. Vol 28. 2008. Pag 1514-1521

YANG, B.; AHUJA, H.; TRAN, T.N., **Thermoelectric Technology Assessment**. HVAC&R Reserch. Vol 14. N° 5. 2008. Pag 635-653

## APÊNDICE A – Tabelas de Medições de dados do Experimento

### EXPERIMENTO COM UM MÓDULO

Velocidade média do ar frio (m/s)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$T_q$ (°C)	25,00	25,00	25,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	27,00
$T_f$ (°C)	20,00	20,00	21,00	21,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	23,00
T saída - $T_{qs}$ (°C)	24,30	24,50	24,80	24,90	25,10	25,20	25,30	25,50	25,50	25,80
T entrada - $T_{fe}$ (°C)	23,70	23,90	24,30	24,40	24,60	24,30	25,00	25,10	25,30	25,60
T saída - $T_{fs}$ (°C)	21,90	22,30	22,60	22,80	23,00	23,20	23,50	23,70	23,90	24,20
I (A)	1,78	1,78	1,77	1,77	1,76	1,76	1,76	1,75	1,75	1,75
Tensão elétrica (V)	11,37	11,37	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$\dot{m}_f$ (kg/s)	0,00140	0,00281	0,00421	0,00562	0,00702	0,00842	0,00983	0,01123	0,01264	0,01404
$Q_f$ (W) (eq. 3.21)	2,53731	4,51077	7,18904	9,02154	11,27693	9,30347	14,80097	15,78770	17,76116	19,73462
Potência (W) (eq. 3.10)	20,23860	20,23860	20,14260	20,14260	20,02880	20,02880	20,02880	19,91500	19,91500	19,91500
COP (eq. 3.13)	0,12537	0,22288	0,35691	0,44788	0,56304	0,46450	0,73898	0,79275	0,89185	0,99094
$(T_q - T_f)$ (°C)	5,00	5,00	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

### EXPERIMENTO COM DOIS MÓDULOS

Velocidade média do ar frio (m/s)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$T_q$ (°C)	26,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	28,00	28,00
$T_f$ (°C)	21,00	21,00	22,00	22,00	22,00	22,00	23,00	23,00	23,00	23,00
T saída - $T_{qs}$ (°C)	25,10	25,40	25,40	25,70	25,80	26,00	26,00	26,10	26,30	26,40
T entrada - $T_{fe}$ (°C)	23,80	24,00	24,20	24,50	24,90	25,00	25,10	25,30	25,40	25,60
T saída - $T_{fs}$ (°C)	22,40	22,60	22,70	23,00	23,30	23,40	23,60	23,70	23,90	24,00
I (A)	3,08	3,07	3,07	3,07	3,05	3,06	3,06	3,05	3,04	3,04
Corrente elétrica individual(A)	(1,78;1,35)	(1,76;1,34)	(1,77;1,33)	(1,76;1,32)	(1,75;1,30)	(1,75;1,33)	(1,76;1,34)	(1,75;1,34)	(1,75;1,36)	(1,75;1,35)
Tensão elétrica (V)	11,33	11,33	11,33	11,34	11,34	11,34	11,35	11,35	11,35	11,36
$\dot{m}_f$ (kg/s)	0,00140	0,00281	0,00421	0,00562	0,00702	0,00842	0,00983	0,01123	0,01264	0,01404
$Q_f$ (W) (eq. 3.21)	1,97346	3,94692	6,34327	8,45770	11,27693	13,53231	14,80097	18,04308	19,02982	22,55386
Potência (W) (eq. 3.10)	34,89640	34,78310	34,78310	34,81380	34,58700	34,70040	34,73100	34,61750	34,50400	34,53440
COP (eq. 3.13)	0,05655	0,11347	0,18237	0,24294	0,32605	0,38998	0,42616	0,52121	0,55152	0,65308
$(T_q - T_f)$ (°C)	5,00	6,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00

### EXPERIMENTO COM TRÊS MÓDULOS

Velocidade média do ar frio (m/s)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$T_q$ (°C)	28,00	28,00	28,00	28,00	29,00	29,00	29,00	29,00	30,00	30,00
$T_f$ (°C)	16,00	16,00	17,00	17,00	17,00	17,00	18,00	18,00	19,00	19,00
T saída - $T_{qs}$ (°C)	25,80	26,00	26,20	26,20	26,60	26,80	27,00	27,20	27,30	27,50
T entrada - $T_{fe}$ (°C)	23,30	23,60	23,80	24,00	24,20	24,40	24,60	24,80	25,10	25,30
T saída - $T_{fs}$ (°C)	21,00	21,40	21,60	22,00	22,20	22,50	22,70	23,10	23,40	23,60
I (A)	4,91	4,92	4,92	4,93	4,92	4,91	4,90	4,90	4,89	4,88
Corrente elétrica individual(A)	(1,49;1,85;1,73)	(1,48;1,83;1,73)	(1,49;1,83;1,73)	(1,50;1,82;1,73)	(1,50;1,82;1,73)	(1,49;1,82;1,74)	(1,49;1,82;1,72)	(1,49;1,81;1,73)	(1,49;1,81;1,71)	(1,50;1,82;1,71)
Tensão elétrica (V)	11,29	11,29	11,29	11,30	11,30	11,31	11,31	11,31	11,32	11,32
$\dot{m}_f$ (kg/s)	0,00140	0,00281	0,00421	0,00562	0,00702	0,00842	0,00983	0,01123	0,01264	0,01404
$Q_f$ (W) (eq. 3.21)	3,24212	6,20231	9,30347	11,27693	14,09616	16,06962	18,74789	19,17078	21,56712	23,96347
Potência (W) (eq. 3.10)	55,43390	55,54680	55,54680	55,70900	55,59600	55,53210	55,41900	55,41900	55,35480	55,24160
COP (eq. 3.13)	0,05849	0,11166	0,16749	0,20243	0,25355	0,28938	0,33829	0,34592	0,38962	0,43379
$(T_q - T_f)$ (°C)	12,00	12,00	11,00	11,00	12,00	12,00	11,00	11,00	11,00	11,00

## EXPERIMENTO COM QUATRO MÓDULOS

Velocidade média do ar frio (m/s)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$T_q$ (°C)	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00	28,00	29,00	29,00	30,00	30,00
$T_f$ (°C)	18,00	18,00	18,00	18,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
T saída - $T_{qs}$ (°C)	26,10	26,40	26,20	26,30	26,50	26,30	27,00	27,20	27,70	27,60
T entrada - $T_{fe}$ (°C)	23,50	23,60	23,70	24,00	24,30	24,40	24,60	24,90	25,20	25,20
T saída - $T_{fs}$ (°C)	22,60	22,90	22,90	23,10	23,30	23,40	23,60	23,90	24,10	24,10
I (A)	6,08	6,03	5,98	6,01	5,99	6,02	6,03	6,01	6,01	6,02
Corrente elétrica individual(A)	(1,43;1,80;1,73;1,31)	(1,39;1,80;1,73;1,31)	(1,37;1,75;1,70;1,30)	(1,41;1,77;1,75;1,32)	(1,41;1,77;1,69;1,31)	(1,44;1,77;1,70;1,31)	(1,45;1,77;1,70;1,31)	(1,43;1,76;1,70;1,32)	(1,42;1,77;1,70;1,30)	(1,45;1,78;1,70;1,32)
Tensão elétrica (V)	11,30	11,31	11,30	11,32	11,30	11,32	11,32	11,32	11,32	11,33
$\dot{m}_f$ (kg/s)	0,00140	0,00281	0,00421	0,00562	0,00702	0,00842	0,00983	0,01123	0,01264	0,01404
$Q_f$ (W) (eq. 3.21)	1,26865	1,97346	3,38308	5,07462	7,04808	8,45770	9,86731	11,27693	13,95520	15,50578
Potência (W) (eq. 3.10)	68,70400	68,19930	67,57400	68,03320	67,68700	68,14640	68,25960	68,03320	68,03320	68,20660
COP (eq. 3.13)	0,01847	0,02894	0,05006	0,07459	0,10413	0,12411	0,14456	0,16576	0,20512	0,22734
$(T_q - T_f)$ (°C)	11,00	11,00	11,00	11,00	10,00	9,00	10,00	10,00	11,00	11,00

## MÉDIA

Velocidade média do ar frio (m/s)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$T_q$ (°C)	27,00	27,25	27,25	27,50	27,75	27,50	27,75	27,75	28,50	28,75
$T_f$ (°C)	18,75	18,75	19,50	19,50	20,00	20,00	20,50	20,50	20,75	21,00
T saída - $T_{qs}$ (°C)	25,33	25,58	25,65	25,78	26,00	26,08	26,33	26,50	26,70	26,83
T entrada - $T_{fe}$ (°C)	23,58	23,78	24,00	24,23	24,50	24,53	24,83	25,03	25,25	25,43
T saída - $T_{fs}$ (°C)	21,98	22,30	22,45	22,73	22,95	23,13	23,35	23,60	23,83	23,98
I (A)	3,96	3,95	3,94	3,95	3,93	3,94	3,94	3,93	3,92	3,92
Tensão elétrica (V)	11,32	11,33	11,33	11,34	11,33	11,34	11,34	11,34	11,34	11,35
$\dot{m}_f$ (kg/s)	0,00140	0,00281	0,00421	0,00562	0,00702	0,00842	0,00983	0,01123	0,01264	0,01404
$Q_f$ (W) (eq. 3.21)	2,25539	4,15837	6,55471	8,45770	10,92452	11,84077	14,55429	16,06962	18,07833	20,43943
Potência (W) (eq. 3.10)	44,86541	44,73375	44,56388	44,71658	44,52690	44,64141	44,65125	44,53785	44,49096	44,51057
COP (eq. 3.13)	0,05027	0,09296	0,14709	0,18914	0,24535	0,26524	0,32595	0,36081	0,40634	0,45920
$(T_q - T_f)$ (°C)	8,25	8,50	7,75	8,00	7,75	7,50	7,25	7,25	7,75	7,75

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

Leticia Borges Silverio

Taubaté, Dezembro de 2012.