

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

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR EM
ESCALA REDUZIDA UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Everlise Maestrelli

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2015

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

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR
UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Everlise Maestrelli
Engenheira Eletricista

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2015

EVERLISE MAESTRELLI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR
UTILIZANDO MÓDULOS TERMOELÉTRICOS**

**Esta dissertação foi julgada adequada para
obtenção do título de Mestre em Engenharia,
área de concentração em Processos de
Fabricação, e aprovada em sua forma final,
pelo orientador e pela Banca Examinadora
do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalurgia e
Materiais.**

**Prof. Dr. Ing. Lírío Schaeffer
Orientador**

**Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M**

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias – FEEVALE _____

Dr. Eng. Alexandre Polozine – UFRGS _____

Dr. Eng. Oswaldo Hideo Ando Jr. – UNILA _____

À minha mãe, Liria Teresinha, por todo o amor, dedicação, sacrifício, ensinamentos, apoio e exemplos em toda a trajetória de minha vida.

Ao meu esposo, Anderson por todo amor, carinho, apoio e paciência ao longo de todos esses anos.

Á Deus, pois sem ele nada teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais esta etapa de minha realização pessoal.

Ao professor Dr. Ing. Lírío Schaeffer por ter por meio de sua orientação possibilitado a finalização deste trabalho. Aos professores Dr. Oswaldo Hideo Ando Jr. e Dr. Alexandre Polozine que foram responsáveis pela revisão deste trabalho, bem como a todos os professores do programa de pós-graduação.

Aos colegas que de alguma forma contribuíram para o enriquecimento das informações contidas nesta dissertação.

Aos colegas de trabalho da SATC, instituição onde sou professora, pelo estímulo a realização do mestrado frente a melhoria contínua do meu crescimento pessoal, profissional, bem como do processo institucional.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	15
1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO	16
1.3 CONTRIBUIÇÕES DO PROJETO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS TERMOELÉTRICOS.....	20
2.1.1 Efeito Seebeck	22
2.1.2 Efeito Peltier	24
2.1.3 Efeito Thomson.....	26
2.2 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS	26
2.2.1 Características e Funcionamento dos Módulos Peltier	26
2.2.2 Vantagens dos Módulos Peltier	29
2.2.3 Desvantagens dos Módulos Peltier	29
2.3 APLICAÇÕES DOS MATERIAIS TERMOELÉTRICOS	30
2.3.1 Refrigeração.....	30
2.4 CONDICIONADORES DE AR CONVENCIONAIS	34
2.4.1 Funcionamento dos Condicionadores de Ar Convencionais	34
2.4.2 Condicionador de Ar Tipo Janela	37
2.4.3 Condicionador de Ar Tipo Split.....	38
2.5 CARGA TÉRMICA	38
2.5.1 Carga Ativa.....	38
2.5.2 Carga Passiva.....	39
2.6 ESTUDOS NA ÁREA DE CONDICIONAMENTO DE AR COM MÓDULOS	

TERMOELÉTRICOS	41
2.6.1 Aplicação de Módulos Termoelétricos para Condicionamento de Ar	41
2.6.2 Melhoria na Eficiência Energética de um Refrigerador Termoelétrico: Controle Preditivo Baseado em Modelo Aplicado à Regulação de Temperatura do Reservatório de Água Gelada	43
2.6.3 Análise de um Condicionador de Ar Automotivo Utilizando o Efeito Termoelétrico	44
2.6.4 Aquecimento, Resfriamento e controle de Temperatura de um Ambiente Fechado Utilizando Células Peltier	45
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	47
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO	49
3.1.1 Módulo de Circulação e Refrigeração do ar	49
3.1.2 Ambiente a ser refrigerado	53
3.1.3 Conduto de recirculação do ar	53
3.1.4 Sistema Eletrônico de Controle e Suprimento	54
3.1.5 Software LabVIEW	58
3.2 VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO	59
3.2.1 Primeira metodologia de validação	59
3.2.2 Segunda metodologia de validação	61
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	64
4.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA VALIDAÇÃO	66
4.2 RESULTADOS DA SEGUNDA VALIDAÇÃO	69
4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
4.3.1 Análise e discussão dos resultados com protótipo em escala de concepção	72
4.3.2 Análise e discussão dos resultados extrapolando os resultados para escala real de aplicação	77
5. CONCLUSÃO	79
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	80
6. REFERENCIAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Síntese esquemática da organização da dissertação.....	17
Figura 1.2 - Trabalhos sobre termoeletricidade desenvolvido no LdTM.	19
Figura 2.1 – Esquemático de um módulo termoelétrico [6].	21
Figura 2.2 – Esquema físico de um módulo termoelétrico [8].	22
Figura 2.3 - Tensão gerada pelo aquecimento (A) e corrente circulando na carga (B) [10].	22
Figura 2.4 - Ilustração do efeito Seebeck [10].	23
Figura 2.6 – Calor liberado na junção [3].	24
Figura 2.7 - Calor absorvido na junção [3].	25
Figura 2.8 - Efeito Thomson; (A) Aquecimento; (B) Resfriamento.....	26
Figura 2.9 - Ligação Interna do módulo termoelétrico. [15]	27
Figura 2.10 - Construção Interna do módulo termoelétrico comercial [16].	28
Figura 2.11 - Módulos termoelétricos comerciais de vários tamanhos; (A) 1 estágio; (B) múltiplos estágios. [19]	29
Figura 2.12 – Modelo Característico do Sistema de Transferência Térmica [23].	31
Figura 2.13 - Comparativo entre o rendimento do módulo termoelétrico e a refrigeração com compressor [24].	32
Figura 2.14 – (A) Esquema Refrigerador Termoelétrico; (B) Refrigerador Portátil [18]. ..	33
Figura 2.15 – Esquema de um Sistema de Ar-condicionado Central [26].	35
Figura 2.16 – Sistema de Ar condicionado na Operação de Refrigeração [28].	36
Figura 2.17 – Sistema de Ar condicionado na Operação de Aquecimento [28].	37
Figura 2.18 – Esquema de um Sistema de Ar-condicionado Tipo Janela [28].	37
Figura 2.19 – Bancada experimental [31].	42
Figura 2.20 – Esquema experimental do sistema [31].	42
Figura 2.21 – Bancada experimental [33].	44
Figura 2.22 – Bancada experimental – Visão Geral [34].	45
Figura 2.23 – Bancada experimental – Módulos e Dissipadores [34].	45
Figura 2.24 – Sistema ventoinha-dissipador-Peltier-dissipador-ventoinha instalado na tampa da caixa e detalhe do sistema na tampa da caixa.[35]	46
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do sistema proposto.	48
Figura 3.2 – Protótipo finalizado do sistema de refrigeração idealizado.	48

Figura 3.3 – <i>Cooler</i> para geração de movimento do ar no sistema.	49
Figura 3.4 – Disposição do cooler no módulo de circulação e refrigeração.	49
Figura 3.5 – Sentido de fluxo do ar no sistema.	50
Figura 3.6 – Dissipador utilizado dentro do duto de refrigeração.	51
Figura 3.7 – Módulos Termoeletricos TEC-12706.[36]	51
Figura 3.8 – Disposição dos dissipadores e cooler na face quente dos módulos termoeletricos de multiuso.	52
Figura 3.9 – Estrutura adaptada isolada termicamente originalmente utilizada em bebedouros	52
Figura 3.10 – Caixa para simulação do ambiente a ser refrigerado.....	53
Figura 3.11 – Conduto de recirculação.	54
Figura 3.12 – Sistema eletrônico de suprimento e controle.	55
Figura 3.13 – Estrutura do sistema eletrônico de suprimento e controle.	55
Figura 3.14 – Sensor de temperatura LM35 [37].	55
Figura 3.15 – Localização dos sensores de temperatura no protótipo.	56
Figura 3.16 – Plataforma de prototipagem ARDUINO UNO R3 [40].	57
Figura 3.17 – Símbolo e imagem do MOSFET – IRFZ44 [44]	57
Figura 3.18 – Imagens da tela do LabVIEW [46, 47].....	58
Figura 3.19 – Fluxograma da primeira metodologia de validação.	60
Figura 3.20 – Validação do protótipo utilizando primeira metodologia.	60
Figura 3.21 – Fonte de tensão ICEL-MANAUS PS6000 [48].....	61
Figura 3.22 – Validação do protótipo utilizando segunda metodologia.	62
Figura 3.23 – Validação do protótipo utilizando a segunda metodologia.....	62
Figura 4.1 – Variações das temperaturas com o tempo (t).....	66
Figura 4.2 – Variações das temperaturas TE, TI e DT com o tempo (t).....	67
Figura 4.3 – Variações de todas as temperaturas TFQ, TFF e DTF com o tempo (t).	68
Figura 4.4 – Variação de todas as temperaturas com o tempo (t).....	69
Figura 4.5 – Variação das temperaturas TE, TI e DT com o tempo (t).	70
Figura 4.6 – Variação de todas as temperaturas TFQ, TFF e DTF.....	71
Figura 4.7 – Composição da potência total do experimento.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tabela de coeficiente de transferência de calor por convecção [30].....	40
Tabela 2.2 - Tabela de condutividade térmica de alguns materiais [30].....	40
Tabela 3.1 - Características do Modulo utilizado.....	51
Tabela 4.1 - Imagem de parte da tabela gerada no LabView.	64
Tabela 4.2 - Tabela de tags.....	65
Tabela 4.3 - Resumo dos dados coletados na primeira metodologia de validação.....	68
Tabela 4.4 - Tabela de conversões [29]	76

LISTA DE ABREVIATURAS

COP	- Coeficiente de Performance
d.d.p	- Diferença de Potencial
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
LdTM	- Laboratório de Transformação Mecânica
UFRGS	- Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área total exposta externa	[m ²]
DT	- Delta de temperatura.....	[°C]
h	- Coeficiente de transferência de calor por convecção.....	[W/m ² °C]
I	- Corrente elétrica	[A]
I _{max}	- Corrente elétrica máxima.....	[A]
k	- Condutividade térmica da parede	[W/m°C]
K	- Condutividade térmica do par de materiais termoeletricos.....	[W/mK]
P _{in}	- Potência de entrada.....	[W]
Q _{ativa}	- Carga térmica ativa.....	[W]
Q _{passiva}	- Carga térmica passiva.....	[W]
Q _{térmica}	- Carga térmica.....	[W]
Q ₁	- Calor absorvido.....	[W]
Q ₂	- Calor dissipado.....	[W]
Q ₁₂	- Taxa de calor trocado na junção.....	[W]
Q _{max}	- Potência máxima	[W]
R	- Resistência elétrica	[Ω]
T	- Temperatura.....	[°C]
T _c	- Temperatura fria	[°C]
TE	- Temperatura Externa	[°C]
T _H	- Temperatura de junção.....	[°C]
TI	- Temperatura interna	[°C]
T ₀	- Temperatura inicial.....	[°C]
Th	- Temperatura quente	[°C]
V _{max}	- Tensão máxima.....	[V]
x	- Espessura da parede	[m]

SÍMBOLOS GREGOS

Δt	- Diferença de temperatura	[°C]
ΔT_{\max}	- Variação de temperatura.....	[°C]
Δv	- Variação de Tensão (d.d.p.)	[V]
π	- Coeficiente Peltier	[V]
α	- Coeficiente Seebeck.....	[V/K]

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo em escala reduzida de um sistema de refrigeração de ambientes baseado no efeito Peltier, para aplicação análoga aos condicionadores de ar comercializados atualmente, utilizando módulos termoeletrônicos. A pesquisa é motivada pela possibilidade de concepção de um equipamento de refrigeração para obtenção de conforto térmico, sem algumas desvantagens dos condicionadores de ar comerciais como por exemplo a vibração, ruído além das grandes dimensões como na atualidade pode ser visto. Através da pesquisa exploratório busca-se detalhar o fenômeno térmico conhecido como efeito Peltier, suas características, materiais além da revisão do estado da arte afim de encontrar estudos correlatos a proposta apresentada. Apresentam-se as etapas e detalha-se o desenvolvimento do protótipo compreendendo a parte mecânica, elétrica e térmica. Em um segundo momento, o protótipo desenvolvido é submetido a testes de validação que demonstram a real funcionalidade conforme previsto, porém, com baixo rendimento em comparação aos equipamentos existentes de refrigeração. Realiza-se ainda, uma análise comparativa por extrapolação entre o protótipo desenvolvido e condicionadores de ar comercializados permitindo a avaliação de possibilidade e implementação em escala real de aplicação. Conclui-se sugerindo melhorias e novos estudos para otimização e ajustes nas dinâmicas térmicas podem obter um produto tecnicamente viável e comercialmente apropriado.

Palavras-chave: Efeito Peltier. Refrigeração Termoeletrônica. Módulos Termoeletrônicos.

ABSTRACT

This work describes the development of a prototype for a cooling system for environments with base on the Peltier effect, for application analogous to air conditioners currently marketed, using thermoelectric modules. The search is motivated by the possibility of conception of a cooling device to obtain a thermal comfort without some disadvantages of commercial air conditioners such as vibration, noise beyond large as can be seen today. Through exploratory research seeks to detail the thermal phenomenon known as the Peltier effect, their characteristics, materials beyond the state of the art review in order to find related studies the proposal. Presents the steps and prototype development details related the mechanics part, electrical and thermal. In a second moment, the prototype is submitted to validation tests that demonstrate the functioning as planned however, with low performance compared with commercial refrigeration equipment. It presents also a comparative analysis through extrapolation between the prototype and air conditioners commercialized allowing the evaluation of possibility and implementation in full-scale application. It concluded that the proposed improvements and new studies for optimization and adjustments in the thermal dynamics can obtain a product technically viable and commercially appropriate.

Keywords: Peltier effect. Thermoelectric cooling. Thermoelectric modules.

1 INTRODUÇÃO

A climatização de ambientes é utilizada para adequação da temperatura, visando à conservação dos organismos nos mais diversos tipos de ambientes. Entretanto as maiores aplicações da climatização são em ambientes comerciais, industriais e residenciais para estabelecer um conforto térmico e assim bem estar. O uso de condicionadores de ar é bastante intenso no verão principalmente em se tratando de países de clima tropical como no caso do Brasil, onde a temperatura durante o dia em algumas regiões atinge patamares ($>35^{\circ}\text{C}$) causando nas pessoas desconforto e outros problemas característicos desta estação do ano.

Os condicionadores de ar evoluíram ao longo de sua existência tendo sua evolução sempre focada na melhoria do rendimento, ou seja, gerar a maior troca térmica com o menor consumo possível de energia elétrica. Os condicionadores de ar “do tipo janela” evoluíram para os condicionadores “*high wall*” conhecidos como “split” que por sua vez seguem evoluindo na sua eletrônica embarcada que permite operarem com controle de velocidade do compressor reduzindo o número elevado de partidas do mesmo cuja a corrente de partida é cerca de 8 (oito) vezes a corrente nominal do sistema e assim consequentemente reduzindo o consumo energético do sistema.

A evolução dos condicionadores “de janela” para os *high wall* apresenta uma importante solução para o problema da localização física das unidades de refrigeração uma vez que as intervenções civis acabaram se tornando menos invasivas e, portanto, menos honerosas, além de possibilitar a instalação destas máquinas em, praticamente, qualquer lugar das construções. Mesmo com as evoluções ao longo dos anos, novos projetos ainda buscam a evoluir no que diz respeito à máxima troca térmica com um gasto mínimo de energia elétrica, além de tornar o produto fisicamente melhor do ponto de vista de adaptação nas construções e realidade arquitetônica atual.

1.1 Justificativa e Relevância

Tendo como foco a climatização, este trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um sistema de refrigeração de ambientes utilizando uma concepção diferente da atual já tão consagrada. Este sistema utilizará módulos termoelétricos de multiuso atualmente muito

utilizados na refrigeração de líquidos como, por exemplo, água em bebedouros e adegas de vinhos.

Este projeto prevê um estudo experimental buscando analisar a viabilidade técnica do sistema de refrigeração de ambientes utilizando os efeitos da termoelectricidade enunciados por Jean Charles Athanase Peltier em 1834. As utilizações destes princípios culminam na concepção e construção de um sistema capaz de gerar gradiente de temperatura a partir da circulação de corrente elétrica entre seus terminais em módulos termoelétricos.

O presente trabalho justifica-se pela atual necessidade de avaliação de novas tecnologias que apresentem soluções para os problemas de adaptação nas atuais arquiteturas bem como, melhorias na transformação térmica, ou seja, no rendimento da máquina, apresentando o desenvolvimento e avaliação de um novo tipo de condicionador de ar que utilizará módulos termoelétricos para a refrigeração.

1.2 Visão Geral do Trabalho

Uma visão geral do trabalho pode ser visualizada sob a forma de fluxograma na Figura 1.1, é fundamental para que, a compreensão e desenvolvimento do projeto levasse a que se tentasse atingir os objetivos pretendidos de forma sustentada e com a qualidade para os resultados finais.

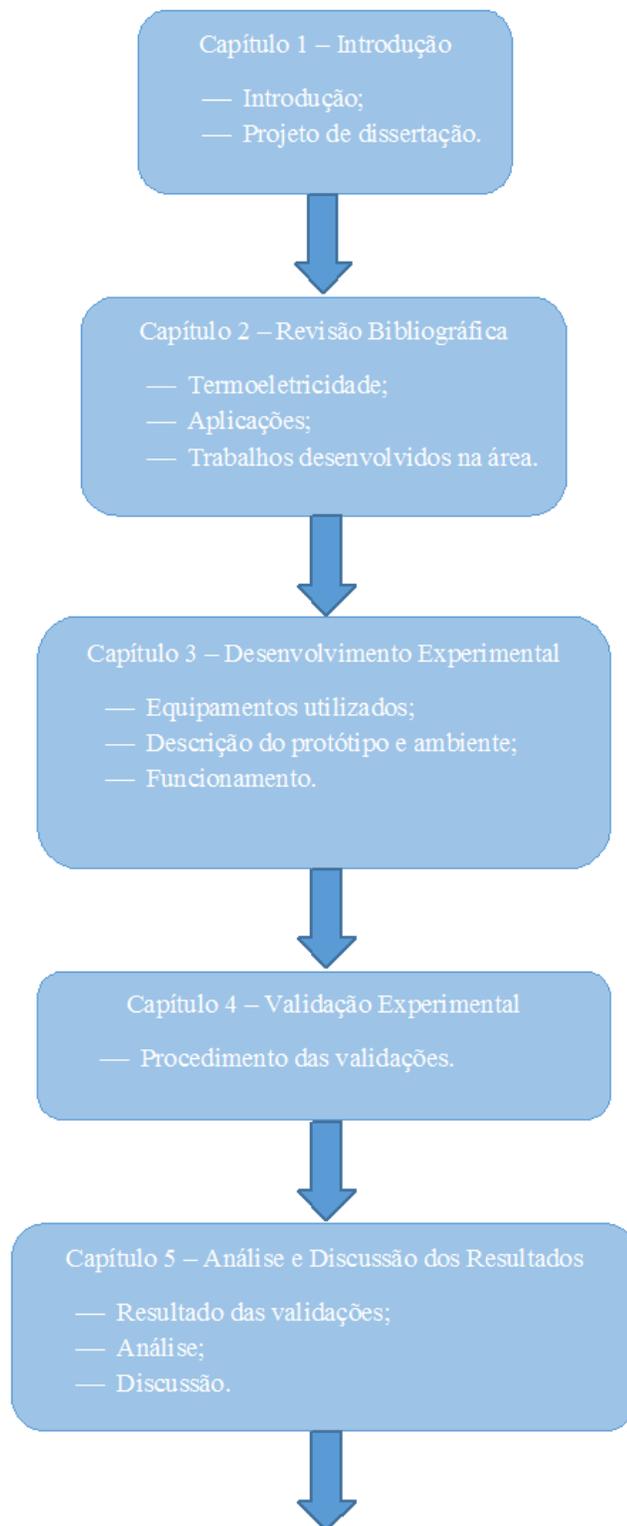


Figura 1.1 – Síntese esquemática da organização da dissertação.

1.3 Contribuições do projeto

O presente projeto contribui para aprofundamento no estudo do uso de materiais termoelétricos para refrigeração de ambientes. Buscando definir de forma conclusiva a viabilidade técnica da aplicação, o trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo que permite verificar a real capacidade de refrigeração de ambientes a partir do efeito Peltier, característico de materiais termoelétricos. Assim, com este estudo é possível identificar pontos positivos da aplicação proposta para obtenção de um resultado satisfatório.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) estudar o efeito Peltier com vista à aplicação em refrigeração;
- b) desenvolver uma montagem experimental para pesquisar o fenômeno de resfriamento termoelétrico (efeito Peltier);
- c) validar o sistema por meio de análise experimental do protótipo (medições e testes); e
- d) avaliar o rendimento e a viabilidade técnica e econômica do sistema desenvolvido.

Na mesma linha de pesquisa da termoeletricidade abordada neste trabalho, existem outros trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS; alguns trabalhos utilizando módulos termoelétricos, baseados nos efeitos Peltier e Seebeck. Os mesmos estão sendo demonstrados no esquema a seguir.

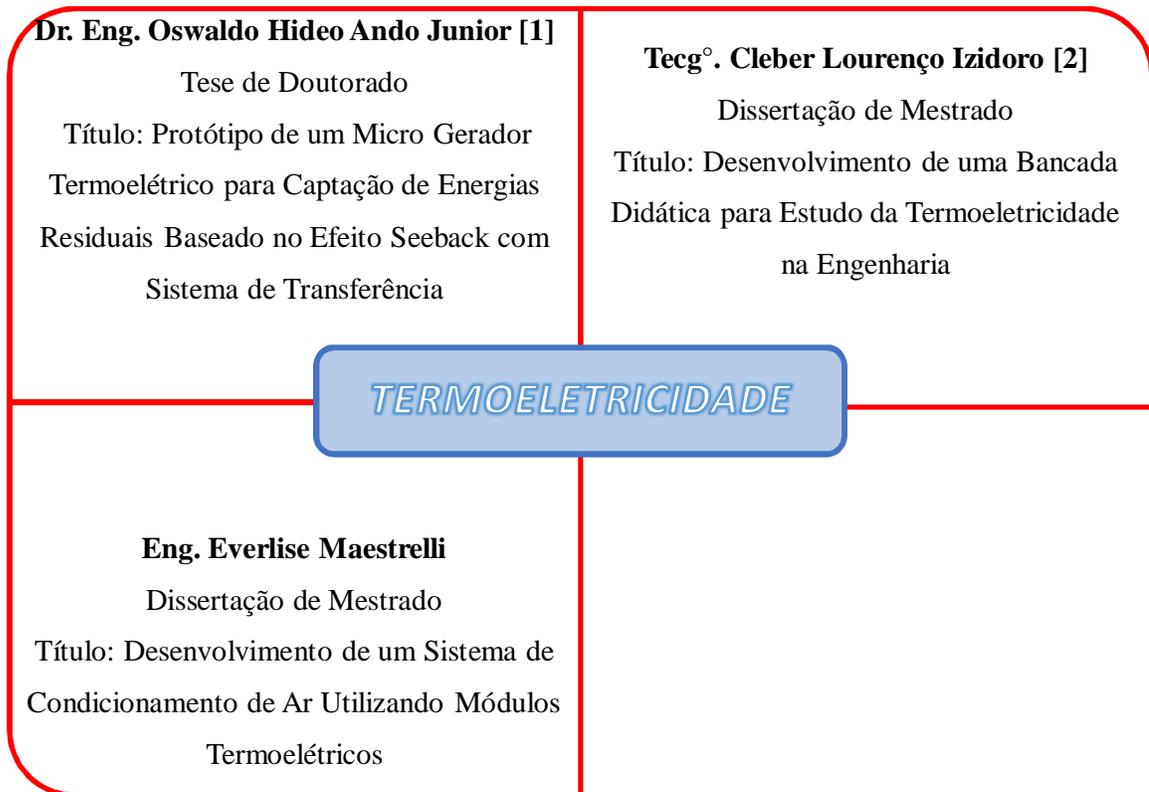


Figura 1.2 - Trabalhos sobre termoeletricidade desenvolvido no LdTM.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica geral do histórico, evolução dos materiais termoelétricos e as principais contribuições para a utilização da termoeletricidade para a conversão de energia segundo para os princípios de funcionamento, desenvolvimento e aplicações destes materiais.

Os avanços nas ciências dos materiais, trazidos pela revolução dos materiais semicondutores, permitiu que efeitos térmicos conhecidos desde o Século XIX se tornassem viáveis tecnologicamente. Uma dessas revoluções foi a utilização do Efeito Peltier em dispositivos para uso cotidiano. Com técnicas modernas a indústria hoje produz módulos termoelétricos capazes de bombear calor de modo eficiente para produzir um resfriamento ou aquecimento, com um dispositivo totalmente de estado sólido e com a possibilidade de operação inversa, isto é, funcionarem como geradores de eletricidade a partir da energia térmica.

2.1 Histórico e Evolução dos Materiais Termoelétricos

A termoeletricidade é a relação entre temperatura e energia elétrica. O conceito de termoeletricidade resulta da junção de duas palavras: “termo” que significa temperatura e “eletricidade” (do grego *elektron*, “âmbar”) que é um termo geral que engloba uma grande variedade de fenômenos resultantes da presença e do fluxo da carga elétrica. Thomas Johann Seebeck, nascido em Reval, no ano de 1770 e falecido em Berlin no ano de 1831, foi o físico precursor do efeito termoelétrico [3].

Os efeitos termoelétricos são aqueles em que energia térmica e elétrica possam ser convertidas parcialmente de uma forma para outra. Entre estes, de grande utilidade prática existem os efeitos Seebeck, o efeito Peltier e o efeito Thomson.

Os materiais termoelétricos são capazes de converter de forma direta a energia térmica em energia elétrica, quando um gradiente de temperatura é estabelecido entre as extremidades quentes e frias do circuito formado por par de materiais termoelétricos. Contudo, uma tensão é gerada, e ao fluir uma corrente elétrica pelo sistema, uma potência elétrica é gerada [4].

Os materiais são classificados em geral como condutores, semicondutores e isolantes. Microscópicamente, a classificação é feita de acordo com o comportamento dos elétrons da camada de valência do material, em ação de um campo elétrico gerado [5].

Os materiais semicondutores mais utilizados na fabricação de módulos termoeétricos são: telúrio, antimônio e germânio, altamente dopados para criação de semicondutores tipo-n (excesso de elétrons livres) e tipo-p (excesso de lacunas), agrupados como pares, que agirão como condutores dissimilares. Esses elementos são unidos eletricamente em série e termicamente em paralelo, conforme demonstrado na figura 2.1.

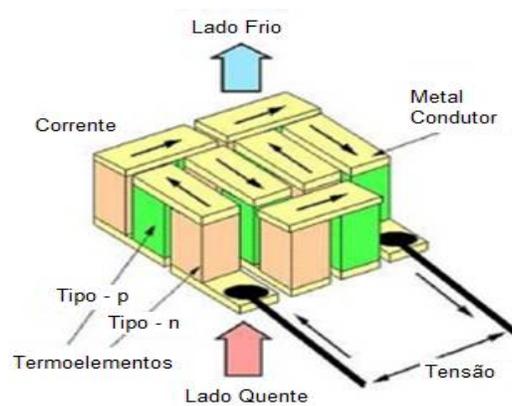


Figura 2.1 – Esquemático de um módulo termoeétrico [6].

Os materiais semicondutores do tipo-n e tipo-p são chamados de semicondutores extrínsecos, pois quando são dopados (acréscimos) com átomos de silício ou germânio, alteraram suas estruturas alterando a quantidade de elétrons na camada de valência do cristal de forma a obter-se o excesso ou falta de elétrons nesta camada. Este processo é o que caracteriza esses semicondutores, sendo que o tipo-n utiliza elementos contendo cinco elétrons na camada de valência, como o antimônio e o tipo-p utilizam elementos contendo três elétrons, como o boro e o gálio [7].

A figura 2.2 mostra que o modulo ao ser percorrido por uma corrente elétrica contínua pelos seus pares de materiais tipo p e n, a temperatura do lado frio do modulo reduz, retirando assim calor do ambiente a ser refrigerado. O transporte de elétrons transfere o calor através da pastilha e emite do outro lado, via elétrons, que movem de um estado para outro.



Figura 2.2 – Esquema físico de um módulo termoelétrico [8].

2.1.1 Efeito Seebeck

Seebeck descobriu, em 1821, o efeito termoelétrico onde uma junção de metais distintos produz uma tensão elétrica cujo valor depende dos materiais que a compõem e da temperatura a que se encontra. Este efeito é conhecido como efeito de Seebeck e é neste princípio que se baseia o funcionamento do termopar. O efeito Seebeck é a produção de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre duas junções de materiais diferentes quando elas estão a diferentes temperaturas (força eletromotriz térmica), conforme figura 2.3(A) e figura 2.4 [9].

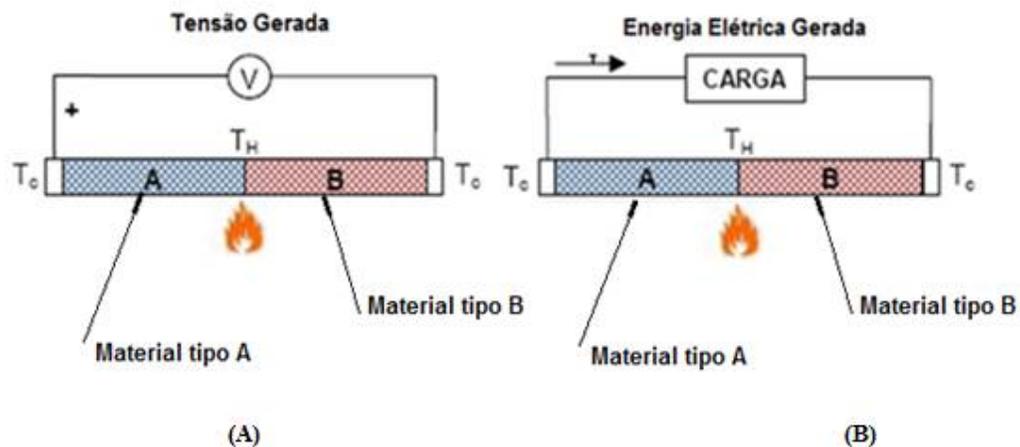


Figura 2.3 - Tensão gerada pelo aquecimento (A) e corrente circulando na carga (B) [10].

Onde:

T_H : Temperatura de junção ($^{\circ}\text{C}$)

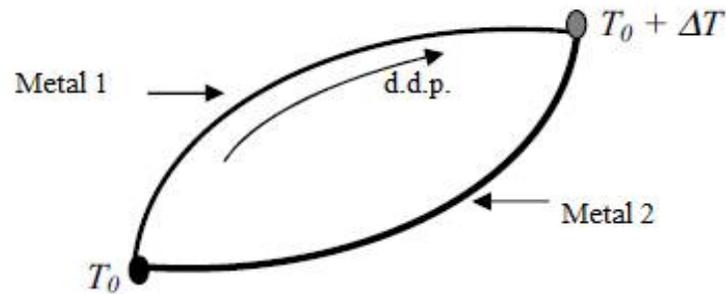


Figura 2.4 - Ilustração do efeito Seebeck [10].

Onde:

T_0 : Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT : Variação da temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

d.d.p: Diferença de Potencial (Tensão elétrica) (V)

Para pequenas diferenças de temperaturas ΔT entre as junções dos dois materiais, a diferença de potencial é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura e dependente da natureza dos materiais que compõem o circuito. A d.d.p. pode ser calculada pela eq. (1) [9].

$$\alpha = \frac{\Delta v}{\Delta T} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

α : Coeficiente Seebeck (V/K);

Δv : Variação de Tensão (d.d.p.) (V); e

ΔT : Variação de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

2.1.2 Efeito Peltier

Em 1834, Jean Charles Athanase Peltier, descobriu o efeito Peltier, 13 anos após o físico Thomas Johann Seebeck ter descoberto o efeito Seebeck em 1821.

Jean Charles Athanase Peltier, nascido em 22 de fevereiro de 1785, em Ham, França, foi um físico francês que descobriu em 1834, que uma junção metálica (hoje conhecida como termopar) pode produzir calor ou frio, dependendo da direção da corrente elétrica rendendo o nome de Efeito Peltier em sua homenagem. Embora o Efeito Seebeck, que produz energia elétrica por meio do calor, tenha sido descoberto 13 anos antes por Thomas Johann Seebeck, Peltier descobriu a capacidade reversível dos termopares para refrigerar, ou seja, gerar frio na junção metálica. O efeito Peltier pode ser observado na figura 2.3 (B) [9].

A figura 2.6 demonstra um exemplo em que o calor liberado na junção faz com que a corrente elétrica percorra da esquerda para a direita. Caso o calor fosse absorvido na junção, a corrente elétrica percorreria em sentido oposto, ou seja, da direita para esquerda, conforme figura 2.7. A corrente pode fluir em ambos os sentidos, sendo que num sentido o dispositivo absorve calor do meio onde se encontra, e quando se inverte o sentido da corrente, a junção onde absorvia calor, passa a irradiar calor para o meio ambiente [4].

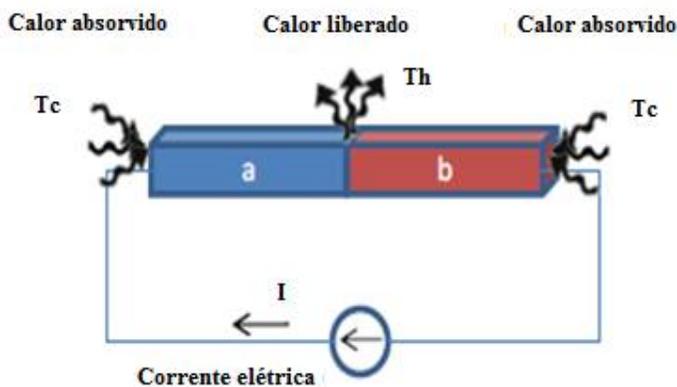


Figura 2.5 – Calor liberado na junção [3].

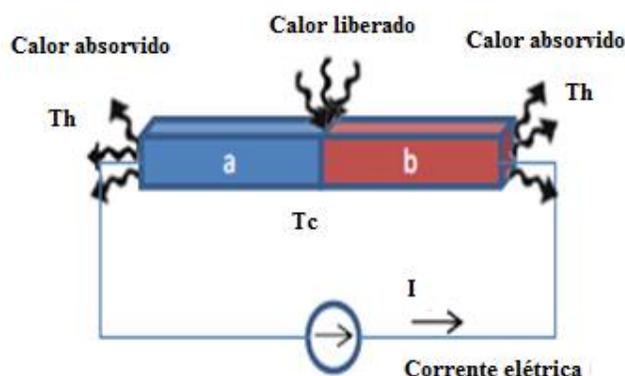


Figura 2.6 - Calor absorvido na junção [3].

O efeito de Peltier pode ser considerado o efeito oposto ao efeito de Seebeck. Se em um circuito, constituído por dois materiais distintos, se fizer passar uma corrente elétrica, de intensidade determinada, numa das junções haverá a libertação de calor enquanto que na outra junção a absorção de calor. Este efeito surge devido à aplicação de uma tensão elétrica na junção, originada pela diferente composição de cada um dos lados da junção [3].

Este efeito é quantificado pelo coeficiente Peltier (π) [3, 11]:

$$\pi = \alpha T \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

π : Coeficiente Peltier (V);

α : Coeficiente Seebeck (V/K); e

T : Temperatura (°C).

A taxa (Q_{12}), no qual o calor é absorvido ou rejeitado, é proporcional a corrente que circula pelo circuito e depende da natureza dos dois materiais que compõem a junção. Desta forma, a taxa de troca de calor nas junções pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$Q_{12} = \pi \cdot I \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

Q_{12} : Taxa de calor trocado na junção (W);

π : Coeficiente Peltier (V); e

I : Corrente elétrica (A).

2.1.3 Efeito Thomson

Em 1851, após as descobertas realizadas por Seebeck e Peltier, Willian Thomson estabeleceu uma relação entre os dois estudos anteriores descobrindo um terceiro efeito termoelétrico, o efeito Thomson. O estudo observou que qualquer material metálico quando submetido a uma diferença de temperatura entre as suas duas faces e percorrido por uma corrente elétrica em seus terminais pode produzir calor ou frio dependendo do sentido e da intensidade da corrente que o circula [7].

Com o efeito Thomson é possível aquecer ou resfriar dependendo do sentido da corrente e da configuração do gradiente de temperatura, ou seja, quando a corrente elétrica flui do potencial elétrico maior (terminal no lado quente) para o potencial elétrico menor (terminal no lado frio) haverá um gradiente de temperatura maior do lado quente para com o lado frio, gerando assim aquecimento (Figura 2.8 (A)). A configuração oposta irá provocar um resfriamento (Figura 2.8 (B)).

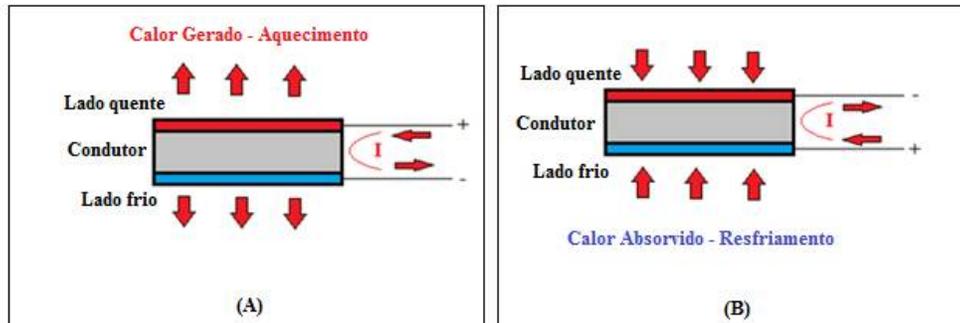


Figura 2.7 - Efeito Thomson; (A) Aquecimento; (B) Resfriamento.

O coeficiente Thomson associa corrente elétrica, calor e diferença de temperatura, provando que os efeitos Seebeck e Peltier tem relação direta.

2.2 Módulos Termoelétricos

2.2.1 Características e Funcionamento dos Módulos Peltier

A célula (módulo ou pastilha) Peltier, é um dispositivo termoelétrico que possui duas faces principais, uma das faces resfria e a outra esquenta mediante a passagem de corrente

entre seus terminais. O fluxo de calor é absorvido ou gerado de maneira reversível e depende do sentido da corrente I [10]. Ao aplicar-se uma tensão entre os pólos da pastilha, cria-se um diferencial de temperatura entre as faces opostas da placa. Basicamente, as pastilhas são formadas por semicondutores do tipo-p e tipo-n. Esses elementos semicondutores são soldados entre duas placas cerâmicas, eletricamente em série e termicamente em paralelo, conforme figuras 2.6 e 2.7.

A eficiência termoelétrica conhecida como Z termoelétrico ou Figura de Mérito, descoberta em 1911 por Altenkirch, é o parâmetro mais importante dos materiais termoelétricos e mede a qualidade de um dispositivo termoelétrico. A eficiência Z pode ser calculada a partir da equação 4 [12,13]:

$$Z = \frac{\alpha^2}{KR} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

Z : Eficiência termoelétrica dos materiais termoelétricos (1 / K);

α : Coeficiente Seebeck (V/K);

K : Condutividade térmica do par de materiais termoelétricos (W/mK); e

R : Resistência elétrica (Ω).

A fim de ser comparado com os dispositivos tradicionais, estudos realizados indicaram que a eficiência Z deve ser maior do que 3 [9]. No entanto, o maior valor encontrado é de 2,4. Assim, é ainda urgente a necessidade para encontrar os materiais de alta eficiência. [14].

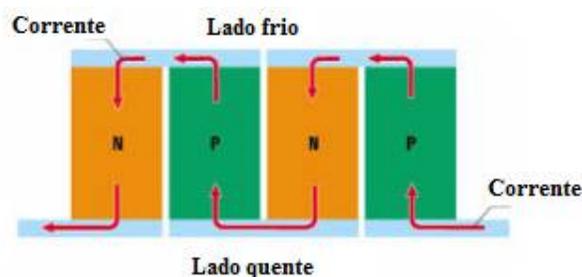


Figura 2.8 - Ligação Interna do módulo termoelétrico. [15]

O calor é transferido (lado “frio”) pela pastilha por transporte de elétrons (corrente elétrica) e emitido no outro lado (“quente”) via elétrons que movem de um estado alto para

um estado baixo (conforme figura 2.9). A capacidade de bombeamento de calor de um resfriador é proporcional à corrente e o número de pares de elementos tipo-n e tipo-p. A construção interna da pastilha é mostrada na figura abaixo.

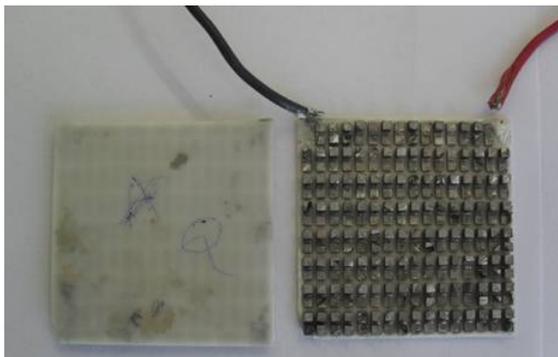


Figura 2.9 - Construção Interna do módulo termoeletrico comercial [16].

Um dispositivo termoeletrico típico, como os módulos termoeletricos de multiuso bastante utilizados neste trabalho, é composto por duas carcaças cerâmicas, as quais servem como estrutura para preservar a integridade mecânica do módulo e como isolamento elétrica para os termoelementos de telureto de bismuto tipo-n e tipo-p. Os dispositivos termoeletricos convencionais têm várias especificações para várias aplicações. As dimensões variam de 3mm de lado por 4mm de espessura até 60mm de lado por 5mm de espessura, com uma taxa de calor transferido máxima que varia de 1 a 125 W. A máxima diferença da temperatura entre o lado quente e frio pode alcançar 70°C. Os dispositivos em geral contêm de 3 a 127 termopares [17].

Os módulos de multiuso estão disponíveis no mercado e podem ser utilizados de diferentes maneiras: individualmente ou agrupados eletricamente em série, paralelo ou série-paralelo dependendo da aplicação. Os mesmos podem ser feitos de diferentes formas e tamanhos, sendo as formas mais comuns da carcaça a retangular e a quadrada. O tamanho usual de um modulo de simples estágio varia entre 3 mm x 3 mm e 60 mm x 60 mm.

Existem alguns dispositivos termopares que são dispostos em série (cascata) funcionando em vários estágios com a finalidade de obter diferenciais de temperatura maiores (até 130 °C). A temperatura mais baixa alcançada na prática é de aproximadamente -100°C [18]. A disposição dos módulos de múltiplos estágios se faz usualmente na forma de cascata e seis estágios são o limite prático. Na figura 2.11 pode-se observar os módulos de vários tamanhos, sendo (A) módulos de 1 estágio e (B) múltiplos estágios.

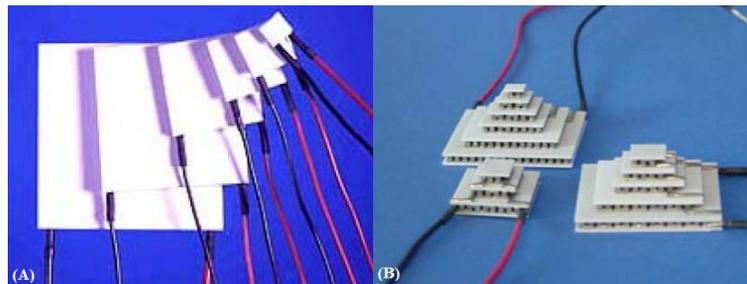


Figura 2.10 - Módulos termoelétricos comerciais de vários tamanhos; (A) 1 estágio; (B) múltiplos estágios. [19]

2.2.2 Vantagens dos Módulos Peltier

O uso da tecnologia Peltier disponível nos módulos tem um grande número de vantagens como as descritas abaixo [20, 21]:

- a) Não utiliza partes mecânicas móveis para refrigeração o que resulta num aumento da confiabilidade, uma redução de manutenção, e um aumento da vida útil do sistema;
- b) Aquece ou resfria dependendo apenas da polaridade da alimentação, ideal para aplicações que exigem o controle eletrônico preciso da temperatura;
- c) Dispensa o uso de gases refrigerantes; tecnologia 100 % estado sólido no que implica alta confiabilidade e baixos níveis de ruído e vibrações;
- d) Permite a refrigeração pontual (localizada); e
- e) Funcionam em qualquer orientação com/sem gravidade diferentemente dos refrigeradores baseados em compressores.

2.2.3 Desvantagens dos Módulos Peltier

Mesmo com o grande número de vantagens, essa tecnologia também possui desvantagens que podem ser vistas a seguir [21]:

- a) alto custo;
- b) o alto custo dos semicondutores cuja fabricação exige tecnologia altamente

especializada;

- c) a fonte de corrente contínua deve ser de baixa tensão e alta corrente;
- d) baixa eficiência energética; e
- e) a aplicação se restringe a casos onde o custo do sistema e eficiência energética são menos importantes que disponibilidade de energia, a confiabilidade do sistema e tranquilo ambiente de operação.

2.3 Aplicações dos materiais termoelétricos

2.3.1 Refrigeração

A tecnologia mais amplamente utilizada na área de refrigeração é a do ciclo por compressão padrão. Mas, atualmente, quando se trata de aplicações de pequeno porte, nas áreas industrial, automobilística, militar, bens de consumo, dentre outras, ela vem perdendo espaço para a refrigeração eletrônica. Alguns exemplos destas aplicações são: desumidificadores, refrigeradores portáteis, frigoríficos, transporte de produtos perecíveis, bebedouros, aquecedores/resfriadores de bancos, minigeladeiras, resfriamento de microprocessadores, e até em trocadores de calor dentro de submarinos [22]. A refrigeração eletrônica baseia-se no efeito Peltier, por meio da utilização de módulos termoelétricos.

Quando um módulo termoelétrico é utilizado para resfriamento o seu funcionamento acontece pela remoção de uma taxa de calor Q_c , de um ambiente a ser resfriado que se encontra a uma temperatura T_c . O calor dissipado na extremidade quente é a soma do calor líquido absorvido na extremidade fria mais a potência elétrica aplicada. O coeficiente de performance (COP) usado para enunciar a eficiência de refrigeração sendo definido como o calor absorvido na extremidade fria dividido pela potência elétrica aplicada, conforme eq (5):

$$COP = \frac{Q_1}{P_{in}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

Q_1 : Calor absorvido (W);

P_{in} : Potência aplicada ou potência de entrada (W).

A P_{in} é a potência de entrada e pode ser observada na figura 2.12.

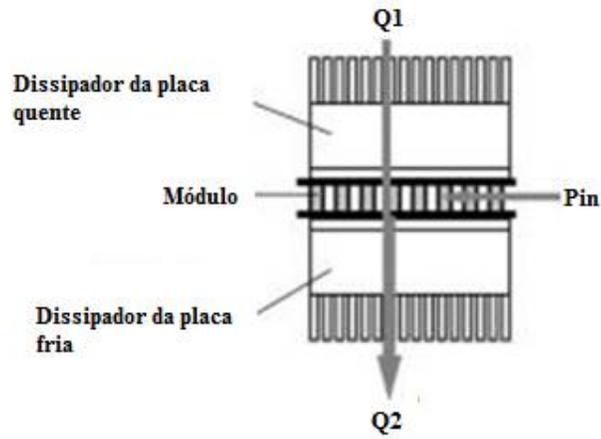


Figura 2.11 – Modelo Característico do Sistema de Transferência Térmica [23].

A potência de entrada (P_{in}) pode então ser calculada por:

$$P_{in} = Q_2 - Q_1 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

Q_1 : Calor absorvido (W); e

Q_2 : Calor dissipado (W).

Por meio das equações (4) e (5) têm-se que:

$$COP = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} \quad \text{[adm]} \quad \text{Eq. (7)}$$

Sendo assim, o COP representa quantas vezes o calor é removido por unidade de potência de entrada. Quando comparados com os do ciclo de Carnot, este que é o mais tradicionalmente utilizado em processos de refrigeração, serão encontrados valores inferiores de coeficientes de desempenho (COP) de materiais termoelétricos.

Uma vez que o módulo termoelétrico é muito eficiente para a pequenas diferenças de temperatura, uma melhoria de desempenho pode ser esperado se dois ou mais módulos termoelétricos forem utilizados em paralelo, de modo que a diferença de temperatura que cada módulo vê é apenas uma fração da diferença de temperatura total do dispositivo [4].

A refrigeração termoelétrica progrediu, mas não tanto como era de se esperar. Uma

das causas mais importantes da estagnação desta tecnologia é a má eficiência dos dissipadores de calor, devido ao aquecimento elevado no lado quente em pouca área da superfície, tornando-se difícil de dissipar o calor de uma forma eficiente e causando uma diminuição importante do COP. Estudos provam que os benefícios da refrigeração termoelétrica dependem, em primeiro lugar do desenvolvimento dos materiais e em segundo do design térmico e que para cada grau Celsius que se diminui da temperatura entre o lado quente do módulo e o ambiente, é possível aumentar o COP de um refrigerador termoelétrico em mais do que 2,3%, isto consegue-se melhorando a eficiência do dispositivo que faz a dissipação de calor do lado quente do módulo [22]. É importante salientar também que quanto maior for o gradiente de temperatura do ambiente a ser refrigerado menos eficiente é o módulo.

Os dados referentes às eficiências entre o processo de refrigeração a compressor e o termoelétrico, podem ser comparados tomando como base as máximas eficiências alcançadas entre as temperaturas de trabalho e podem chegar entre 5 a 10% para materiais termoelétricos e, no máximo 60% para os refrigeradores a compressor como mostra a figura 2.13 [18].

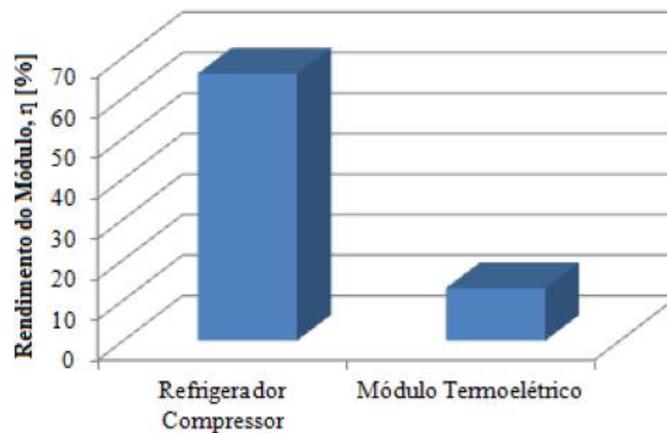


Figura 2.12 - Comparativo entre o rendimento do módulo termoelétrico e a refrigeração com compressor [24].

Em processos de refrigeração os módulos termoelétricos apresentam algumas falhas, que incluem a expansão térmica, ao qual induz cisalhamento e compressão, difusão de materiais em contato para termoelementos e também a umidade que gera corrosão. Algumas falhas também são encontradas devido ao projeto impróprio do sistema de refrigerador. No

entanto, constata-se que a utilização de módulos termoelétricos podem apresentar vida útil de até dez anos sem qualquer deterioração [18]. Superaquecimentos podem ocorrer oriundos de degradações de contatos térmicos entre os módulos e os dissipadores. Elevação nas resistências de contato também podem ser vistas devido às corrosões.

Em um sistema que utilizará módulos termoelétricos necessita-se ter confiabilidade no módulo. Entretanto, em refrigeradores de pequeno porte que possuem baixa emissão de calor, estes materiais podem ser bem aplicáveis, desde que sejam bem estudados. Importante compreender que devido ao baixo coeficiente de desempenho, os estudos devem ser bem efetuados, pois caso a carga térmica necessite ser superior a 250 Watts os processos de refrigeração compressor apresentam melhores coeficientes de performance. A figura 2.14 mostra um esquema de um refrigerador termoelétrico (A), bem como o modelo de um refrigerador portátil(B) [6].

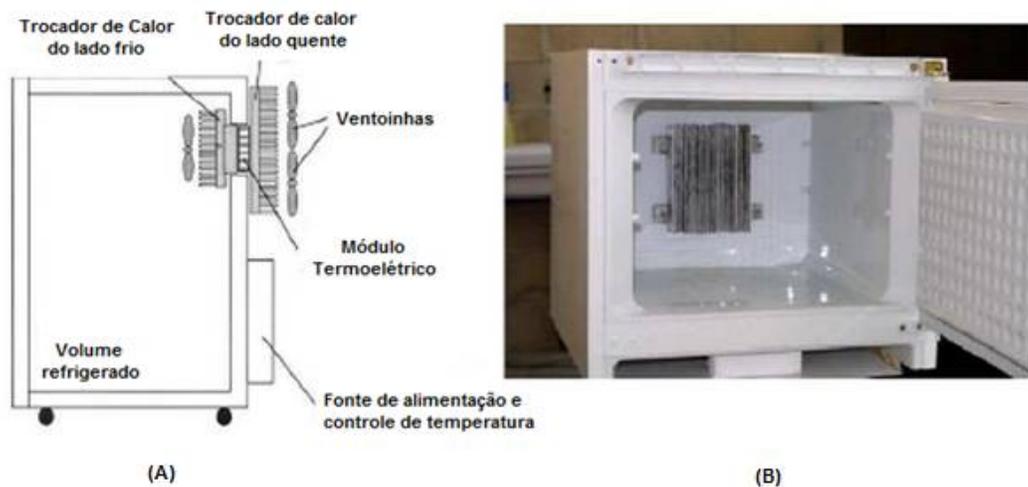


Figura 2.13 – (A) Esquema Refrigerador Termoelétrico; (B) Refrigerador Portátil [18].

No modelo apresentado na figura 2.14 (A), é possível perceber o local onde fica o módulo termoelétrico. Este que ao receber tensão e corrente da fonte de alimentação apresenta o diferencial de temperatura, ou seja, um lado frio e outro quente, sendo que o lado frio do trocador de calor ficará no interior do refrigerador e o lado quente do trocador de calor ficará no lado externo, constituído por um dissipador de calor e ventoinhas.

2.4 Condicionadores de ar convencionais

Devido a crescente urbanização e industrialização da sociedade, as pessoas estão gastando cada vez mais tempo em ambientes interiores, climatizados artificialmente por meio de sistemas de ar-condicionado. Sendo assim, os mesmos tem como seu principal objetivo deixar ambientes em temperaturas agradáveis, criando uma sensação de conforto térmico (aquecendo ou refrigerando).

O consumo nacional de energia elétrica fechou 2013 com elevação de 3,5% sobre o ano anterior, somando 463,7 mil GWh. Os dados consolidados de 2013 divulgados em janeiro deste ano pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), indicam que o aumento foi puxado pelo consumo das residências, que chegou a aumentar 6,1% [25].

O maior acesso ao uso de eletrodomésticos, principalmente o ar-condicionado, levou o consumo de energia na classe residencial, em nível nacional, a registrar crescimento 6,1% em 2013, atingindo 124.858 GWh [26].

2.4.1 Funcionamento dos Condicionadores de Ar Convencionais

As principais funções de um sistema de ar-condicionado são resfriar, aquecer, umidificar, desumidificar, purificar e distribuir o ar condicionado adequadamente de modo a garantir condições de conforto e saúde aos usuários do ambiente.

Um sistema de ar condicionado pode ser dividido em três sistemas principais: [26]

- a) produção de frio;
- b) produção de calor; e
- c) distribuição do frio e/ou calor por meio do condicionamento do ar.

Um exemplo de sistema de condicionamento de ar é apresentado na figura 2.15, onde pode ser observado as unidades de condicionamento de ar, unidade de produção de calor e unidade de produção de frio.

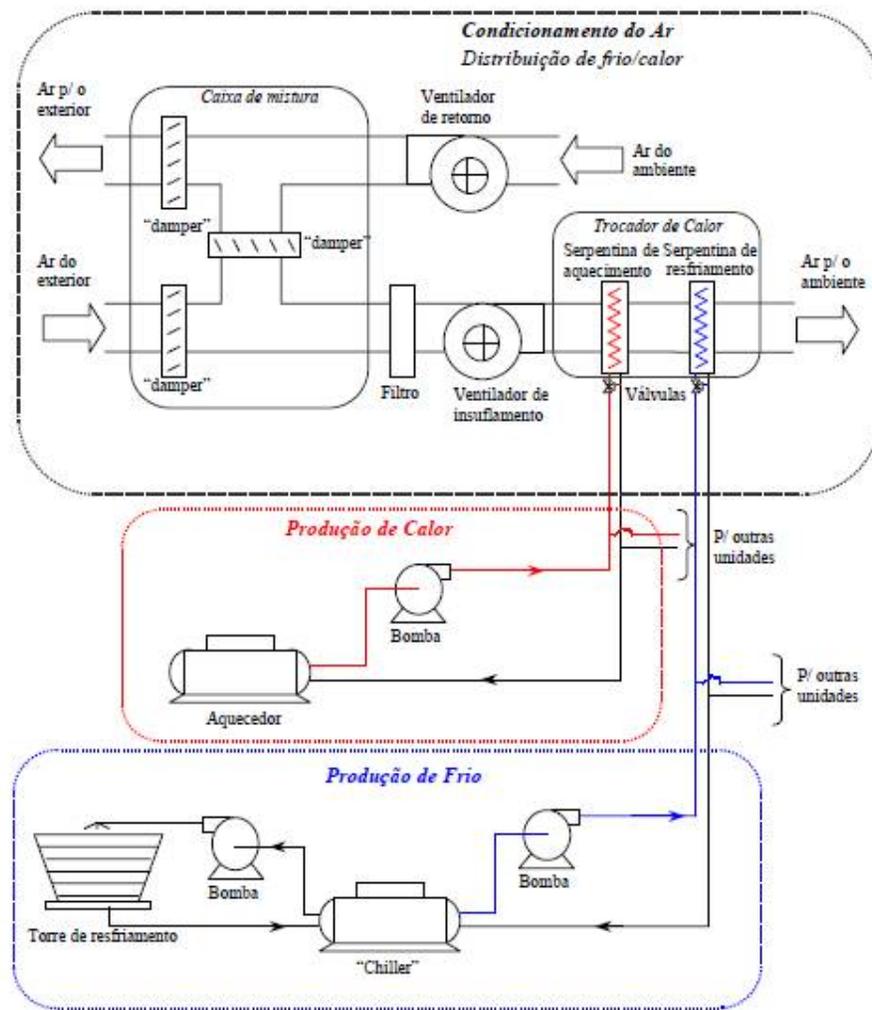


Figura 2.14 – Esquema de um Sistema de Ar-condicionado Central [26].

O princípio de funcionamento dos condicionadores de ar, se dá pela troca de temperatura do ambiente. O ar passa pela serpentina do evaporador que por contato sofre queda ou aumento de temperatura, dependendo do ciclo utilizado, baixando a umidade relativa do ar.

O evaporador e o condensador são elementos constituídos de canos de cobre introduzidos no interior de uma grande quantidade de chapas finas e paralelas de alumínio. Essas chapas têm a função de distribuir a energia térmica por condução aumentando a superfície de contato dos "trocadores de energia térmica" (evaporador e condensador). Assim, o ar quando passa por essas chapas recebe ou cede energia térmica para os trocadores

numa área de contato maior ajudando no ciclo [27].

Quando alcançada a temperatura desejada se faz uma leitura por meio de um sensor chamado de termostato, localizado no evaporador. Este por sua vez desliga o compressor, mantendo a temperatura interna do ambiente a fim de proporcionar o conforto devido. Qualquer variação na temperatura estipulada aciona-se novamente o compressor que é responsável pela circulação do gás refrigerante dentro do sistema.

No caso da operação de refrigeração o gás, chamado de fluido refrigerante, sai do compressor em alta pressão e alta temperatura. No caminho que percorre no condensador ele perde calor e continua perdendo no “elemento de expansão” (tubo capilar e filtro secador). No evaporador, o gás já chega frio, pronto para refrigerar o ambiente interno e carregando o calor para o ambiente externo [28].

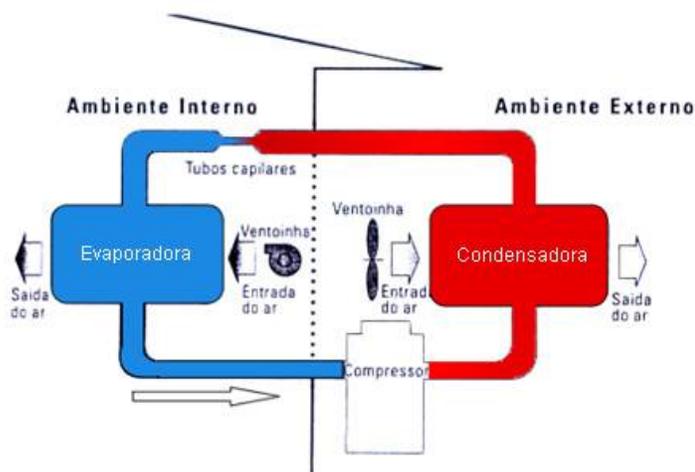


Figura 2.15 – Sistema de Ar condicionado na Operação de Refrigeração [28].

Para a operação de aquecimento o princípio é o mesmo. A diferença é que existe uma válvula reversora que muda o caminho que o gás vai percorrer. Ao invés de ir primeiro para o condensador como no ciclo frio, o gás vai primeiro para o evaporador. Com isso, o condensador e a evaporadora trocam de papel. Tudo funciona da mesma forma, só que inversa. Quem fica quente é o evaporador (ambiente interno) e o condensador fica frio (ambiente externo) [28].

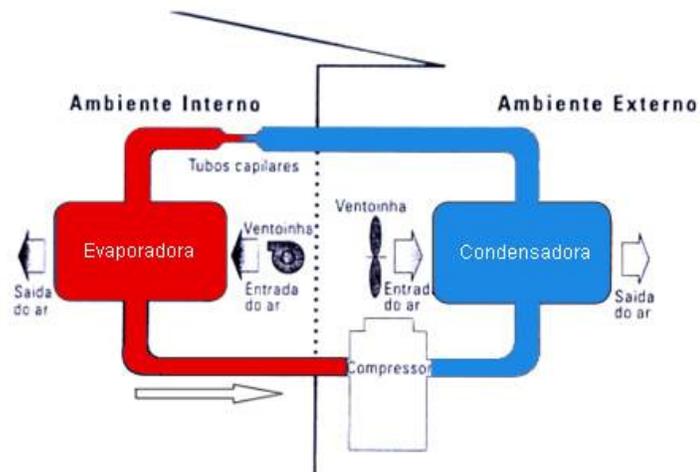


Figura 2.16 – Sistema de Ar condicionado na Operação de Aquecimento [28].

2.4.2 Condicionador de Ar Tipo Janela

São os produtos compactos de menor valor agregado e possuem o evaporador e condensador no mesmo gabinete. Equipamento com algumas restrições para instalação em determinados edifícios ou residências, como por exemplo, alteração de fachada.

O compartimento de um ar-condicionado de janela possui alguns componentes principais mostrados na figura 2.18.

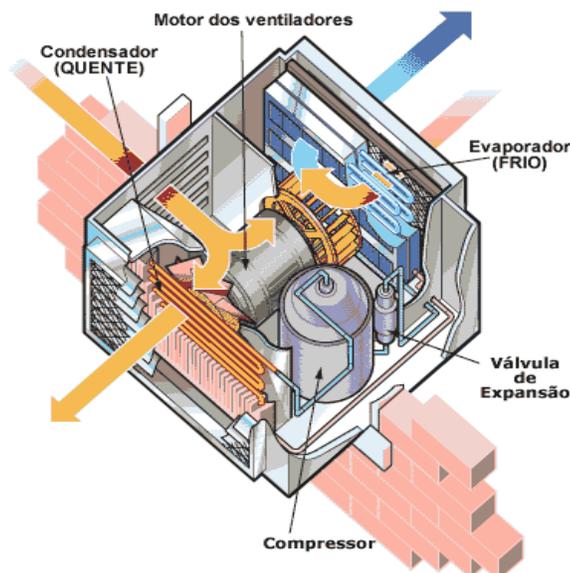


Figura 2.17 – Esquema de um Sistema de Ar-condicionado Tipo Janela [28].

2.4.3 Condicionador de Ar Tipo Split

O ar-condicionado split possui evaporador e condensador separados e interligados por meio de tubulações de cobre que permite uma grande distância entre as unidades e flexibilidade de instalação, proporcionando menor nível de ruído e uma melhor distribuição do ar devido a grande área de insuflamento do ar, tornando-se mais econômico.

2.5 Carga Térmica

Para dimensionar sistemas de refrigeração é preciso determinar a carga térmica necessária, isso quer dizer que é preciso conhecer qual a quantidade de calor precisa ser retirada do ambiente para que ele atinja a temperatura desejada. Para se chegar o valor da carga térmica é de extrema importância conhecer suas classificações pois isso será determinante durante o seu dimensionamento [19, 29, 30]. As cargas térmicas se subclassificam em carga ativa e carga passiva sendo que cada uma delas tem características distintas no que diz respeito a sua existência e a soma das duas determina a carga térmica necessária no ambiente conforme visto na equação a seguir.

$$Q_{térmica} (W) = Q_{térmica_{ativa}} (W) + Q_{térmica_{passiva}} (W) \quad \text{Eq. (8)}$$

A carga ativa relaciona-se com os dispositivos na região refrigerada como *coolers* por exemplo, já a carga passiva está relacionada com a troca de temperatura entre corpos por meio da radiação, convecção ou condução [19,30].

2.5.1 Carga Ativa

A carga ativa conforme já mencionado anteriormente está diretamente ligada a existência de dispositivos na região refrigerada sendo que, neste caso, a equação que a determina é apresentado logo a seguir [19,30].

$$Q_{ativa} (W) = V.I \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

V : tensão elétrica (V);

I : corrente elétrica (A).

2.5.2 Carga Passiva

A carga passiva por sua vez é dada pelas trocas térmicas ocorridas por radiação, convecção ou condução.

2.5.2.1 Carga Passiva (Irradiação)

A carga por irradiação pode ser considerada desprezível uma vez que comparativamente com as outras cargas seu valor é muito pequeno não influenciando significativamente no valor final da carga térmica. Somente esse tipo de carga ganha notoriedade em situações em que a carga ativa do sistema é muito pequena e a diferença de temperatura é elevada [19,30].

2.5.2.2 Carga Passiva (Convecção)

Este tipo de carga resulta da transmissão natural da temperatura devido o contato do fluxo de ar com o meio físico por onde ele circula. Nos sistemas utilizando módulos termoelétricos a carga passiva por convecção tem origem na circulação de ar natural ou forçada pelo ambiente [19,30].

2.5.2.3 Carga Passiva (Condução)

A carga passiva por condução por sua vez é o resultado da condução da temperatura pelas paredes do ambiente que está sendo refrigerado, no caso, uso de materiais isolantes nas paredes implica em uma redução na carga passiva [19,30].

2.5.2.4 Carga Passiva (Condução e Convecção)

Em geral o que ocorre nos sistemas de refrigeração de ambientes é a combinação entre as cargas térmica por condução e convecção pois normalmente o ar circula de modo natural ou forçado trocando temperatura com o meio interno por convecção e com o meio externo por condução [19,30]. Para se determinar a magnitude desta carga usa-se a equação a seguir.

$$Q_{passiva} (W) = \frac{A \Delta t}{\frac{x}{k} + \frac{1}{h}} \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

A : Área total exposta externa (m²);

Δt : Diferença de temperatura (°C);

x : Espessura da parede (m);

k : Condutividade térmica da parede (W/m°C); e

h : Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m² °C).

Tabela 2.1 - Tabela de coeficiente de transferência de calor por convecção [30].

Processo	Coefficiente de Calor (Convecção) W/m ² °C
Convecção Natural	2 – 25
Convecção Forçada	25 – 250

Tabela 2.2 - Tabela de condutividade térmica de alguns materiais [30]

Material	Condutividade Térmica (W/m°C)
Alumínio	250
Cobre	386
Ouro	315
Isopor	0,031

2.6 Estudos na Área de Condicionamento de Ar com Módulos Termoelétricos

Na mesma linha de pesquisa deste trabalho já foram realizados outros estudos e experiências realizadas abordam o uso de módulos termoelétricos para condicionamento de ar. Neste subcapítulo apresenta-se os principais estudos.

2.6.1 Aplicação de Módulos Termoelétricos para Condicionamento de Ar

O trabalho realizado mais próximo ao que foi desenvolvido nesta dissertação são dos autores José Rui Camargo e Maria Claudia Costa de Oliveira da área de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté - UNITAU, Taubaté/SP. Os artigos foram publicados no volume 17 da revista Ciências Exatas da própria UNITAU em 2011 [31], *Aplicação de Módulos Termoelétricos para Condicionamento de Ar* e no VI Congresso de Engenharia Mecânica, em Campina Grande no ano de 2010 [32].

De acordo com [31, 32] o trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo experimental de condicionamento de ar utilizando módulos termoelétricos, apresentando as equações teóricas que permitem avaliar o desempenho de um sistema de ar-condicionado baseado no efeito termoelétrico e os resultados experimentais de testes aplicados em um dispositivo termoelétrico composto por módulos dispostos em dutos para a simulação de um pequeno sistema de ar-condicionado [31].

Conforme [31] apresenta-se um dispositivo experimental simulando um ar-condicionado foi construído afim de analisar o modelo matemático com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema proposto. A figura 2.19 apresenta uma foto da bancada experimental, e a figura 2.20 mostra o sistema esquemático do experimento.



Figura 2.18 – Bancada experimental [31].

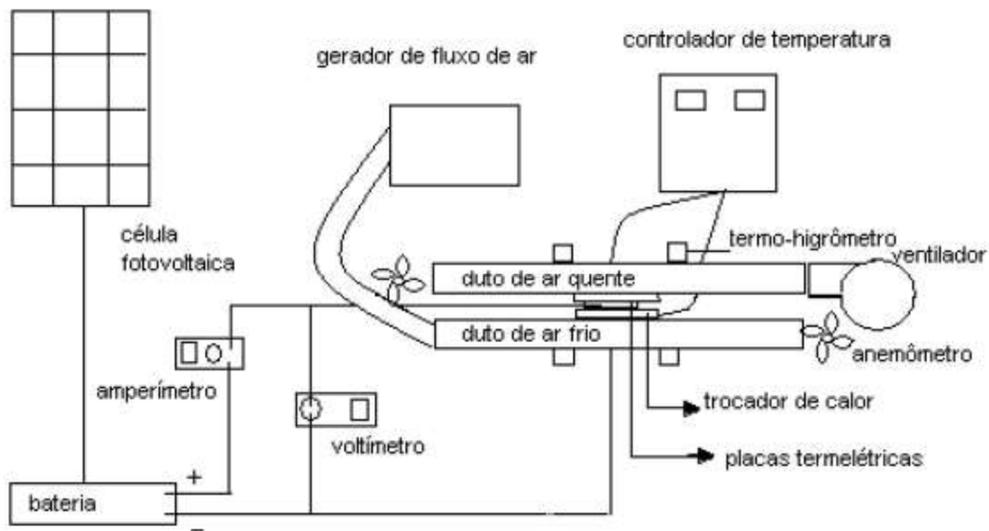


Figura 2.19 – Esquema experimental do sistema [31].

A bancada consiste em um conjunto de módulos termoeletrônicos acoplados fisicamente em ambos os lados por trocadores de calor e estes são inseridos cada um dentro de um duto sendo que por um dos dutos o fluxo de ar será aquecido e no outro duto o fluxo vai ser resfriado quando passado pelos trocadores de calor [31].

Os seguintes parâmetros foram controlados e medidos durante todo o experimento: temperatura de entrada do ar no lado quente, temperatura de saída do ar do lado quente,

temperatura de entrada do ar no lado frio, temperatura de saída do ar no lado frio, temperatura da placa (módulo) no lado quente (T_h), temperatura da placa no lado frio (T_c), a corrente elétrica aplicada (I), a tensão elétrica aplicada (V) e a velocidade dos fluxos de ar quente e frio nos lados dos módulos termoeletrônicos correspondentes.

Os testes foram realizados fornecendo uma corrente contínua, tensão igual a 12V, a partir de uma bateria alimentada por um painel fotovoltaico. Foram realizados quatro séries de testes com diversas configurações em relação aos módulos.

Como resultados foi possível observar que o Coeficiente de Desempenho (COP) diminui quando a corrente elétrica ou a diferença de temperatura aumenta, que a potência requerida aumenta ao elevar a temperatura e que quando a corrente elétrica aumenta a diferença de temperatura também aumenta.

Os autores chegaram a conclusão que a tecnologia estudada traz resultados promissores quanto ao objetivo almejado, porém neste primeiro momento ainda não aplicáveis a tal fim, já que a diferença de temperatura alcançada não estimula a troca do equipamento de condicionamento de ar encontrado atualmente no mercado [31].

2.6.2 Melhoria na Eficiência Energética de um Refrigerador Termoeletrônico: Controle Preditivo Baseado em Modelo Aplicado à Regulação de Temperatura do Reservatório de Água Gelada

Segundo [33], o uso racional de recursos é pauta recorrente nas discussões acerca do desenvolvimento sustentável e tem estimulado o projeto de equipamentos mais eficientes de energia elétrica. Hoje agentes regulamentadores e certificadores estabelecem regras para o funcionamento e para a classificação de eletrodomésticos quanto ao consumo de energia elétrica a fim de formalizar a relação entre o desempenho dos mesmos e a manutenção indefinida dos recursos. Nesse contexto, o trabalho aqui citado estudou um projeto de um controlador preditivo baseado em modelo aplicado à regulação da temperatura do reservatório de água gelada de um refrigerador termoeletrônico obedecendo as especificações da norma nacional ANS118 que determina condições funcionais para bebedouros com refrigeração mecânica incorporada [33].



Figura 2.20 – Bancada experimental [33].

Para atingir o objetivo do trabalho foram realizadas as etapas de modelagem e identificação do processo do sistema de refrigeração termoelétrico de fluidos, estudo do controlador preditivo baseado em modelo e estudo da eficiência do controlador.

2.6.3 Análise de um Condicionador de Ar Automotivo Utilizando o Efeito Termoelétrico

O trabalho em questão teve como objetivo apresentar um estudo da viabilidade técnica da utilização de módulos termoelétricos para condicionamento de ar automotivo baseado no efeito Peltier, para tanto o trabalho apresentou 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 condicionamento de ar automotivo, que utiliza como fonte a própria bateria do veículo [34].



Figura 2.21 – Bancada experimental – Visão Geral [34].

Destaca-se em [34] que o protótipo implementado mostrou-se capaz de reproduzir, de maneira bastante aproximada, o comportamento do sistema de refrigeração termoelétrica e com os ensaios experimentais, a autora chegou a conclusão 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.

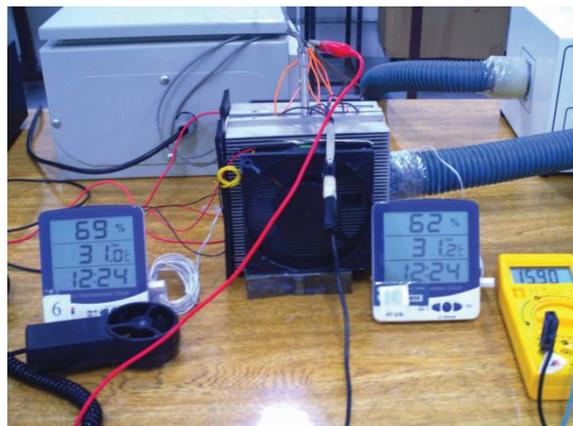


Figura 2.22 – Bancada experimental – Módulos e Dissipadores [34].

2.6.4 Aquecimento, Resfriamento e controle de Temperatura de um Ambiente Fechado Utilizando Células Peltier

Segundo [35] desenvolveu-se uma investigação sobre o processo de aquecimento e

resfriamento de pequenos ambientes fechados semelhantes àqueles de um gabinete de um microcomputador [35].

Com a justificativa de que se a temperatura no interior de um gabinete não for controlada a mesma poderá atingir níveis que prejudicarão o funcionamento do equipamento, inclusive podendo danificá-lo, foi desenvolvido um sistema de aquecimento, mostrado na figura 2.24, resfriamento e controle de temperatura de um ambiente fechado utilizando células Peltier comerciais, sensor de temperatura LM35 e microcontrolador PIC 16F877A [35].



Figura 2.23 – Sistema ventoinha-dissipador-Peltier-dissipador-ventoinha instalado na tampa da caixa e detalhe do sistema na tampa da caixa.[35]

Os resultados obtidos em [35] pode-se concluir que o sistema desenvolvido é adequado para o controle de temperatura no interior de gabinetes de microcomputadores. Nos ensaios verificou-se que a configuração das células Peltier em série é mais eficiente do que a paralela para resfriar o ambiente, já que pode-se alcançar uma determinada temperatura em um intervalo de tempo menor [35].

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se uma proposta de implementação de um sistema de refrigeração em escala reduzida de um condicionador de ar utilizando os módulos termoelétricos em questão.

Conhecendo o potencial de refrigeração dos módulos termoelétricos e vislumbrando a possibilidade de concepção de um ar condicionado distinto aos existentes idealizou-se a concepção de um protótipo que com módulos termoelétricos seja capaz de refrigerar ambientes através do efeito Peltier. De modo a reduzir os custos da implementação concebeu-se um protótipo em escala reduzida de modo a possibilitar um indicativo de funcionalidade permitindo a posterior extrapolação das informações e análise comparativa com aplicações reais.

A proposta apresentada na figura 3.1 é composta por um sistema de refrigeração utilizando módulos termoelétricos que faz com que o ar circule de maneira forçada no interior de um duto onde estão localizados dois dissipadores de alumínio refrigerados cada qual por um módulo termoelétrico de multiuso. O ar circulante em contato com o dissipador refrigerado tem sua temperatura rebaixada que por sua vez faz com que a temperatura do ambiente também seja reduzida por meio da troca térmica. Para elevar a eficiência do sistema existe ainda uma realimentação do ar do ambiente para o sistema, que por sua vez repetirá o processo.

Para um melhor entendimento deste trabalho, o sistema de refrigeração idealizado foi dividido em partes distintas de modo que cada uma delas tenha funções específicas dentro do processo. Conforme é apresentado no esquemático da figura 3.1, o sistema é composto de módulo de circulação e refrigeração, ambiente a ser refrigerado e duto de recirculação do ar. Além das partes mencionadas, a proposta conta com um sistema eletrônico responsável pelo suprimento elétrico para o módulo bem como leitura dos dados dos sensores e controle eletrônico de acionamento dos módulos.

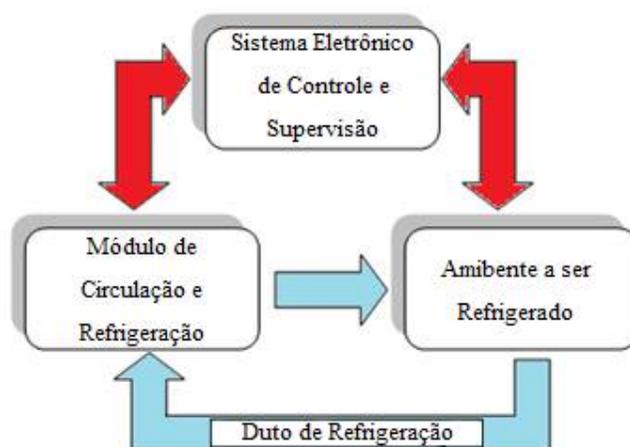


Figura 3.1 – Diagrama esquemático do sistema proposto.

A montagem do protótipo, com exceção dos módulos termoelétricos, foi realizada utilizando materiais de baixo custo e fácil acesso haja vista que o principal objetivo do trabalho é a avaliação de viabilidade técnica do sistema proposto apontando a viabilidade, ou não, da reprodução do protótipo em escala real em outros trabalhos. A figura 3.2 por sua vez traz uma imagem do protótipo final montado apresentando suas partes descritas anteriormente.

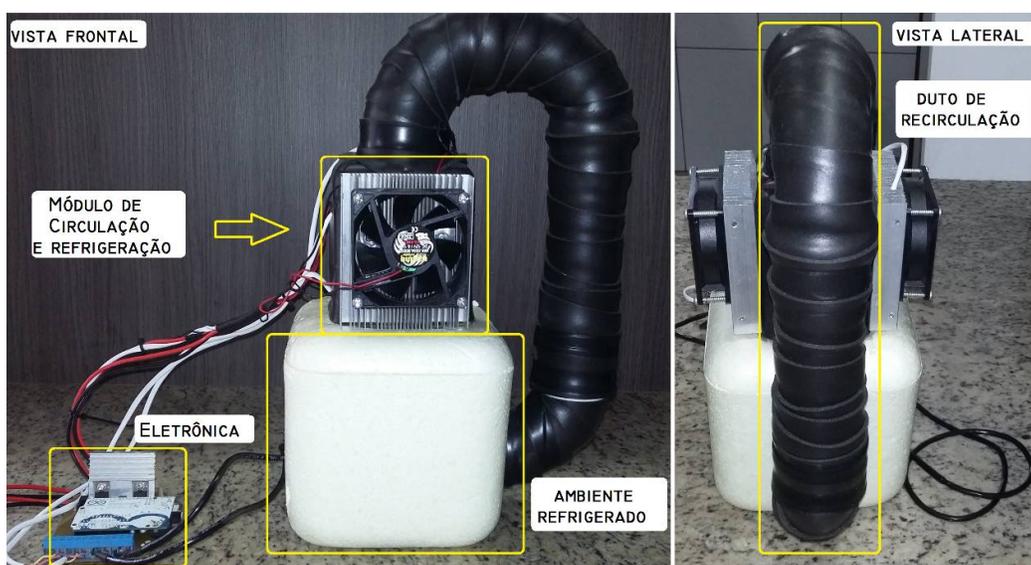


Figura 3.2 – Protótipo finalizado do sistema de refrigeração idealizado.

3.1 Descrição do Sistema Proposto

3.1.1 Módulo de Circulação e Refrigeração do ar

Este módulo é responsável pela geração de fluxo de ar dentro do sistema para isso utiliza-se de uma ventoinha tipo *cooler*. O *cooler* utilizado para a montagem do sistema em questão como pode ser visto na figura 3.3 possui dimensões de 80x80x25mm (largura, comprimento e altura) e deve ser alimentado em 12Vcc apresentando, neste caso, uma rotação de 3000 RPM. A escolha deste *cooler* deu-se pelo fato de ser utilizado em larga escala tornando-o facilmente acessível além de apresentar características de velocidade que possibilite o deslocamento do ar entre as etapas do sistema.



Figura 3.3 – Cooler para geração de movimento do ar no sistema.

Com pode ser visto na figura 3.4, o *cooler* é acoplado no dissipador de alumínio que em conjunto com o módulo de circulação de ar, gera um fluxo de ar no duto fazendo com que o mesmo passe pelo dissipador refrigerado e chegue ao ambiente a ser refrigerado, e além disso, retorne pelo conduto de recirculação sendo novamente reaproveitado no sistema.

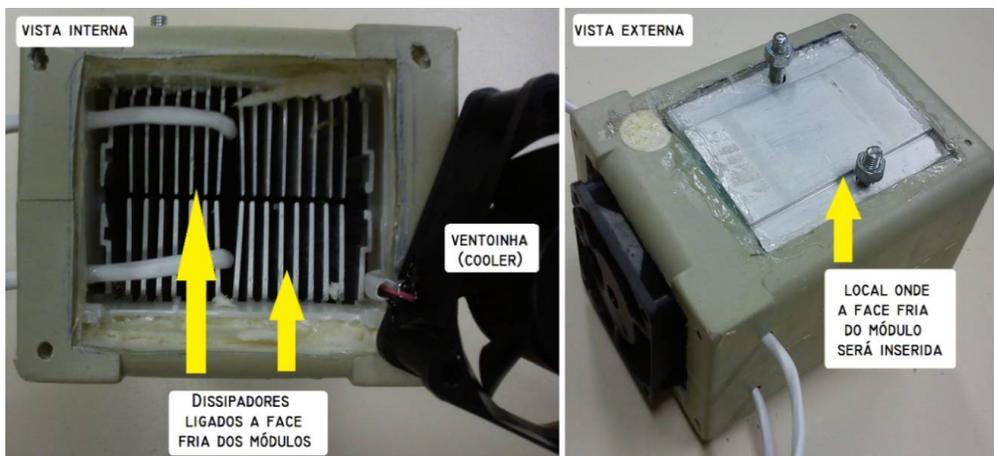


Figura 3.4 – Disposição do cooler no módulo de circulação e refrigeração.

Neste protótipo buscou-se verificar o rendimento do sistema pegando o ar de dentro do próprio ambiente e por meio da ventoinha fazê-lo circular pelo conduto passando pela etapa de refrigeração e chegando novamente ao ambiente. Como o sistema funciona constantemente o ar já refrigerado na sequência será tomado novamente pelo conduto passando mais uma vez pela etapa de refrigeração voltando ao ambiente e isso repete-se em um constante ciclo enquanto o sistema estiver ligado.

A figura 3.5 apresenta por meio de setas, o movimento do ar dentro do sistema de modo que verifica-se que o ar não é tomado do meio externo por nenhum tipo de vazamento específico, pois isso acaba ocorrendo pelas próprias frestas e fendas da construção do protótipo assim como ocorre em uma residência, de modo que quanto mais fechada a mesma estiver maior é a conservação do ar refrigerado.

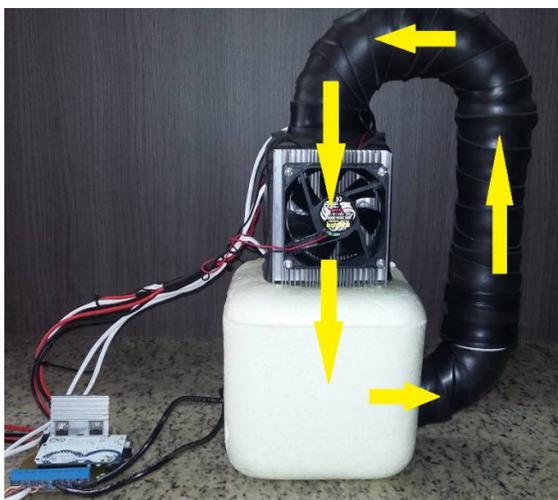


Figura 3.5 – Sentido de fluxo do ar no sistema.

Este módulo também é responsável pela refrigeração do ar circulante pois nele encontra-se instalados os módulos termoelétricos que serão responsáveis por gerar o gradiente da temperatura no ambiente. É de extrema importância que a disposição do módulos seja feita de modo a obter a maior área de contato possível com o ar circulante, maximizando assim a possibilidade de refrigeração do mesmo.

O modo encontrado para fazer com que o ar circulante tenha contato com a face fria do módulo foi por meio de dois dissipadores de alumínio demonstrados na figura 3.6 fixados dentro do módulo de circulação e refrigeração por onde terão o ar circulando entre suas aletas. Com suas aletas conduzindo a temperatura fria dos módulos e com o ar em contato

com estas aletas há uma troca térmica e o ar acaba por sofrer um decréscimo de temperatura.



Figura 3.6 – Dissipador utilizado dentro do duto de refrigeração.

Para gerar o gradiente de temperatura foram utilizados dois módulos termoeétricos que são responsáveis pela refrigeração do ar, acoplado ao dissipador dentro do duto. Os módulos utilizados para esta aplicação são do modelo TEC1-12706 apresentados na figura 3.7, com características elétricas apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características do Módulo utilizado.

Características - Módulo Modelo TEC1-12706		
Temperatura do lado quente (°C)	25	50
$Q_{\text{máx.}}$ (W)	50	57
$\Delta T_{\text{máx.}}$ (°C)	66	75
$I_{\text{máx.}}$ (A)	6,4	6,4
$V_{\text{máx.}}$ (V)	14,4	16,4
Resistência Elétrica (Ω)	1,98	2,30

Fonte: Catálogo do fabricante HB Corporation (Thermoelectric Cooler). [36]

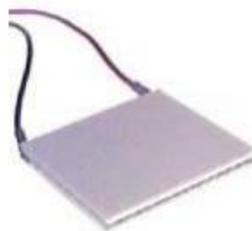


Figura 3.7 – Módulos Termoeétricos TEC-12706.[36]

Além do dissipador responsável pela refrigeração do ar, é necessário também a inserção de um outro dissipador na face quente de cada módulo junto com um *cooler*, como mostra a figura 3.8. O conjunto de dissipadores mais os *coolers* acoplados a face quente dos módulos, objetivam dissipar o calor gerado pois o excesso de temperatura devido a característica do módulo pode acarretar no dano do mesmo. Deste modo o dissipador conduz a temperatura e o *cooler* acelera a troca térmica com o ambiente.

A disposição do módulo e *cooler* externo para dissipação da temperatura quente dos módulos termoeletrônicos de multiuso podem ser verificado na figura 3.8.



Figura 3.8 – Disposição dos dissipadores e cooler na face quente dos módulos termoeletrônicos de multiuso.

Para reduzir as perdas térmicas o mesmo foi montado sobre uma estrutura com isolamento térmico adaptada originalmente utilizado em bebedouros refrigerados também por módulos termoeletrônicos de multiuso conforme figura 3.9.



Figura 3.9 – Estrutura adaptada isolada termicamente originalmente utilizada em bebedouros .

3.1.2 Ambiente a ser refrigerado

Para desenvolver o ambiente a ser refrigerado, foi utilizada uma caixa de isopor com dimensões externas de 160 mm de comprimento por 160 mm de largura por 160 mm de altura e 10 mm de espessura que simulará um ambiente a ser refrigerado. A figura 3.10 apresenta a imagem da caixa utilizada no experimento.



Figura 3.10 – Caixa para simulação do ambiente a ser refrigerado.

As dimensões da caixa que simula o ambiente a ser refrigerado foram escolhidas de modo empírico, ou seja, as dimensões da mesma não seguiram nenhuma espécie de dimensionamento específico sendo utilizada uma estrutura já pronta. Os resultados que serão apresentados terão suas discussões a partir destas dimensões.

3.1.3 Conduto de recirculação do ar

Para aumentar a capacidade de refrigeração o sistema foi desenvolvido considerando uma realimentação de modo que o ar já refrigerado será tomado do próprio ambiente por meio de um conduto, e será direcionado novamente a tomada de ar no módulo de circulação de ar. O ar já refrigerado adicionado a tomada de ar do meio externo será redirecionada para o módulo de refrigeração onde o ar será mais uma vez refrigerado. O conduto de ar demonstrado na figura 3.11 utilizado na confecção do protótipo é o mesmo utilizado em

instalações hidráulicas e possui dimensões de 2”.

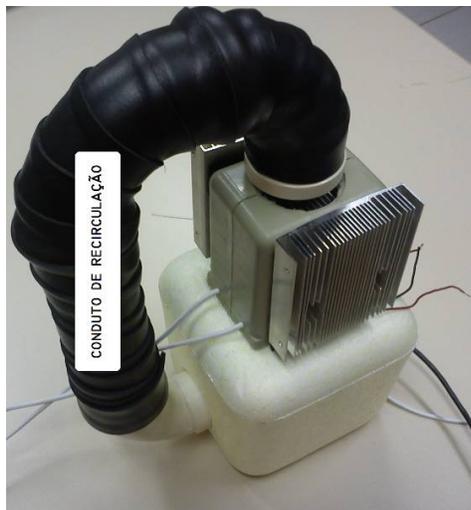


Figura 3.11 – Conduto de recirculação.

Como pode ser visto na figura 3.11, o conduto de recirculação está recoberto por uma camada de fita de isolamento térmica comumente utilizada na instalação de condicionadores da ar comerciais, que tem por objetivo minimizar a troca térmica entre o ar já refrigerado com o ar externo.

3.1.4 Sistema Eletrônico de Controle e Suprimento

Para o suprimento elétrico e controle do funcionamento dos módulos termoelétricos utilizados no protótipo bem com das ventoinhas (*coolers*) foi projetado, dimensionado e implementado um sistema eletrônico conforme figura 3.12. Além de suprir e controlar este sistema auxilia na validação do protótipo por meio da coleta de informações de temperatura em alguns pontos específicos através de sensores e além disso, fornece todos estes dados via comunicação com computador para supervisão visual do funcionamento e controle.

O sistema eletrônico destacado na figura 3.12 é composto por uma unidade de aquisição de informações que compreende os sensores e condicionadores dos sinais. É composto também por uma unidade de controle equipada com uma plataforma de prototipagem microprocessada e uma unidade de potência representada pelo driver demonstrado na figura 3.13.

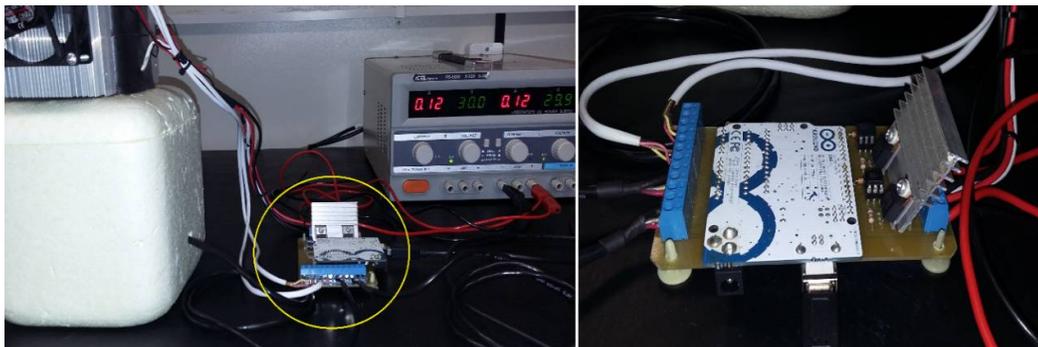


Figura 3.12 – Sistema eletrônico de suprimento e controle.

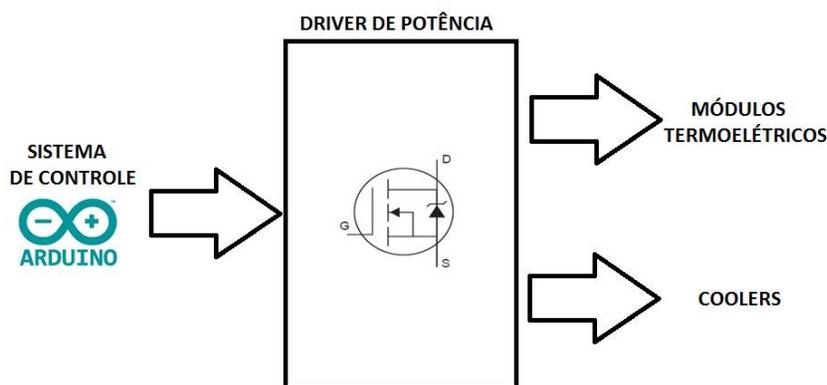


Figura 3.13 – Estrutura do sistema eletrônico de suprimento e controle.

A unidade de aquisição possui sensores de temperatura de baixo custo e facilmente encontrados no mercado, nomeados de LM35, demonstrado na figura 3.14. Esses componentes eletrônicos são capazes de ler temperaturas entre 2°C a 150°C e fornecer sinal de tensão elétrica proporcional com sensibilidade de 10mV/°C [37]. A principal justificativa do uso do sensor LM35 no protótipo em questão foi a sua grande linearidade e facilidade de aplicação, dispensando o desenvolvimento de circuitos amplificadores e filtros como no caso de uso de termopares.



Figura 3.14 – Sensor de temperatura LM35 [37].

No protótipo conforme apresentado na figura 3.15, foram utilizados quatro sensores LM35, sendo um localizado no lado externo do protótipo para identificar posterior comparação; um outro sensor foi localizado internamente ao protótipo para identificar a temperatura dentro do ambiente refrigerado. Além disso, foram localizados um sensor para identificar a temperatura no dissipador interno (lado frio) e um no dissipador externo (lado quente).

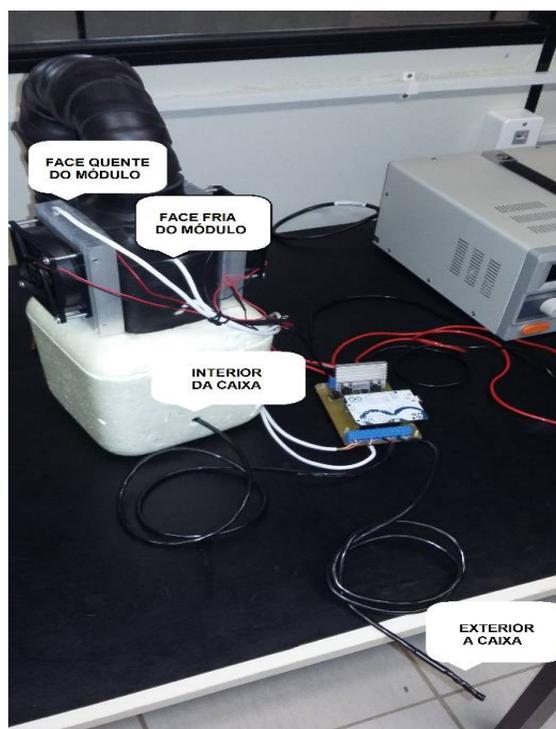


Figura 3.15 – Localização dos sensores de temperatura no protótipo.

A unidade de controle por sua vez é composta por uma plataforma de prototipagem ARDUINO UNO que é um *hardware* programável utilizado em aplicações diversas, capaz de executar algoritmos previamente programados de modo a atuar sobre processos a partir de informações analógicas e/ou digitais recebidas em suas entradas. Simplificando, o arduino é uma placa microprocessada que possui plataforma de programação simplificada e ferramenta *opensource*. A utilização do mesmo justifica-se por sua simplicidade de programação e custo acessível que o tornou bastante popular no meio acadêmico e algumas aplicações do meio residencial, comercial e industrial. [38, 39]

O modelo utilizado pode ser visto na figura 3.16, é o modelo ARDUINO UNO R3 que possui características básicas de um microcontrolador e ATmega328, quatorze pinos de

entradas ou saídas digitais, seis entradas analógicas, cartão de memória *flash* de 32k e velocidade de *clock* de 16MHz [40].



Figura 3.16 – Plataforma de prototipagem ARDUINO UNO R3 [40].

Por fim, a unidade eletrônica ainda possui uma unidade de potência ou também conhecida como *drive* de potência, que é responsável pelo controle das cargas do protótipo que neste caso são os módulos termoeletrônicos e as ventoinhas. As saídas digitais do ARDUINO UNO R3 permitem apenas o chaveamento de correntes na ordem de mA mais especificamente 40mA, enquanto a corrente dos módulos atinge ordem maiores e, portanto, por meio de um arranjo eletrônico comum é possível a realização do controle das cargas descritas.

Esse arranjo é formado, principalmente, por um componente eletrônico denominado *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET). O MOSFET é um componente bastante utilizado no âmbito industrial principalmente para a construção de *drives* de potência por apresentarem rápido chaveamento e baixa resistência. [41, 42, 43]

O modelo do MOSFET utilizado para o controle dos módulos termoeletrônicos é o IRFZ44 (figura 3.17) que possui características de controlar cargas com tensão elétrica até 55V e corrente de até 49A, que como apresentado no decorrer do trabalho são valores maiores que os que ocorrem e, portanto, o componente atende com folga os requisitos [44].

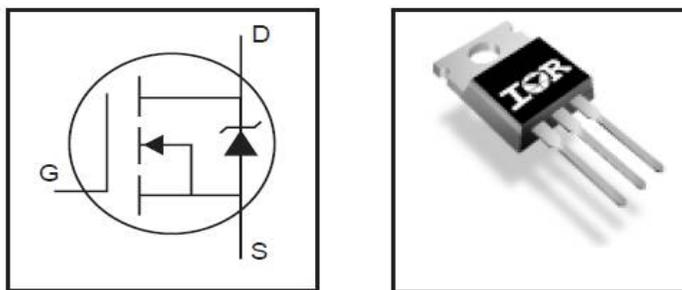


Figura 3.17 – Símbolo e imagem do MOSFET – IRFZ44 [44]

3.1.5 Software LabVIEW

Para que durante a validação do protótipo o processo possa ser acompanhado, ou seja, os dados de temperatura possam ser monitorados visualmente ou ainda, para que os mesmos possam ser coletados e armazenados para posterior discussão dos resultados, utiliza-se nesta trabalho o *software* LabVIEW. Este *software* é uma ferramenta poderosa desenvolvida pela empresa *National Instruments*, com ambiente de programação visual que de modo versátil permite que o usuário possa realizar o controle, aquisição e análise de dados obtidos de simulação ou ainda comunicação com *hardwares* externos [45].

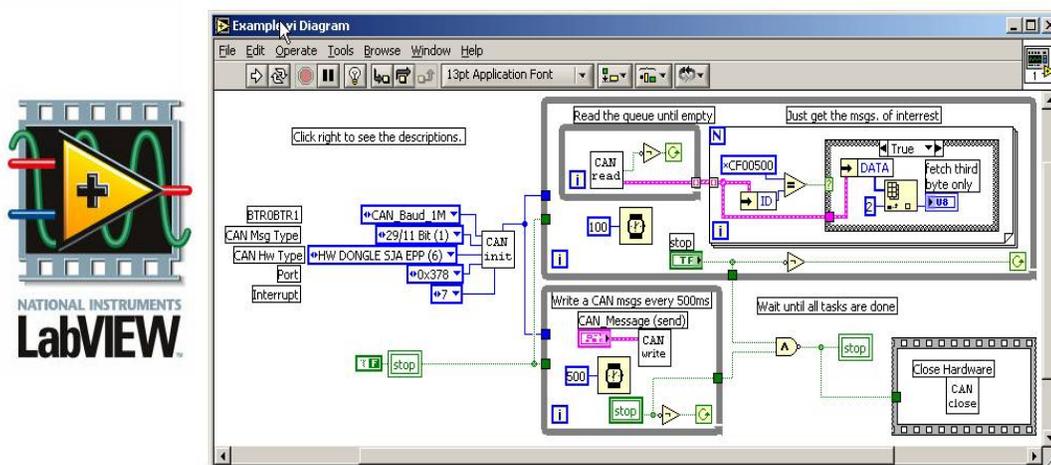


Figura 3.18 – Imagens da tela do LabVIEW [46, 47].

A versão do LabVIEW utilizada neste projeto é a NI LabVIEW 2014, que instalada no computador executa um algoritmo implementado que coleta os dados do ARDUINO UNO R3 por meio de comunicação serial utilizando a porta USB (*Universal Serial Bus*). Os dados recebidos são das medições de temperatura a cada um segundo nos quatro pontos descritos anteriormente, sendo que estes dados são posteriormente armazenados no disco rígido do computador, em formato de planilha, para serem posteriormente analisados. A interface amigável e facilidade de programação permite o desenvolvimento de uma tela de supervisão apresentando os principais dados de forma visual, ou seja, é possível que o usuário possa acompanhar os dados de temperatura nos pontos especificados anteriormente.

3.2 Validação do Protótipo

Uma vez idealizado e implementado, o protótipo é submetido a testes de validação de modo a verificar a sua funcionalidade, ou seja, a sua real capacidade de refrigeração do ar a partir da troca térmica com os módulos termoelétricos. Durante os testes foram coletados dados de temperatura interna e externa de modo a afirmar a redução da temperatura dentro do ambiente refrigerado, também foram coletadas as temperaturas dos dissipadores interno e externo a fim de verificar o seu comportamento durante o processo. Além disso, dados elétricos como tensão e corrente também foram coletados de modo a verificar o rendimento do mesmo e avaliar a sua viabilidade de implementação.

A validação ocorreu em dois momentos com o objetivo de extrair do experimento a maior quantidade de informações que permita indicativos de que a proposta apresenta reais chances de ser replicada em escala real de modo a ser substituído pelos condicionadores de ar comumente utilizados. Para cada momento foi desenvolvida uma metodologia de validação específica, de modo a tornar o processo livre de erros que possam interferir nos resultados.

3.2.1 Primeira metodologia de validação

A primeira metodologia de validação apresentada nas figuras 3.19 e 3.20, consistiu na operação do experimento dentro de uma sala climatizada tendo uma temperatura aproximada de 21°C a 22°C durante todo o período dos testes. Inicialmente o experimento foi ligado sobre uma bancada e após finalizada as conexões elétricas o sistema foi energizado. Neste momento aguardou-se cinco minutos para que os sensores tivessem suas temperaturas estabilizadas. Após esse momento inicial o sistema ficou energizado pelo período de 40 minutos, com registros de um segundo totalizando 2400 registros. A escolha deste tempo de validação se deu pelo fato de que pré-testes anteriores demonstraram que o protótipo desenvolvido não sofre grandes variações após esta faixa de tempo.

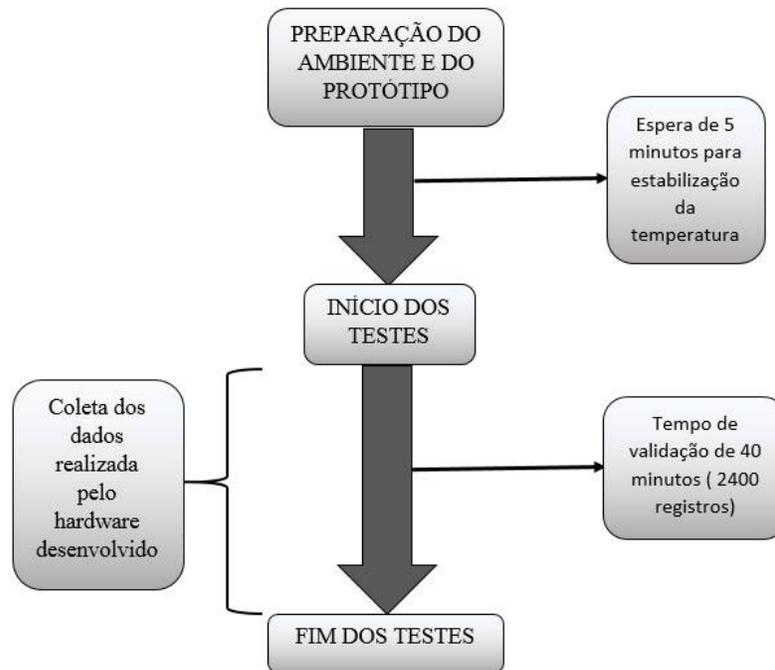


Figura 3.19 – Fluxograma da primeira metodologia de validação.

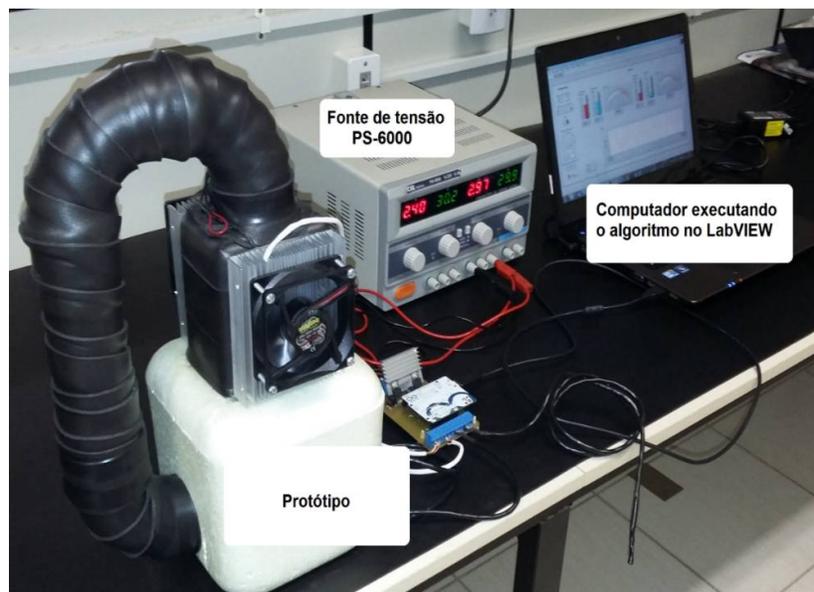


Figura 3.20 – Validação do protótipo utilizando primeira metodologia.

A coleta dos dados de temperatura interna, temperatura externa, temperatura da face quente do módulo e temperatura da face fria do módulo são coletadas e armazenados pelo

próprio sistema eletrônico de controle e suprimento e supervisão desenvolvido conforme visto no item na seção 3.1.4 deste trabalho. Já os dados de corrente elétrica e tensão elétrica são registrados a partir do *display* da fonte de tensão ICEL-MANAUS PS6000 utilizada durante a validação demonstrada na figura 3.21 [48].



Figura 3.21 – Fonte de tensão ICEL-MANAUS PS6000 [48].

3.2.2 Segunda metodologia de validação

A segunda metodologia de validação teve processo semelhante a primeira, ou seja, na mesma sala com os mesmos equipamentos e com temperatura em torno dos mesmos 23°, no entanto na segunda metodologia de validação o protótipo foi coberto por uma caixa de papelão e através de um furo na mesma, após 40 minutos um secador de cabelo foi ligado jogando dentro da caixa ar quente. O objetivo desta validação foi verificar como o sistema se comporta com uma grande variação de temperatura externa ao contrário do primeiro caso onde a temperatura manteve-se praticamente constante, variando apenas 2°C. Neste caso, como pode ser visto nas figuras 3.22 e 3.23, primeiramente cobriu-se o experimento com a caixa e aguardou-se 5 minutos para estabilização dos sensores de temperatura. Posteriormente o sistema foi energizado deixando-o realizar a aquisição de dados os mesmos 40 minutos da primeira validação. Ao atingir 40 minutos uma fonte de calor (secador de cabelo) foi ligado e após 20 minutos o sistema foi desenergizado.

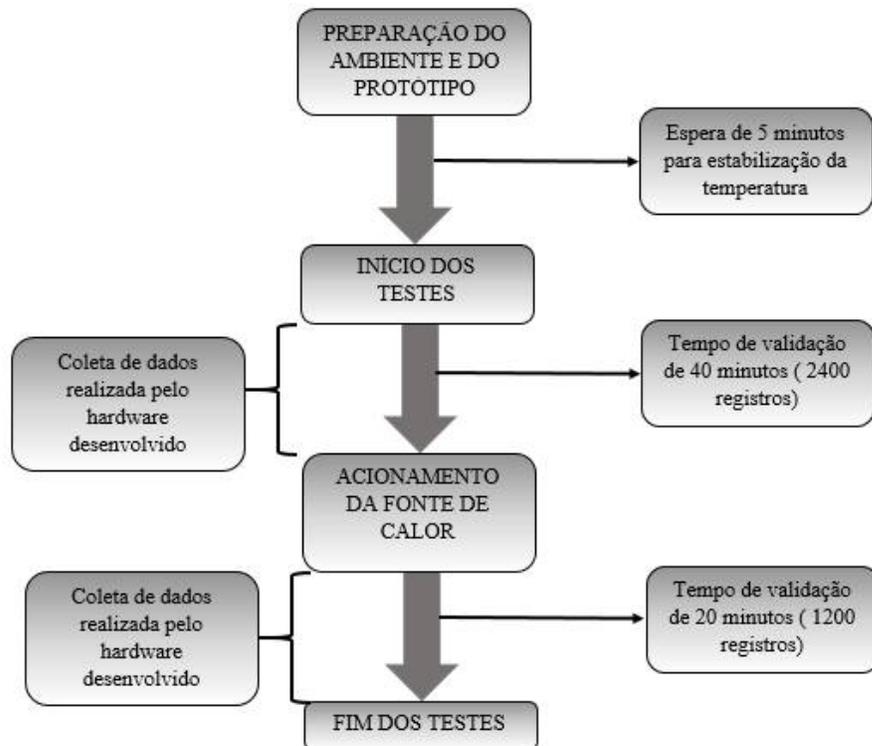


Figura 3.22 – Validação do protótipo utilizando segunda metodologia.



Figura 3.23 – Validação do protótipo utilizando a segunda metodologia.

Assim como no caso anterior, a coleta dos dados de temperatura interna, temperatura externa, temperatura da face quente do módulo e temperatura da face fria do módulo são coletadas e armazenadas pelo próprio sistema eletrônico de controle e suprimento e

supervisão desenvolvido e os dados de corrente elétrica e tensão elétrica são registrados a partir do *display* da fonte de tensão ICEL-MANAUS PS6000.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo sistema de aquisição de ambas as validações apresentaram dados bastante interessantes e que passam a ser apresentados e discutidos a partir deste ponto. A tabela gerada pelo sistema de aquisição é bastante extensa devido ao tempo de validação, no caso 40 minutos para a primeira metodologia de validação e 60 minutos para a segunda, e por isso inviabiliza sua apresentação na íntegra. A tabela 4.1 apresenta imagem parte da tabela para que haja o conhecimento de que forma os dados se apresentam após os seus registros.

Tabela 4.1 - Imagem de parte da tabela gerada no LabView.

TIME	TI	TE	DT	TFQ	TFF	DTF
15:50:47	21,48	21,97	-0,49	22,46	22,46	0,00
15:50:48	21,97	21,97	0,00	22,46	22,46	0,00
15:50:52	21,97	21,97	0,00	22,95	22,46	0,49
15:50:53	21,48	22,46	-0,98	22,95	21,97	0,98
15:50:54	21,97	21,97	0,00	23,44	21,97	1,46
15:50:55	21,97	21,97	0,00	23,44	21,48	1,95
15:50:56	21,48	22,46	-0,98	23,44	21,48	1,95
15:50:57	21,97	21,97	0,00	24,41	21,48	2,93
15:50:58	21,48	21,48	0,00	23,93	21,00	2,93
15:50:59	21,97	22,46	-0,49	24,41	21,00	3,42
15:51:00	21,48	21,48	0,00	24,90	21,00	3,91
15:51:02	21,97	21,97	0,00	24,90	20,51	4,39
15:51:03	21,48	21,97	-0,49	25,39	20,51	4,88
15:51:04	21,97	21,97	0,00	25,88	20,02	5,86
15:51:05	21,97	22,46	-0,49	25,39	20,02	5,37
15:51:06	21,48	21,97	-0,49	26,37	19,53	6,84
15:51:07	21,48	21,97	-0,49	26,86	19,53	7,32
15:51:08	21,48	21,97	-0,49	27,34	19,53	7,81
15:51:09	21,48	22,46	-0,98	27,83	19,53	8,30
15:51:10	21,97	21,97	0,00	27,83	19,53	8,30

Para facilitar a formatação dos dados, as grandezas medidas foram abreviadas e

passam a ser chamadas a partir deste ponto de tags como é comumente chamada em trabalhos técnicos. A primeira coluna com a tag *TIME* apresenta a hora em que cada registro foi realizado. Nela é possível notar que cada registro foi realizado a cada segundo confirmando a informação dada anteriormente. A segunda coluna com a tag *TE* (temperatura externa) informa o registro de temperatura externa, ou seja, a temperatura de fora do ambiente a ser refrigerado. A terceira coluna apresenta a tag *TI* (temperatura interna) que apresenta a informação da temperatura dentro da caixa, ou seja, do ambiente a ser refrigerado. A tag *DT* (delta de temperatura) da quarta coluna mostra o delta de temperatura por meio de um cálculo matemático onde são subtraídas a temperatura interna da temperatura externa dando a noção de quanto o sistema conseguiu reduzir a temperatura dentro do ambiente. A tag *TFQ* (temperatura na face quente) vista na quinta coluna apresenta a temperatura no dissipador de fora, ou seja, o dissipador ligado a face quente do módulo termoeletrônico, sendo que essa informação serve apenas para monitorar se os dissipadores externos estão sendo eficientes na retirada de calor dos módulos. A tag *TFF* (temperatura na face fria) vista na sexta coluna por sua vez demonstra o comportamento da temperatura do dissipador ligado a face fria, ou seja, o que fica dentro do sistema de refrigeração dando uma ideia de qual valor chega a face fria do módulo durante os testes. Por último, e não tão importante, na sexta coluna a exemplo do *DTF* (delta de temperatura nas faces) realiza-se uma subtração entre *TFQ* e *TFF* demonstrando a diferenciação entre as temperaturas nas faces dos módulos. Para proporcionar maior facilidade na leitura dos dados, a tabela 4.2 traz uma relação das tags com seus devidos significados e unidades.

Tabela 4.2 - Tabela de tags.

Nome da tag	Significado da tag	Unidade
TIME	Tempo	hh:mm:ss
TE	Temperatura Externa	°C
TI	Temperatura Interna	°C
DT	Delta de Temperatura	°C
TFQ	Temperatura Face Quente	°C
TFF	Temperatura Face Fria	°C
DTF	Delta de Temperatura Faces	°C

4.1 Resultados da primeira validação

Os resultados da primeira validação são apresentados no gráfico da figura 4.1. Lembrando que nesta validação o sistema foi energizado e mantido nesta situação por 40 minutos e a temperatura externa não sofreu variação considerável durante todo o período de teste.

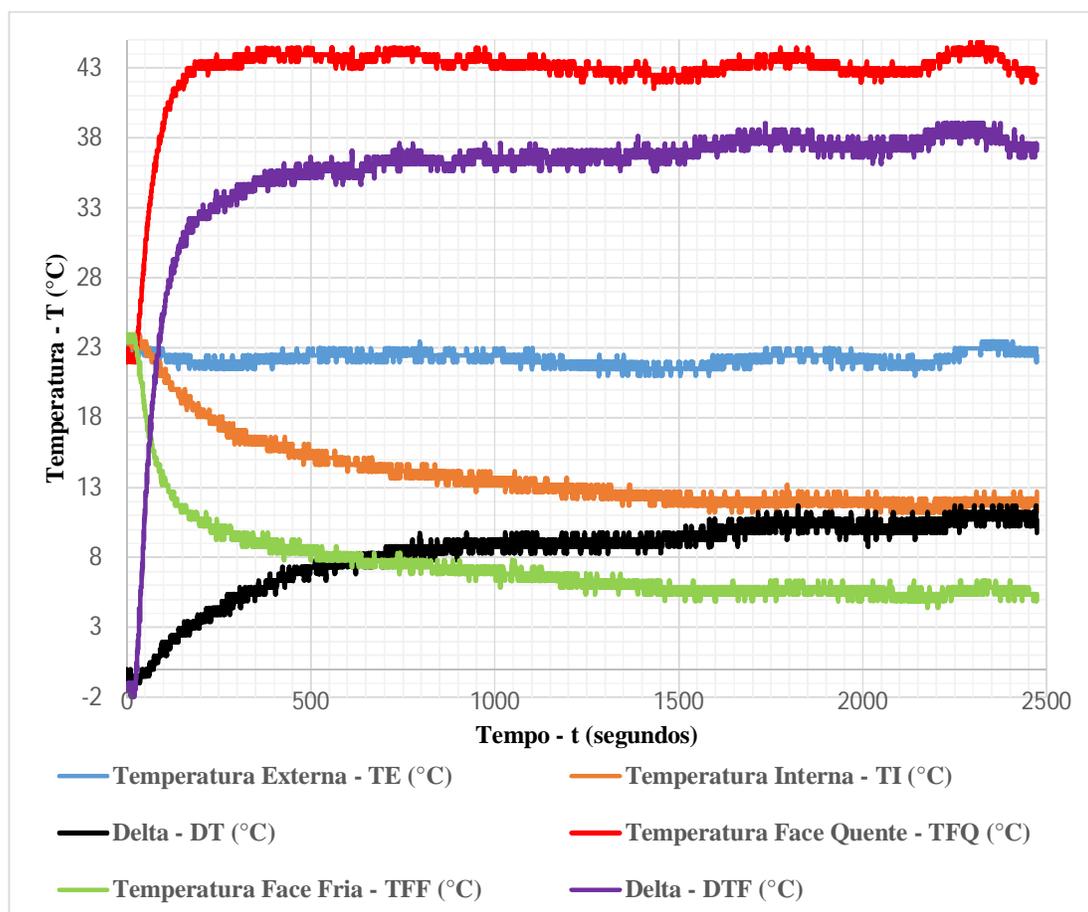


Figura 4.1 – Variações das temperaturas com o tempo (t).

Para melhor visualização da informações, na figura 4.2 apresenta-se um gráfico com os dados da temperatura externa (TE), temperatura interna (TI) e o delta de temperatura (DT). Além disso, para se reduzir o número de dados de modo a facilitar a visualização foram realizadas médias aritméticas a cada 10 segundos e, portanto, o gráfico apresenta 10

vezes menos registros facilitando a visualização gráfica.

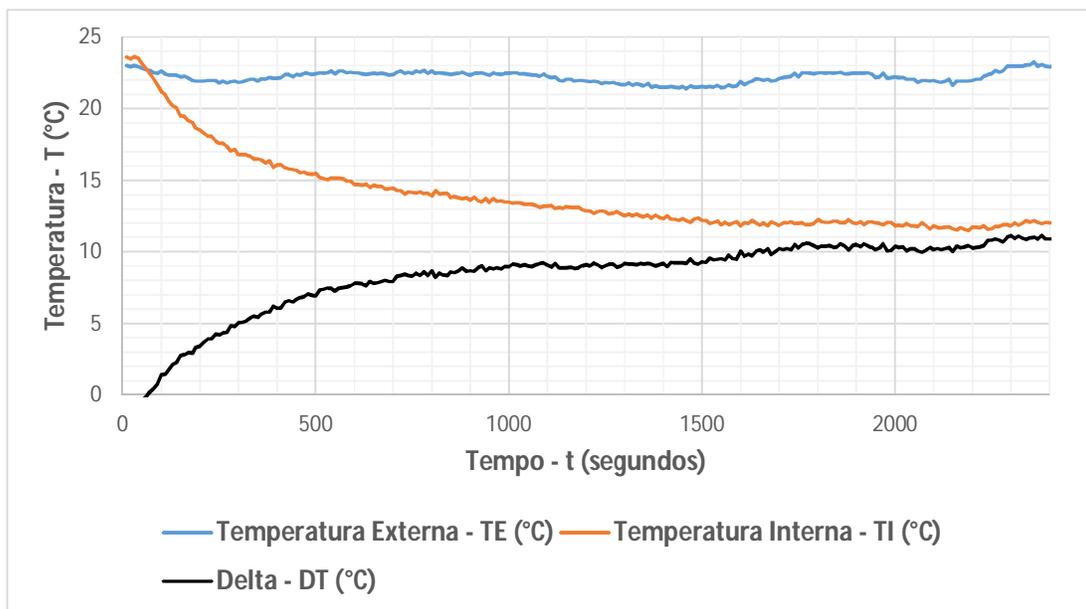


Figura 4.2 – Variação das temperaturas TE, TI e DT com o tempo (t).

No gráfico facilmente se nota que a temperatura externa (TE) mantém-se durante todo o período de validação variando muito pouco, sendo que isso ocorreu pelo fato da sala onde os testes foram realizados ser climatizada. Em relação a temperatura interna (TI) do ambiente a ser refrigerado, tem-se um início ligeiramente maior que o da temperatura externa (TE) e isso se dá pelo fato da caixa estar fechada não sofrendo a influência da climatização da sala onde foram realizadas os testes. Após o início a temperatura interna (TI) vai sofrendo decréscimos de modo que em 500 segundos (aproximadamente 8 minutos) a temperatura já está em 15°C, ou seja, um decréscimo de aproximadamente 8°C em relação aos 23°C iniciais. Avaliando ainda a curva da temperatura interna (TI), observa-se que há uma maior variação inicial sendo que, a partir do tempo de 500 segundos a variação já começa a ser mais lenta atingindo o mínimo de 11°C próximo ao fim do tempo de teste. A curva do delta representada também no gráfico demonstra claramente o quanto a diferença entre a temperatura interna e temperatura externa aumenta com o passar do tempo, dando a nítida clareza quanto ao sucesso da proposta no que tange o aspecto de funcionalidade, precisando ainda avaliar a questão de eficiência. Destaca-se ainda no gráfico que o delta de temperatura inicia abaixo de zero, a exemplo da explicação anterior. Isso ocorre pois inicialmente a

temperatura interna (TI) é um grau maior que a temperatura externa (TE) provavelmente pelo fato de que dentro da caixa que serve como simulação do ambiente refrigerado não haja influência da climatização externa da sala onde foram realizados os testes. A tabela 4.3 traz de forma resumida as informações da primeira validação.

Tabela 4.3 - Resumo dos dados coletados na primeira metodologia de validação.

Grandeza	Valor
Tempo de validação (s)	2400s (40min)
Temperatura inicial externa (°C)	22°C
Temperatura final externa (°C)	21°C
Temperatura inicial interna (°C)	23°C
Temperatura final interna (°C)	11 °C
Tensão elétrica (V)	30Vcc
Corrente elétrica (A)	5,37A

Com os dados coletados do sistema de aquisição é possível como pode ser visto na figura 4.3 ainda avaliar o comportamento das faces dos módulos por meio dos sensores alocados junto aos dissipadores, que por sua vez estão ligados as faces dos módulos termoeletrônicos.

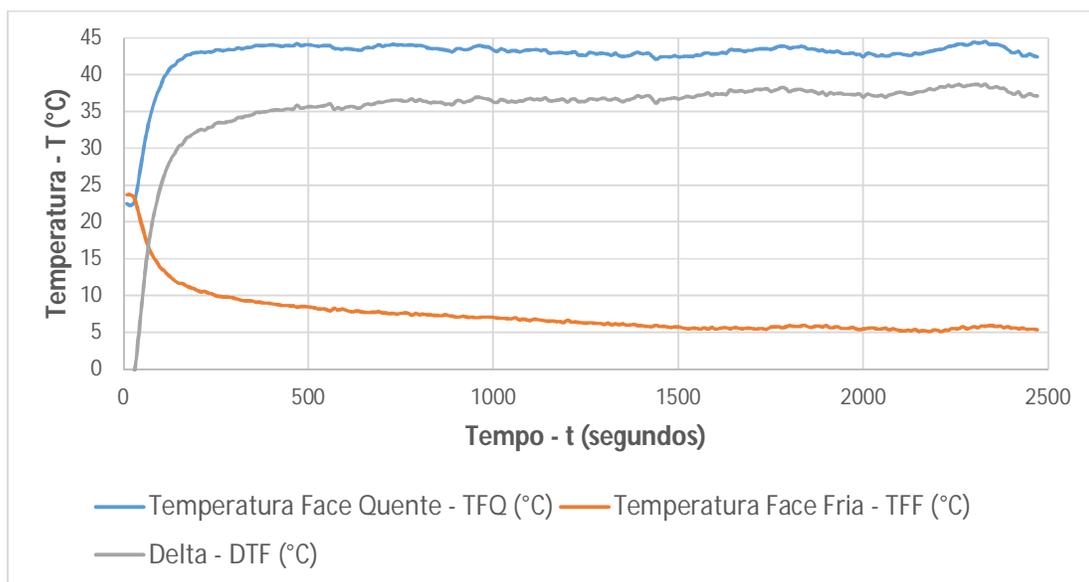


Figura 4.3 – Variações de todas as temperaturas TFQ, TFF e DTF com o tempo (t).

Nota-se no gráfico da figura 4.3, que a temperatura da face quente (TFQ) obtida da medição no dissipador externo tem um incremento acentuado no início, partindo inicialmente de 22°C e após 200 segundos atinge a temperatura de 43°C, temperatura essa que permanece neste patamar com pouca alteração até o fim dos testes. Esta estabilização se dá devido ao fato da ventoinha estar auxiliando na dissipação do calor gerado evitando que o módulo seja danificado por excesso de temperatura. Já a temperatura na face fria (TFF) coletada do dissipador interno apresenta uma variação menos brusca, no entanto, ainda assim, a variação é maior no início e depois com o passar do tempo ela vai sofrendo menor variação. Na validação em questão a temperatura inicial foi de 23°C e ao término dos teste a mesma chegou a 5°C no dissipador interno por onde o ar circula e faz a troca térmica para refrigerar o ambiente.

4.2 Resultados da segunda validação

Os resultados da segunda validação são apresentados no gráfico da figura 4.4. Nesta validação o sistema foi energizado e mantido nesta situação por 40 minutos, com a temperatura externa constante, e após esse tempo uma fonte externa de calor (secador de cabelo) foi ligada simulando uma elevação de temperatura no meio externo ao ambiente a ser refrigerado, sendo que esta fonte de calor manteve-se ligada por 20 minutos.

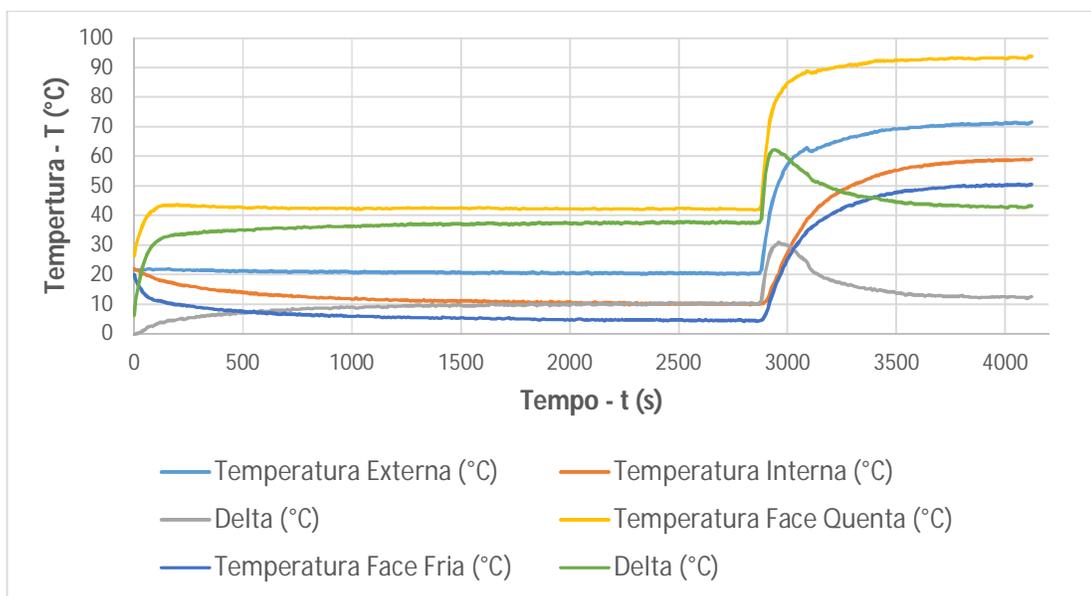


Figura 4.4 – Variação de todas as temperaturas com o tempo (t).

Para uma melhor visualização das informações, na figura 4.5 apresentam-se um gráfico apenas com os dados da temperatura externa (TE), temperatura interna (TI) e o delta de temperatura (DT).

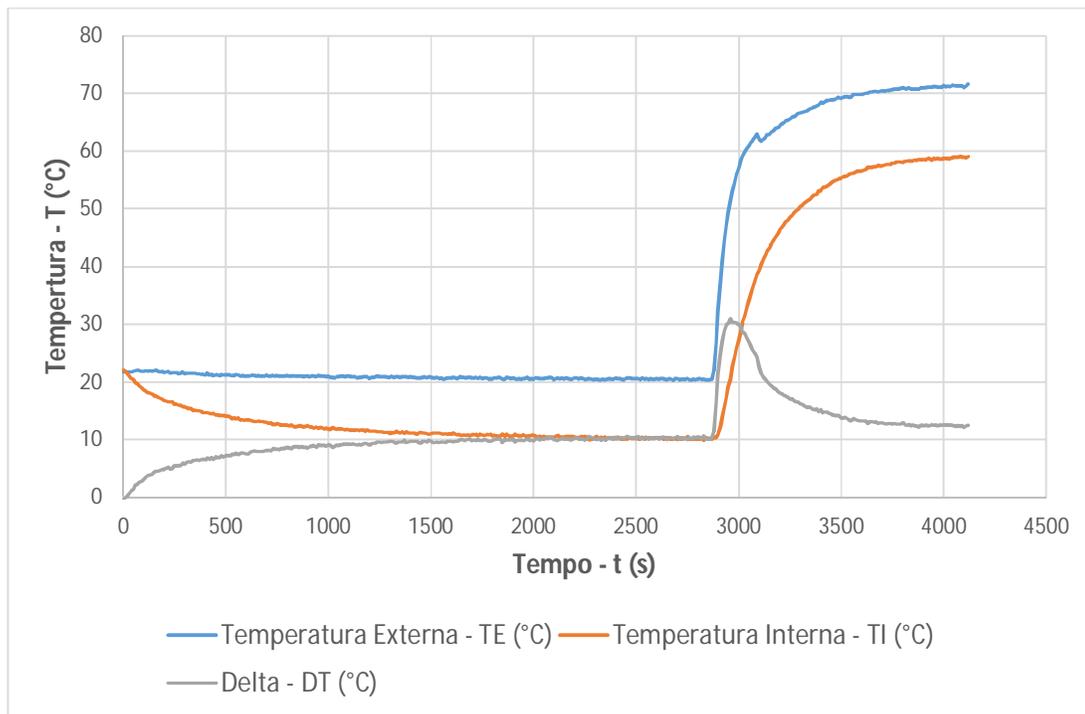


Figura 4.5 – Variação das temperaturas TE, TI e DT com o tempo (t).

Para este caso, o gráfico demonstra que o comportamento até durante os primeiros 40 minutos é análogo ao obtido na primeira metodologia de validação, ou seja, para uma temperatura externa (TE) praticamente constante, o sistema tem sua temperatura interna (TI) rebaixada gradativamente com maior intensidade no início e menor intensidade no fim. Assim como na validação anterior, o delta de temperatura atinge a faixa de 10°C chegando a 11°C em alguns instantes o que comprova o funcionamento anteriormente constatado. A partir de 40 minutos, nota-se que a temperatura externa (TE) sofre uma elevação brusca motivada pelo acionamento da fonte de calor externa que eleva de 23°C para cerca de 60°C em 2,5 minutos atingindo os 70°C até o fim dos testes. O mais interessante a ser notado neste gráfico é o delta de temperatura (DT), que sofre uma brusca elevação nos primeiros instantes da fonte de calor ligada, fenômeno que ocorre pois a temperatura externa (TE) eleva-se mais rápido que a temperatura interna (TI). De qualquer forma, nota-se que mesmo após este instante em que o delta de temperatura (DT) sofre a elevação, já na sequência ele converge

novamente para o valor anterior não chegando aos 10°C, pois o experimento foi desligado antes disso, mas certamente atingiria este valor. Isso deixa claro que o sistema mesmo com a elevação da temperatura externa (TE) tende a manter a diferença de temperatura próximo aos 10°C.

O comportamento das faces do módulo termoeétrico apresentado na figura 4.6 tem comportamento semelhante aos do gráfico apresentado na figura 4.5, ou seja, com a elevação da temperatura externa (TE) a temperatura da face quente (TFQ) aumenta bruscamente enquanto a temperatura da face fria (TFF) eleva-se posteriormente haja vista a inércia térmica. O delta de temperatura entre as faces (DTF) sofre uma rápida elevação e com o passar do tempo vai reduzindo-se buscando acomodar-se no delta anterior.

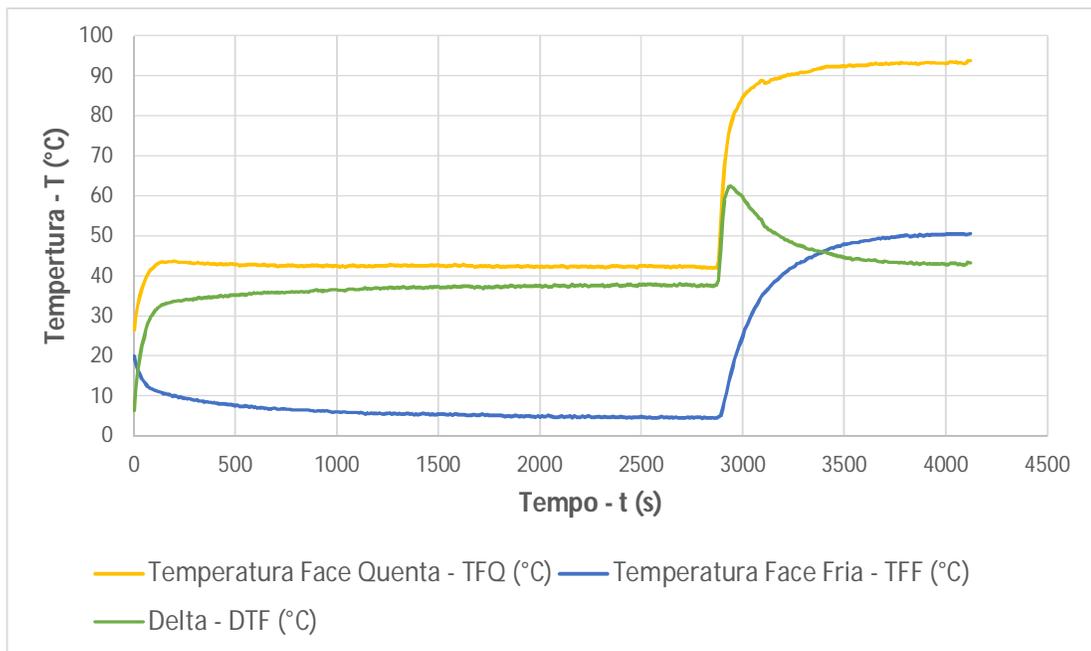


Figura 4.6 – Variação de todas as temperaturas TFQ, TFF e DTF.

4.3 Discussão dos Resultados

Para a avaliação do protótipo desenvolvido toma-se a partir deste momento como base, os resultados obtidos da primeira metodologia de avaliação apresentados na tabela 5.1. Além disso, a discussão dos resultados é dividida em dois momentos, sendo o primeiro momento por meio da avaliação do resultados do protótipo na escala de concepção, e em um segundo momento por meio de extrapolação levando o protótipo a escala residencial para comparação com condicionadores de ar reais.

4.3.1 Análise e discussão dos resultados com protótipo em escala de concepção

Para o cálculo da carga térmica do presente protótipo de ar condicionado baseado no efeito Peltier, necessita-se determinar o ganho de calor sensível e latente do ambiente bem como o ganho de calor total. Enfatiza-se que o somatório dos ganhos de calor sensível instantâneo não é obrigatoriamente a carga de calor sensível de resfriamento do ambiente em um determinado instante. Porém, a carga latente, a ser considerada, é a carga latente instantânea de resfriamento.

O sistema desenvolvido trata de um ar condicionado de volume de ar constante, onde a vazão de ar total, é a soma das vazões de ar determinadas a partir das horas de pico de cada ambiente.

Conforme normas vigentes, para fins de determinação da carga térmica de um ar condicionado deve-se obter:

- Cargas externas – Leva em consideração a carga de calor sensível devido as influências externas, como por exemplo, temperatura do ar exterior, incidência da radiação solar, ganho de calor solar por radiação direta ou indireta (difusa), aberturas, das paredes, divisórias, tetos e pisos, etc.
- Cargas internas – A estimativa da carga interna leva em consideração as fontes de calor latente e calor sensível que existem no ambiente a ser refrigerado. Como por exemplo, pelos ocupantes, luzes, equipamentos eletrônicos, iluminação, infiltração de ar externo qualquer outra fonte geradora de calor, etc.

- Carga de ventilação e infiltração – Leva-se em conta a introdução de ar externo de ventilação para descontaminação do ar ambiente para diluir os odores, como por exemplo, os odores produzidos pelas pessoas, fumaça de cigarros, os odores dos alimentos, etc.

Onde o somatório destas parcelas (cargas externas; cargas internas e carga de ventilação e infiltração) resultam na carga térmica necessária para refrigerar o ambiente.

Como o presente trabalho é um protótipo de escala reduzida foi desconsiderada a parcela inerente às cargas externas do sistema resultando no equacionamento apresentado a partir deste ponto.

Como foi constatado na validação do experimento, a tensão elétrica e a corrente elétrica permaneceram constantes durante todo o tempo de validação, e deste modo, é possível determinar a potência elétrica dissipada pelo protótipo considerando a potência total do mesmo, ou seja, incluindo os *coolers* e módulos termoelétricos, através da Eq. (11).

$$P (W) = V.I \quad \text{Eq. (11)}$$

V : Tensão elétrica (V); e

I : Corrente elétrica (A).

Desde modo, aplicando-se a Eq. (11) com os dados da validação têm-se:

$$P (W) = 30V.5,37A = 161,1W$$

Isso quer dizer que o sistema para atingir os valores de temperatura apresentados nos gráficos resultantes da primeira validação, foi exigida do sistema uma potência instantânea de 161,1W. A composição desta magnitude de potência calculada é dada pela potência de dois módulos termoelétricos, uma ventoinha para circulação de ar dentro do protótipo e outras duas ventoinhas para colaborar com os dissipadores externos na dissipação do calor gerado pelo lado quente dos módulos. Os módulos termoelétricos utilizados conforme pode ser visto na tabela 3.1 podem operar no máximo a 16,4V e por isso foram ligados em série a uma fonte de 30V de modo que a tensão elétrica nos mesmo dividiu-se pela metade, ou seja,

15V para cada um dos módulos. A corrente elétrica, por sua vez, apresentou valor de 5,37 ampères em cada um dos módulos ficando abaixo dos 6,4A máximos apresentados também na tabela 2.1 É importante lembrar que os limites informados pelo fabricante devem ser respeitados, pois caso sejam ultrapassados, haverá excessiva elevação de temperatura para valores além da capacidade de dissipação dos componentes e por consequência acabará ocorrendo a queima dos mesmos.

O gráfico da figura 4.7 apresenta como está composta a potência elétrica calculada a partir dos dados de tensão e corrente medidos, permitindo assim identificar qual é a parcela correspondente aos equipamentos de circulação de ar (ventoinhas) e os de bombeamento térmico (módulos termoelétricos).

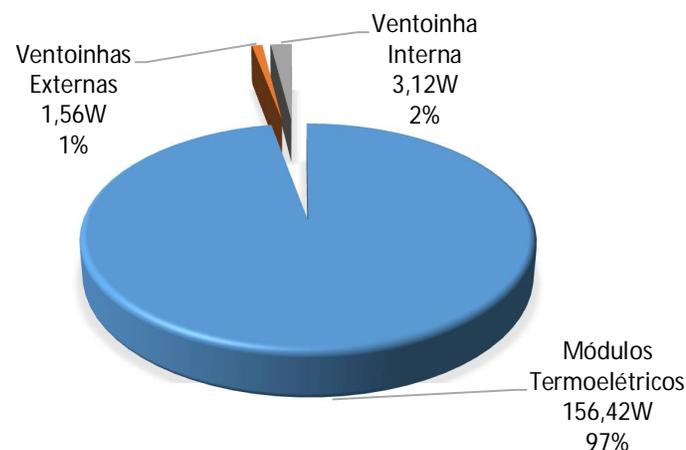


Figura 4.7 – Composição da potência total do experimento.

Objetivando conhecer o rendimento do protótipo do sistema de refrigeração é necessário que se tenha a potência de entrada, no caso 161,1W conforme calculado anteriormente e também a potência de saída, ou seja, a potência térmica que proporcionou o comportamento apresentado nos dados de validação. Para que a potência de saída seja determinada primeiramente, se faz necessário determinar-se a potência térmica ativa e passiva.

A potência térmica ativa é, no caso do protótipo, a potência da ventoinha que se encontra dentro do sistema e que tem a função de conduzir o ar de modo forçado no interior do protótipo [23] e em relação ao que foi citado anteriormente refere-se a carga interna. Deste modo, pela Eq. (9) chega-se ao seguinte valor a partir das informações da tensão

aplicada na ventoinha e corrente drenada pela mesma.

$$Q_{ativa} (W) = V \cdot I$$

$$Q_{ativa} (W) = 24 \cdot 0,13 = 3,12W$$

Para a determinação da carga passiva, primeiramente é preciso lembrar que na maioria dos sistemas de refrigeração de áreas internas a potência passiva dissipada é a combinação da convecção e condução, ou seja, as cargas de ventilação e de infiltração de temperatura que para sua determinação utiliza-se a Eq. (10) [23].

$$Q_{passiva} (W) = \frac{A \Delta t}{\frac{x}{k} + \frac{1}{h}}$$

$$Q_{passiva} (W) = \frac{0,153 \times 11}{\frac{0,031}{0,031} + \frac{1}{250}} = 5,15W$$

A área (A) utilizada no cálculo é referente a soma das áreas da face do ambiente a ser refrigerado (figura 3.10) obtida por meio da soma das áreas das 6 faces do ambiente refrigerado (quatro faces laterais, uma face superior e uma face inferior); o delta de temperatura (Δt) é o valor da diferença de temperatura atingida ao término da validação apresentado na tabela 3.1 e (x) é a espessura das paredes do ambiente refrigerado. Além disso, para o cálculo apresentado a condutividade térmica (k) da parede é um valor conhecido e diferente para cada material, no caso do isopor este valor é 0,031 W/m°C conforme apresentado na tabela 2.2. E por fim, o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) pode ser visto na tabela 2.1 e no caso de uma condução forçada como no experimento, pode variar de 25 a 250. Como W/m² °C na situação apresentada não é possível ter todos os dados para determinar o valor de k e por isso foi adotado o valor maior (250 W/m² °C), pois isso implica que o resultado da potência térmica passiva (Q_{passiva}) será menor que o real e desta forma do ponto de vista de dimensionamento está sendo observado o pior caso.

Com posse dos resultados da potência térmica ativa e potência térmica passiva, por meio da Eq.(8) chega-se ao valor da potência térmica necessária para que o protótipo comporte-se como visto no teste de validação.

$$Q_{térmica} (W) = 3,12W + 5,15W = 8,27 W$$

A potência térmica ($Q_{\text{térmica}}$) aponta teóricamente a magnitude da potência necessária para que o protótipo consiga garantir uma diferença de temperatura entre o ambiente interno e o externo de 11°C . No entanto, é possível verificar que a potência térmica necessária de $8,27\text{ W}$ não corresponde a potência de entrada encontrada na validação que foi de $161,1\text{ W}$ para conseguir os mesmos 11°C de delta, o que é óbvio, pois sabe-se que em qualquer conversão de energia existem perdas. É possível estimar qual o rendimento do protótipo elaborado por meio da equação abaixo demonstrada.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{Carga térmica (W)}}{\text{Potência de Entrada (W)}} \times 100 \quad \text{Eq. (12)}$$

No caso do protótipo a potência de entrada é representada pela potência que o sistema solicita da fonte, ou seja, $161,1\text{ W}$ e a carga térmica é representada pela potência térmica calculada necessária dentro do ambiente que no caso é $8,27\text{ W}$.

$$\text{Rendimento} = \frac{8,27\text{ (W)}}{161,1\text{ W}} \times 100 = 5,1\%$$

Conforme já mencionado durante a fundamentação, os módulos termoeletrônicos apresentam baixo rendimento de conversão e isso foi constatado na validação do experimento desenvolvido que atingiu apenas um rendimento de $5,1\%$. A representação da potência dos condicionadores de ar é expressa em BTU/h (*British Thermal Unit*), unidade que representa a capacidade de refrigeração e que é obtida por meio de um fator como pode ser visto na tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 - Tabela de conversões [29]

Dado	Utilizar	Para obter
Unidade no SI	Fator	Unidade
Watt	0,2930711	BTU/hr
M	39,37	in
$^{\circ}\text{C}$	$1,8 (^{\circ}\text{C}) + 32$	$^{\circ}\text{F}$
N/m^2 (Pa)	0,145E-03	Lbs/in ²

Deste modo então, pode-se dizer que a capacidade de refrigeração do protótipo é $8,27\text{ W}$ ou $28,21\text{ BTU/h}$.

4.3.2 Análise e discussão dos resultados extrapolando os resultados para escala real de aplicação

Com o protótipo desenvolvido e validado busca-se encontrar algum parâmetro que possa apontar se é viável, técnica e financeiramente, a implementação do mesmo em escala real. A melhor forma de obter este parâmetro é de forma comparativa, ou seja, comparando o que foi desenvolvido com um ar-condicionado comercializado. O fato do protótipo ter sido desenvolvido em escala reduzida dificulta esta comparação, uma vez que os condicionadores de ar comercializados têm capacidade de refrigeração muito maior que o protótipo.

Para o dimensionamento de condicionadores de ar, utiliza-se cálculos térmicos específicos que determinam a potência térmica em BTU/h necessária para que o sistema consiga retirar calor do ambiente de modo a atingir o conforto térmico. Estes cálculos preveem quantidade de aberturas do ambiente (portas e janelas), quantidade de equipamentos e pessoas dentro do ambiente, posição solar e demais parâmetros. Entretanto existe um método empírico utilizado pelas empresas de refrigeração que consideram de um modo geral que se deva adotar 600BTU/h por metro quadrado de área, ou seja, para refrigerar um ambiente basta considerar a necessidade de 600BTU/h para cada metro quadrado.

O experimento necessita de 28,21BTU/h para refrigerar o ambiente do protótipo que tem uma área de 0,0256m² (área do ambiente com dimensões de 0,16m de largura por 0,16m de comprimento). Extrapolando de forma linear, teoricamente seriam necessários portanto aproximadamente 1.100BTU/h para refrigerar um ambiente de 1m² enquanto nos condicionadores de ar como já mencionado anteriormente essa relação é de 600BTU/h.

Ampliando ainda mais a comparação pode-se dizer que um ar condicionado de 7500BTU/h comercial consegue refrigerar uma área de 12m² e para a mesma área seria necessário um ar condicionado termoelétrico de 13200BTU/h.

Com isso pode-se concluir que nas condições apresentadas no decorrer deste trabalho certamente a utilização de módulos termoelétricos TEC1-12706 para refrigeração de ambientes é viável tecnicamente pois, como pode ser visto, o sistema é capaz de retirar calor do ambiente trazendo o conforto térmico.

Do ponto de vista econômico este método é inviável, pois a quantidade de módulos que para atender esta exigência seria de aproximadamente um mil módulos TEC-12706, o

que elevaria o custo do equipamento à valores impraticáveis comercialmente, além de ter um consumo nenhum pouco atrativo.

5. CONCLUSÃO

Inicialmente o uso de módulos termoelétricos para refrigeração de ambientes em substituição aos condicionadores de ar utilizados, apresentou-se como uma possibilidade interessante haja vista a inexistência de estudos para sua aplicação no âmbito residencial ,e também, pela redução de equipamentos como compressor que conseqüentemente influenciaria de forma direta na redução expressiva do ruído e vibração gerado pelos equipamentos atualmente comercializados.

Entretanto, durante o início do estudo essa possibilidade começou a ser desconstruída, primeiramente pelo rendimento dos módulos que conforme visto em literaturas anteriores é muito menor que o dos condicionadores de ar comerciais. Mesmo com estudos iniciais apontando a inviabilidade da ideia continuaram-se as pesquisas com o objetivo de constatar essa informação teórica a partir do desenvolvimento de um protótipo permitindo que testes pudessem trazer o indicativo real por meio da validação do mesmo.

O protótipo foi montado em escala reduzida para conseqüentemente reduzir os custos de montagem do mesmo e posteriormente foi validado comprovando as informações iniciais de baixíssimo rendimento, chegando a um valor de pouco mais de 5%. Isso impossibilita a aplicação do mesmo em escala real, tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro, e ainda assim, caso os resultados do rendimento fossem um pouco melhores, precisaria ser avaliado criteriosamente, pois para se obter o gradiente de 11 °C o protótipo precisou de 40 minutos o que é impraticável em escala comercial.

Mesmo com o resultado negativo acredita-se que ainda possam ser realizadas alterações no sistema desenvolvido de modo que a eficiência seja aumentada melhorando os resultados obtidos. Uma destas mudanças passaria por um dimensionamento mais adequado para os dissipadores que para aplicação proposta foi realizada de modo empírico, ou seja, utilizou-se um tamanho de dissipador disponível e com características que permitissem sua inserção no protótipo. Além disso, ações para maximizar a troca térmica entre os dissipadores e os módulos também poderiam auxiliar no rendimento como por exemplo o uso de pastas térmicas como maior capacidade de dissipação térmica. Por fim, também seria preciso criar um mecanismo que evitasse ao máximo que o calor dissipado pelo dissipador do lado quente seja de alguma forma conduzido ao lado frio o que não foi previsto

inicialmente na concepção do protótipo desenvolvido.

Conclui-se portanto que a utilização de módulos termoeletricos TEC1-12706 nas condições previstas e aqui apresentadas para refrigeração de ambientes está fora da realidade de aplicação sendo preciso portanto, novos estudos utilizando módulos diferentes, arranjos físicos diferentes e outras abordagens de modo a maximizar a baixa eficiência encontrada.

5.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros segue algumas alternativas para melhoria deste trabalho:

- Aplicar outras metodologias de cálculo para tentar obter com maior precisão a relação entre a potência de entrada e a potência de saída;
- Buscar novos arranjos dos módulos ou do protótipo objetivando maximizar a eficiência do mesmo aproximando a potência de entrada e de saída;
- Verificar diferentes módulos com maior eficiência objetivando tornar o protótipo viável economicamente a fim de justificar sua implementação em escala real.

6. REFERENCIAS

- [1] ANDO JUNIOR, Oswaldo Hideo. **Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. 2014. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- [2] IZIDORO, C. L. et al. Bancada para análise de materiais termoelétricos. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS, 3. RenoMat, 2013, Porto Alegre.
- [3] FERNANDES, Alberto Emanuel Simões dos Santos. **Conversão de Energia com Células de Peltier**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energias Renováveis - Conversão Elétrica e Utilizações Sustentáveis, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [4] LINDLER, Keith W. Use of Multi—Stage Cascades to Improve Perfomance of Thermoelectric Heat Pumps. **Energy Comers. Mgmt**, v. 39, n. 10, p. 1009-1014, 1998.
- [5] D.M. ROWE, **CRC Handbook of thermoelectrics**, CRC Press, 1995.
- [6] MIN, Gao. Thermoelectric Energy Harvesting. **Artech House**, v. 413-414, p. 325-336, 2010.
- [7] SOUZA, D. O. **Condicionador de Ar para Cabine de Caminhão, utilizando Células Peltier**. 62 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2011.
- [8] PINDADO, R. H. **Climatización Mediante Células Peltier**. Proyecto Fin De Carrera, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, Septiembre de 2008.
- [9] W. He et al. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. **Applied Energy**, v. 143, p. 1–25, 2015.
- [10] CAMPOS, D. N.; OLIVEIRA, T. C.. **Controlador de Temperatura Microprocessado Utilizando Célula Peltier**. 84 f. Monografia (Engenharia Elétrica). Universidade Gama Filho. Rio de Janeiro, 2011.
- [11] H. Sofrata. Heat Rejection Alternatives for Thermoelectric Refrigerators. **Energy Convers. Mgmt**, v. 37, n. 3, p. 269-280, 1996.
.SOFRATH. SOFRATAH. SOFRAT
- [12] MANIKANDAN, S.; KAUSHIK, S.C. Thermodynamic studies and maximum power point tracking in thermoelectric generator—thermoelectric cooler combined system. **Cryogenics**, v. 67, p. 52-62, 2015.

- [13] ELSHEIKH, Mohamed Hamid. A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 30, p. 337-355, 2014.
- [14] POLOZINE, Alexandre; SIROTINSKAYA, Susanna; SCHAEFFER, Lírio. History of Development of Thermoelectric Materials for Electric Power Generation and Criteria of their Quality. *Materials Research*, p.1260-1267, set. 2014.
- [15] OLIVEIRA, André Rui Poletti de; LEISMANN, Ismael Augusto; SANTIN, Altair Olivo. **COOLER PELTIER MICROCONTROLADO**. 2007. Disponível em: <<http://www.ppgia.pucpr.br/~santin/ee/2007/1s/3/>>. Acesso em: 08 set. 2015.
- [16] MÓDULO, Célula de Peltier ou pastilhas térmicas, como funciona? 2009. Disponível em: <<http://mecatronicahoje.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 08 set. 2015.
- [17] SOUZA, Diego Henrique Cunha de. **Otimização do Uso de Refrigeradores Termoeletricos em Processos de Refrigeração**. Brasília: Universidade de Brasília, 2007. 59 p.
- [18] O. H. Ando Jr. et al. Acquisition and Monitoring System for TEG Characterization. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, p. 7, 2015.
- [19] MOURA, José Américo de Sousa. **Filmes nanoétricos de FeN e AlN crescidos por Sputtering e aplicações do Efeito Peltier**. 2010. 147 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [20] CHEN, L. et al. Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric-generator. *Applied Energy*, v. 82, p. 300-312, 2005.
- [21] ZHAO, D.; TAN G.. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and Applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 66, p.15-24, 2014.
- [22] ASTRAIN, D.; VI, J.G; DOMINGUEZ, .M. Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, p. 2183-2200, 2003.
- [23] GAO MIN, D.M. ROWE, Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators. *Applied Energy*, v. 83, n. 2, p.133-152, Feb. 2006.
- [24] GONÇALVES, L. M.. **Microssistema termoeletrico baseado em teluretos de bismuto e antimônio**. 2008. 200 f. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia Eletrônica Industrial de Computadores, Departamento de Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2008.
- [25] CONSUMO de Energia Elétrica Cresceu 3,5% em 2013. *Jornal do Brasil*, janeiro de 2013. Disponível em: <http://www.jb.com.br/economia/noticias/2014/01/29/consumo-de-energia-eletrica-cresceu-35-em-2013/>. Acesso em: 27 ago. 2014.

- [26] VILLANI, Emília. **Abordagem Híbrida Para Modelagem de Sistemas de Ar Condicionado em Edifícios Inteligentes**. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- [27] SCHULZ, Daniel Filisberto. **Condicionadores de Ar**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/condicionadores_ar.htm. Acesso em: 27 ago. 2014.
- [28] QUAL é o princípio de funcionamento de um Ar Condicionado? Disponível em: http://www.adias.com.br/funcionamento_do_ar. Acesso em: 15 jan.2013.
- [29] THERMOELECTRIC Cooling Systems Design Guide. Disponível em: <http://tellurex.com/wp-content/uploads/2015/01/SA-10-FRM-01-Design-manual.pdf>. Acesso em: 15 set. 2014.
- [30] ALMEIDA, Ayrton Guissoni. **Adega climatizada para vinhos utilizando a célula de Peltier**. TCC (Graduação). Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília.
- [31] CAMARGO, José Rui; OLIVEIRA, Maria Claudia Costa de. Aplicação de Módulos Termoelétricos para Condicionamento de Ar. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 17, n. 1, p. 69-75, 2011.
- [32] CAMARGO, José Rui; OLIVEIRA, Maria Claudia Costa de. **Projeto de um Condicionador de ar Automotivo Peltier-Seebeck Autosustentável**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, IV, 2010, Campina Grande, Paraíba, 2010.
- [33] DO AMARAL, Daniel Lopes. **Melhoria na Eficiência Energética de um refrigerador Termoelétrico: Controle Preditivo Baseado em Modelo Aplicado à Regulação da Temperatura do Reservatório de Água Gelada**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- [34] SILVERIO, Letícia Borges. **Análise de um Condicionador de Ar Automotivo Utilizando o Efeito Termoelétrico**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2012.
- [35] FILHO, João Pereira Brito Filho et al. **Aquecimento, Resfriamento e Controle de Temperatura de um Ambiente Fechado Utilizando Células Peltier**. In: IV CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, IV, 2010, Campina Grande, Paraíba, 2010.
- [36] **Datasheet TEC1-12706**. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227422/ETC2/TEC1-12706.html>. Acesso em: 15 jul. 2015.
- [37] FARIHAH, Shariff; NASRUDIM, Abd Rahim; HEW, Wooi Ping. Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system. **Expert**

Systems with Applications, v. 41, p. 1730-1742, 2014.

[38] AL-HAIJA, Qasem abu et al. A Tiny RSA Cryptosystem Based On Arduino Microcontroller Useful For Small Scale Networks. **Procedia Computer Science**, v. 34, p. 639-646, 2014.

[39] HELMUT, Faugel; BOBKOV, Volodymyr. Open source hard- and software: Using Arduino boards to keep old hardware running: Fusion Engineering and Design. **Elsevier**, p. 1276-1279, 2013.

[40] ELECTRONICS, Sparkfun. **Arduino Uno R3**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/11021>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

[41] Michez A, Boch J et al. Modeling dose effects in electronics devices: dose and temperature dependence of power MOSFET. **Microelectron Reliab**, v. 53, n. 1306-1310, 2013.

[42] ÖZCELEP Y, KUNTMAN A. A new time-dependent mobility degradation model for MOS transistors. **Microelectron Int**, v. 29, n. 3, p.141-144, 2012.

[43] HATICE Gül Sezgin; YASIN Özçelep. Characterization and modeling of power MOSFET switching times variations under constant electrical stress. **Microelectronics Reliability**, v. 55, p. 492-497, 2015.

[44] INTERNATIONAL Rectifier. **Datasheet IRFZ44**. Kansas St., Disponível em: <www.irf.com>. Acesso em: 26 fev. 2015.

[45] LIN, Wang et al. The Application of LabVIEW in Data Acquisition System of Solar Absorption Refrigerator. **Elsevier**, p.1496-1502, 2012.

[46] LABORATÓRIO de Garagem. **Desenvolvedores Independentes de Ciência e Tecnologia**: LabView. Disponível em: <<http://labdegaragem.com/group/labview>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

[47] COMSOL Ltd - Computer Solutions. **Can Software from Peak**. Disponível em: <<http://www.computer-solutions.co.uk/gendev/can-software.htm>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

[48] ICEL MANAUS. Instrumentos de Medição. Disponível em: <http://www.icel-manaus.com.br/resultado_busca.php>. Acesso em: 26 fev. 2015.