

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Curso de Especialização em Condicionamento de Ambientes e Refrigeração
CECAR 2010

ANDRÉ FONSECA PEIXOTO

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA
METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE MÓDULOS PARA
REFRIGERADORES TERMOELÉTRICOS DOMÉSTICOS

Belo Horizonte
Agosto de 2011

ANDRÉ FONSECA PEIXOTO

REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA
METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE MÓDULOS PARA
REFRIGERADORES TERMOELÉTRICOS DOMÉSTICOS

Trabalho de Monografia do Curso de Especialização em Condicionamento de Ambientes e

Refrigeração – CECAR 2010

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Escola de Engenharia

Universidade Federal de Minas Gerais

Orientador: Professor Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury

Belo Horizonte

Agosto de 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais uma etapa concluída, por sua companhia fiel. Agradeço ao professor Doutor Ricardo Koury pela orientação e disponibilidade, aos demais professores do Curso de Especialização CECAR 2010 pela valiosa experiência transmitida, aos familiares e a Bel que compreenderam minhas ausências e aos colegas de classe, em especial Marlene, que além de conhecimento técnico, ofereceram amizade e companheirismo.

“The soul, like the body, lives by what it feeds on.”

Josiah Gilbert Holland (1819 - 1881).

RESUMO

Os módulos termoeétricos são dispositivos capazes de converter energia elétrica em gradiente de temperatura e vice-versa. Esses dispositivos são caracterizados por serem silenciosos, terem dimensões e pesos reduzidos e apresentarem controle preciso de temperatura. Enquanto refrigeradores, os módulos termoeétricos têm ainda a vantagem da não utilização de fluidos refrigerantes nocivos ao meio ambiente. Apesar do COP dos refrigeradores termoeétricos ser menor que aqueles dos processos de refrigeração por compressão de vapor, pesquisadores do mundo inteiro têm se esforçado para desenvolver refrigeradores domésticos para melhor explorar as vantagens associadas a essa tecnologia de conversão e utilização de energia. Esse trabalho apresenta os princípios da termoeletricidade, algumas aplicações atuais e perspectivas futuras de utilização e os fundamentos da refrigeração termoeétrica. O trabalho também propõe uma metodologia de seleção e análise de módulos termoeétricos disponíveis no mercado para refrigeração termoeétrica a partir de parâmetros preestabelecidos. Os resultados obtidos com a metodologia de seleção e análise aplicada a um estudo de caso mostraram coerência entre os valores de COP encontrados na literatura e os valores obtidos no estudo de caso. Dessa forma, os resultados indicam que a metodologia proposta pode ser uma ferramenta útil para seleção e análise de módulos termoeétricos de simples estágio para utilização na refrigeração termoeétrica doméstica.

Palavras chave: Termoeletricidade, refrigeração termoeétrica, refrigerador termoeétrico.

ABSTRACT

Thermoelectric modules are devices that convert electrical energy into temperature gradient and vice versa. These devices are characterized by being silent, having reduced dimensions and weights and precise temperature control. While refrigerators, thermoelectric modules have the advantage of not using refrigerants harmful to the environment. Although the COP of thermoelectric coolers is smaller than those of the processes of vapor compression cooling, researchers worldwide have struggled to develop domestic refrigerators to better exploit the advantages associated with this technology. This paper presents the principles of thermoelectric, some current applications and future prospects of use and the fundamentals of thermoelectric cooling. This work also proposes a methodology for selection and analysis of thermoelectric modules available in the market for thermoelectric cooling. The results obtained with the methodology applied to a case study showed consistency between the values of COP found in the literature and those obtained for that case study. Thus, the results indicate that the proposed methodology can be a useful tool for selection and analysis of thermoelectric modules for use in single stage domestic thermoelectric cooling.

Key words: Thermoelectricity, thermoelectric cooling, thermoelectric refrigerator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estabelecimento de força eletromotriz na junção de dois materiais condutores	4
Figura 2.2 – Esquema básico de um módulo termoelétrico	11
Figura 2.3 – Configuração típica de um módulo termoelétrico (adaptado de Gromov, 2011)	13
Figura 2.4 – Perfil de temperatura através do módulo termoelétrico (adaptado de Stockholm, 1993)	14
Figura 2.5 – Módulo termoelétrico miniatura (www.microlpelt.com, 03/04/2011).....	15
Figura 2.6 – Módulos termoelétricos de dois (a) e três (b) estágios www.kryotherm.ru/index.phtml?tid=76, 21/04/2011)	15
Figura 2.7 – Arranjo típico de módulo termoelétrico para geração de energia (adaptado de Riffat e Ma, 2003).....	18
Figura 2.8 – Espaço entre os termoelementos do módulo termoelétrico (adaptado de Riffat e Ma, 2003).....	19
Figura 2.9 – Montagem convencional de um módulo termoelétrico para refrigeração (adaptado de Riffat e Ma, 2003).....	21
Figura 2.10 – Esquema básico de um refrigerador termoelétrico (adaptado de Min e Rowe, 2006)	22
Figura 2.11 – Protótipo de minirrefrigerador (adaptado de Menezes, 2007)	24
Figura 3.1 – Fluxograma para seleção e análise de módulo termoelétrico para refrigeração (adaptado de Tan e Fok, 2008)	28
Figura 3.2 – Curva de desempenho normalizada (adaptado de Tan e Fok, 2008)	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V.K}^{-1}$]. Fonte: Kasap (2001).....	5
Tabela 2.2 – Coeficiente de Peltier Cu-Ni. Fonte: Menezes (2007).....	7
Tabela 2.3 – Fabricantes e fornecedores de módulos termoelétricos	10
Tabela 2.4 – Propriedades do telureto de bismuto. Fonte: Stockholm (1997)	12
Tabela 2.5 – Características operacionais. Fonte: Catálogos dos fabricantes.	16
Tabela 4.1 – Parâmetros de seleção de módulos termoelétricos	38
Tabela 4.2 – Módulos termoelétricos pré-selecionados. Fonte: Catálogos dos fabricantes.	39
Tabela 4.3 – Características dos módulos termoelétricos pré-selecionados.....	39
Tabela 4.4 – Parâmetros operacionais dos módulos pré-selecionados.....	40
Tabela 4.5 – Atualização do valor do parâmetro T_h	40
Tabela 4.6 – Sequência de cálculos dos parâmetros através do processo iterativo	41
Tabela 4.7 – Coeficientes de <i>performance</i>	42

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Aspectos Gerais da Refrigeração Termoelétrica	1
1.2	Objetivo Geral.....	2
1.3	Objetivo Específico.....	2
1.4	Justificativa	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Termoeletricidade	3
2.2	Efeitos Termoelétricos	3
2.2.1	Efeito Seebeck	3
2.2.2	Efeito Peltier	5
2.2.3	Efeito Joule	7
2.2.4	Efeito Thomson	8
2.3	Materiais Termoelétricos	8
2.4	Módulos Termoelétricos	9
2.5	Aplicações dos Módulos Termoelétricos.....	17
2.5.1	Módulos Geradores de Energia	17
2.5.2	Módulos Sensores Térmicos.....	19
2.5.3	Módulos Aquecedores e Refrigeradores.....	20
2.6	Refrigeradores Termoelétricos.....	22
2.7	Novos Materiais Termoelétricos.....	24
3.	METODOLOGIA	26
3.1	Seleção de Módulos Termoelétricos.....	26
3.2	Metodologia de Seleção e Análise de Módulos Termoelétricos.....	27
3.2.1	Determinação de T_h , T_c e ΔT	29
3.2.2	Determinação do Número Mínimo de Estágios do Módulo Termoelétrico ...	29
3.2.3	Determinação de $Q_{m\acute{a}x}$	29
3.2.4	Cálculo da Corrente e Tensão Elétricas do Módulo Selecionado	32
3.2.5	Cálculo da Potência e do Calor Dissipado na Fonte Quente	33
3.2.6	Determinação do COP do Módulo Selecionado.....	34
4.	RESULTADOS.....	36
4.1	Seleção de Módulos Termoelétricos.....	36

4.1.1	Determinação de Q_c	36
4.1.2	Determinação da menor temperatura do objeto a ser refrigerado, T_{carga}	36
4.1.3	Determinação da maior temperatura ambiente, T_{amb}	36
4.1.4	Determinação da diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do módulo termoelétrico, ΔT	36
4.1.5	Definição do Número Mínimo de Estágios do Módulo Termoelétrico.....	37
4.1.6	Seleção de Módulo Termoelétrico com $Q_{máx}$ Adequado.....	37
4.1.7	Características Técnicas dos Módulos Termoelétricos.....	39
4.1.8	Determinação de Parâmetros Operacionais.....	39
4.1.9	Atualização do Valor Estimado de T_h	40
4.2	Comparação e Análise de Módulos Termoelétricos.....	42
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	43
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
7.	APÊNDICE.....	47

1. INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais da Refrigeração Termoelétrica

O estabelecimento de um gradiente de temperatura entre as junções de um circuito fechado formado por dois materiais condutores diferentes ao se fazer circular uma corrente elétrica pelo circuito é devido a um efeito termoelétrico e foi observado por Peltier em 1834 (Costa, 1982).

Os módulos termoelétricos são dispositivos constituídos por vários termopares conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo (Gromov, 2011) capazes de converter energia elétrica em gradiente de temperatura e vice-versa. Dentro dos módulos, cada semicondutor é chamado de termoelemento, usualmente telureto de bismuto, e um par de termoelementos é chamado de termopar (Riffat e Ma, 2003).

A refrigeração termoelétrica é obtida quando uma corrente elétrica contínua passa por um ou mais pares de materiais semicondutores “tipo n” e “tipo p”. A absorção de calor do meio ambiente ocorre quando os elétrons da corrente elétrica passam de um baixo nível de energia no material tipo p através da junção entre os dois materiais para um maior nível energético no material tipo n (Riffat e Ma, 2003).

Os módulos termoelétricos têm sido usados em diversas aplicações para refrigeração de aparelhos microeletrônicos. Aplicações típicas incluem a estabilização da temperatura de equipamentos *laser*, refrigeração de detectores de infravermelho e para diminuir ruídos indesejados em circuitos integrados (Min e Rowe, 2006).

O processo de refrigeração termoelétrica possui importantes vantagens em relação aos convencionais processos de refrigeração por compressão de vapor: compacidade, níveis de ruído e vibrações menores e maior controle de temperatura são algumas das vantagens citadas por Vián e Astrain (2008). Além dessas vantagens, os processos de refrigeração termoelétrica não utilizam fluidos nocivos ao meio ambiente.

Contudo, a refrigeração termoelétrica ainda não é amplamente utilizada no mercado de refrigeração doméstica. Custos de manufatura e os custos de operação, determinados principalmente pelo coeficiente de *performance* (COP) do dispositivo termoelétrico, são fatores determinantes de sua aplicação (Min e Rowe, 2006).

Apesar do COP dos módulos termoelétricos ser menor que aqueles dos processos convencionais de compressão de vapor, pesquisadores do mundo inteiro têm feito esforços para desenvolver refrigeradores domésticos, explorando, assim, as vantagens associadas a essa tecnologia de conversão e utilização de energia (Min e Rowe, 2006).

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é a implementação computacional de uma metodologia para auxiliar na seleção e análise de módulos termoelétricos para refrigeradores termoelétricos domésticos.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são a apresentação dos princípios da termoeletricidade e dos fundamentos da refrigeração termoelétrica para identificação e compreensão dos aspectos envolvidos na seleção e análise de módulos termoelétricos.

1.4 Justificativa

O aprimoramento das propriedades dos materiais semicondutores e a evolução dos processos de fabricação dos dispositivos termoelétricos aumentaram a eficiência dos módulos viabilizando maior utilização dessa tecnologia de conversão de energia em diferentes aplicações. A crescente conscientização das questões ambientais globais corrobora para a difusão e aplicação de processos alternativos de refrigeração que agridem menos o meio ambiente abrindo campo para a refrigeração termoelétrica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Termoeletricidade

A termoeletricidade é a correlação de fenômenos térmicos e elétricos. Trata-se da tecnologia e do estudo dos mecanismos de conversão e utilização de energia elétrica em gradiente de temperatura e vice-versa.

2.2 Efeitos Termoelétricos

Segundo Astrain e Vián (2005) os efeitos termoelétricos são: efeito Seebeck, efeito Peltier, efeito Thomson e efeito Joule. Costa (1982) cita ainda a condução de calor como um dos fenômenos observados, além desses quatro efeitos termoelétricos, quando uma corrente elétrica circula através de um semicondutor.

2.2.1 Efeito Seebeck

Em 1821, o físico Thomas Johann Seebeck observou a circulação de corrente elétrica em um circuito fechado constituído por dois metais diferentes quando as duas junções estavam mantidas a temperaturas diferentes (Costa, 1982).

Considere um condutor metálico no qual uma das extremidades é aquecida e a outra resfriada. Segundo Kasap (2001), os elétrons da região aquecida do material têm maior nível de energia que aqueles da região fria. Dessa forma, há uma difusão de elétrons da terminação quente até a terminação fria, resultando numa concentração de íons metálicos na parte aquecida e de elétrons na parte fria do condutor. A difusão de carga se mantém até quando o campo elétrico estabelecido entre os íons positivos e os elétrons impede a difusão de cargas a partir da região quente. Assim, uma diferença de potencial é estabelecida entre as regiões quente e fria.

O surgimento da diferença de potencial entre as duas terminações do condutor devido ao gradiente de temperatura é chamado efeito Seebeck (Kasap, 2001).

De outra forma, havendo um gradiente de temperatura entre as duas terminações de um par de materiais semicondutores, uma tensão elétrica é estabelecida. Essa tensão é chamada de tensão de Seebeck e é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura. A constante de proporcionalidade é referida como o coeficiente de Seebeck (Riffat e Ma, 2003).

A Figura 2.1 ilustra o estabelecimento da força eletromotriz E_0 nas junções de dois materiais quando submetidas ao gradiente de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$.

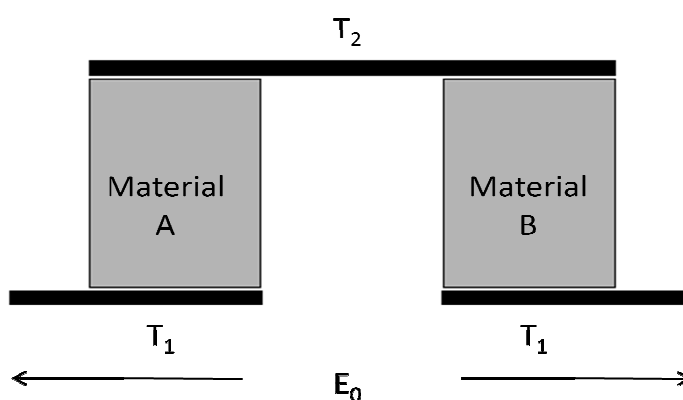


Figura 2.1 – Estabelecimento de força eletromotriz na junção de dois materiais condutores

Conforme Costa (1982), a força eletromotriz E_0 é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as junções de acordo com as expressões a seguir:

$$E_0 = \alpha_{AB} (T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad (2.2)$$

Em que:

E_0 = Tensão, em V;

α_A = Coeficiente de Seebeck do material A, em $V.K^{-1}$

α_B = Coeficiente de Seebeck do material B, em $V.K^{-1}$;

α_{AB} = Coeficiente de Seebeck entre os materiais A e B, em $V.K^{-1}$;

T_2 e T_1 = Temperaturas da junta quente e da junta fria, respectivamente, em K.

O efeito Seebeck é função da diferença de temperatura entre as duas junções dos materiais dissimilares, homogêneos condutores. Considerando que a composição dos materiais que compõem a junção não varia, o efeito Seebeck é independente de outras variáveis, como mudança de seção transversal e distribuição de temperatura (Pollock, 1985).

O coeficiente de Seebeck varia para cada material. A Tabela 2.1 contém valores típicos para alguns metais às temperaturas de 0 °C e 27 °C.

Tabela 2.1 – Coeficiente de Seebeck [$\mu V.K^{-1}$]. Fonte: Kasap (2001)

Temperatura	Paládio <i>Pd</i>	Platina <i>Pt</i>	Alumínio <i>Al</i>	Chumbo <i>Pb</i>
0 °C	-9,00	-4,45	-1,60	-1,15
27 °C	-9,99	-5,28	-1,80	-1,30

Por convenção, o sinal negativo do coeficiente de Seebeck representa o potencial relativo entre as terminações fria e quente. Quando da difusão de elétrons da região quente para a região fria, que se torna negativamente carregada em relação à região quente, o coeficiente é negativo.

De acordo com Costa (1982) o valor médio do coeficiente de Seebeck para os materiais semicondutores é: $\alpha = 0,2 \text{ mV.K}^{-1}$.

2.2.2 Efeito Peltier

No ano de 1834, o francês Jean Charles Athanase Peltier observou o estabelecimento de um gradiente de temperatura entre as junções formadas por dois materiais condutores diferentes quando uma corrente elétrica circula pelas duas junções (Costa, 1982; Reis, 2010). A descoberta mais tarde ficou conhecida como efeito Peltier.

Peltier ainda observou que o aquecimento ou resfriamento de cada uma das junções depende do sentido de circulação da corrente elétrica (Costa, 1982). Segundo Souza (2007), Peltier não teria explicado a razão do fenômeno físico acontecer e também não teria associado esse fenômeno ao efeito Seebeck.

O efeito Peltier depende dos materiais constituintes e da temperatura da junção. Porém, não depende da forma ou das dimensões dos materiais que compõem a junção e não está associado com o potencial de contato gerado entre dois metais distintos, efeito Volta (Menezes, 2007).

O efeito Volta, como ficou conhecido o fenômeno, foi observado pelo italiano Alessandro Volta e se refere ao estabelecimento de uma diferença de potencial quando dois metais diferentes são postos em contato.

A quantidade de energia absorvida ou liberada pela junção, de acordo com William Thomson (1824-1907), pode ser expressa por (Costa, 1982):

$$\dot{Q} = \Pi_{AB} i \quad (2.3)$$

$$\Pi_{AB} = \Pi_A - \Pi_B \quad (2.4)$$

Em que:

\dot{Q} = Energia liberada ou absorvida pela junção, em W;

Π_A = Coeficiente de Peltier do material A, em V;

Π_B = Coeficiente de Peltier do material B, em V;

Π_{AB} = Coeficiente de Peltier entre os materiais A e B, em V;

i = Corrente elétrica no circuito, em A.

Na realidade Thomson verificou que (Costa, 1982):

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (2.5)$$

Dessa forma (Costa, 1982):

$$\dot{Q} = \alpha_{AB} T i \quad (2.6)$$

A Tabela 2.2 a seguir contém valores para o coeficiente de Peltier para o par termoelétrico Cu-Ni para algumas temperaturas.

Tabela 2.2 – Coeficiente de Peltier Cu-Ni. Fonte: Menezes (2007)

Temperatura [°C]	19	55	205	290	340	445
Π [mV]	8,0	9,0	10,3	8,6	8,0	10,0

2.2.3 Efeito Joule

O efeito Joule é a dissipação de calor que ocorre quando uma corrente elétrica passa por um condutor ou semicondutor. O calor gerado é decorrente da transformação da energia cinética dos elétrons da corrente elétrica em energia de vibração dos átomos da rede cristalina do condutor quando das colisões dos elétrons contra a rede cristalina.

A dissipação de calor por efeito Joule pode ser expressa como (Halliday *et al.*):

$$Q = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \quad (2.7)$$

Em que:

Q = Energia dissipada, em J;

R = Resistência elétrica do material, em Ω ;

i = Corrente elétrica, em A;

t = Tempo de circulação da corrente, em s.

2.2.4 Efeito Thomson

Willian Thomson demonstrou em 1854 que calor é liberado ou absorvido por um condutor ao logo do qual existe um gradiente de temperatura quando uma corrente elétrica flui na mesma ou em direção oposta do fluxo de calor (Pollock, 1985).

O efeito Thomson é definido, então, como a mudança na quantidade de calor liberado ou absorvido de um condutor de seção transversal unitária quando uma corrente elétrica unitária flui ao longo do condutor através de um gradiente de temperatura de 1K (Pollock, 1985).

Segundo Menezes (2007), influência do efeito Thomson na operação de módulos termoelétricos reais é muito pequena, sendo normalmente desconsiderado.

2.3 Materiais Termoelétricos

Em 1911, o alemão Edmund Altenkirch demonstrou que um material adequado para utilização termoelétrica deveria possuir elevado coeficiente de Seebeck, alta condutividade elétrica, para minimizar as perdas por efeito Joule, e baixa condutividade térmica, para reduzir a transferência de calor por condução entre as junções (Reis, 2010).

Segundo Stockholm (1997), o modo mais adequado de caracterizar os materiais termoelétricos é através do parâmetro Z , conhecido como figura de mérito, de acordo com a expressão:

$$Z = \frac{\alpha^2}{k \cdot R} \quad (2.8)$$

Em que:

Z = Figura de Mérito, em K^{-1} ;

α = Coeficiente de Seebeck, em $V.K^{-1}$;

k = Condutividade térmica, em $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

R = Resistividade elétrica, em $\Omega.\text{m}$.

O parâmetro Z pode ser expresso de forma adimensional para uma dada temperatura fazendo-se o produto dos valores da figura de mérito e da temperatura em Kelvin de acordo com a expressão a seguir.

$$Z T = \frac{\alpha^2}{k \cdot R} T \quad (2.9)$$

As aplicações do efeito Peltier permaneceram mínimas até o desenvolvimento dos materiais semicondutores, que se deu a partir de 1950. Com o advento dos materiais semicondutores tornou-se possível uma grande variedade de aplicações práticas da refrigeração termoelétrica (Souza, 2007).

2.4 Módulos Termoelétricos

Os módulos termoelétricos são dispositivos constituídos por vários termopares conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo (Gromov, 2011) montados entre placas cerâmicas que configuram os lados quente e frio do módulo termoelétrico (Menezes *et al.*, 2010). Os termopares, por sua vez, são pares de materiais semicondutores chamados de termoelementos (Riffat e Ma, 2003).

Os dois substratos cerâmicos que compõem os dispositivos termoelétricos servem como isolamento elétrico e elementos estruturais para os termoelementos (Riffat e Ma, 2003). Os compostos cerâmicos mais comumente usados são o óxido de alumínio, nitrito de alumínio e óxido de berílio. Apesar dos dois últimos serem melhores condutores térmicos, o óxido de alumínio é mais utilizado devido à relação custo e benefício e a técnica de fabricação desenvolvida (Souza, 2007).

Tan e Fok (2008) relatam que está disponível no mercado uma grande variedade de dispositivos termoelétricos de vários fabricantes, desde produtos com custos mais baixos até dispositivos com alto desempenho. Na Tabela 2.3 a seguir encontra-se uma lista de fabricantes e fornecedores mundiais de dispositivos termoelétricos.

Tabela 2.3 – Fabricantes e fornecedores de módulos termoelétricos

Fabricante / Fornecedor	Origem	Web site
<i>Fandis</i>	Itália	http://www.fandis-tm.com
<i>Ferrotec America</i>	Estados Unidos	http://www.ferrotec-america.com
<i>HiTech Technologies US</i>	Estados Unidos	http://www.hitechtec.com
<i>Huayu</i>	China	http://www.huayutec.com
<i>Hui Mao Cooling Equipment</i>	China	http://www.huimao.com
<i>Kryotherm</i>	Rússia	http://www.kryotherm.spb.ru
<i>Ostern</i>	Rússia	http://www.zts.com/ostern
<i>Qinhuangdao Fulianjing Electronic</i>	China	http://www.fulianjing.com
<i>RMT Ltd</i>	Rússia	http://www.rmtltd.ru
<i>SCTB NORD</i>	Rússia	http://www.sctbnord.com
<i>SIREC srl</i>	Itália	http://www.sirec-it.com
<i>Supercool AB</i>	Suécia	http://www.supercool.se
<i>Thermion</i>	Ucrânia	http://www.zts.com/thermion
<i>Marlow Industries</i>	Estados Unidos	http://www.marlow.com
<i>Melcor</i>	Estados Unidos	http://www.melcor.com
<i>Danvic</i>	Brasil	http://www.peltier.com.br/
<i>TE Technology</i>	Estados Unidos	http://www.tetech.com
<i>Tellurex</i>	Estados Unidos	http://www.tellurex.com
<i>ThermoElectric Cooling America</i>	Estados Unidos	http://www.thermoelectric.com
<i>ThermoLyte</i>	Estados Unidos	http://shore.net/~temodule/tlyte.htm

Segundo Riffat e Ma (2003), a refrigeração termoelétrica é obtida através da passagem de corrente elétrica através de um ou mais pares de semicondutores “tipo n” e “tipo p”. Materiais semicondutores tipo n e tipo p são materiais semicondutores aos quais foram adicionados elementos químicos com o objetivo de melhorar a condutividade elétrica.

Por exemplo, a adição do elemento químico arsênio (As) com número de valência 5 a uma matriz formada por silício (Si), de valência 4, aumenta a condutividade elétrica do material

devido ao aumento do número de elétrons livres. Dessa forma, o material é tido como “negativamente dopado”, referido como do *tipo n*.

Por outro lado, a adição do elemento índio (In) com número de valência 3 a uma matriz formada por silício aumenta a condutividade elétrica devido ao maior número de lacunas. O material é referido como do *tipo p*, “positivamente dopado” (Romani, 2007). A Figura 2.2 a seguir mostra o esquema básico de um módulo termoelétrico formado por um par de materiais semicondutores tipo n e tipo p.

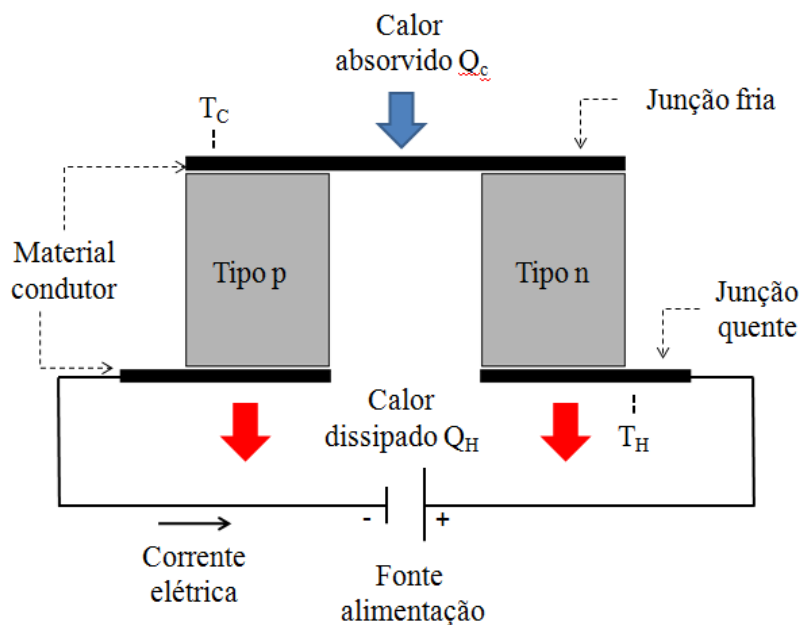


Figura 2.2 – Esquema básico de um módulo termoelétrico

No modo de resfriamento, corrente contínua passa do material semicondutor tipo n para o material semicondutor tipo p. Assim, a temperatura T_C do contato condutor diminui e calor é absorvido do ambiente.

A absorção de calor do ambiente ocorre quando elétrons passam de um nível mais baixo de energia no material semicondutor tipo p através dos contatos condutores para um nível mais alto de energia no material semicondutor tipo n. O calor absorvido é transferido através do material semicondutor por transporte de elétrons até a junção à temperatura T_H e

liberado quando os elétrons retornam ao baixo nível de energia no semicondutor tipo p (Riffat e Ma, 2003).

As propriedades dos materiais semicondutores variam em função da temperatura, por consequência, a figura de mérito de cada material também. Dessa forma, a capacidade de refrigeração de um material semicondutor é dependente de um efeito combinado da tensão de Seebeck do material, da resistividade elétrica e da condutividade térmica na faixa de temperatura das terminações quente e fria (Riffat e Ma, 2003).

A figura de mérito do material semicondutor limita a diferença de temperatura alcançada entre as terminações quente e fria enquanto a razão comprimento pela área de cada material semicondutor define a capacidade de remoção de calor.

O material termoelétrico mais utilizado em refrigeração na faixa de temperatura de -120°C a 230°C é o telureto de bismuto $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$, (Riffat e Ma, 2003). Tabela 2.4 a seguir contém algumas propriedades do telureto de bismuto a temperatura ambiente.

Tabela 2.4 – Propriedades do telureto de bismuto. Fonte: Stockholm (1997)

Coefficiente de Seebeck [$\mu\text{V.K}^{-1}$]	Condutividade térmica k [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	Resistividade elétrica R [$\mu\Omega.\text{m}$]	Figura de Mérito Z [K^{-1}]
200,0	1,5	10,0	$2,67.10^{-3}$

A configuração típica de um módulo termoelétrico pode ser vista na Figura 2.3 a seguir.

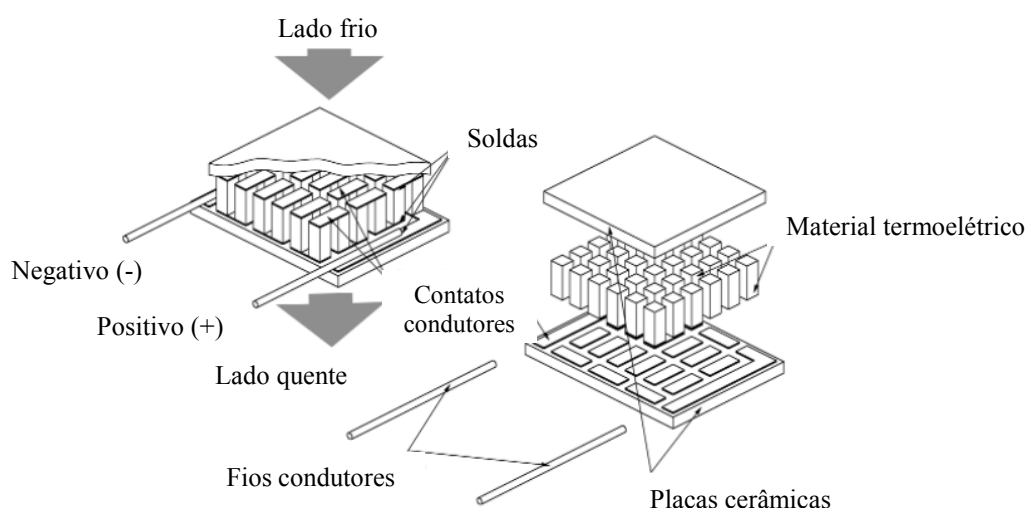


Figura 2.3 – Configuração típica de um módulo termoelétrico (adaptado de Gromov, 2011)

Idealmente, a quantidade de calor absorvida na junção fria e o calor dissipado na junção quente são dependentes do produto entre o coeficiente de Peltier e a corrente elétrica que flue através do material do semicondutor. Porém, a quantidade líquida de calor absorvida na terminação fria devido ao efeito Peltier é reduzida de duas formas: pelo calor conduzido e pelo efeito Joule (Riffat e Ma, 2003).

Devido à diferença de temperatura entre as junções quente e fria, calor será conduzido através do material semicondutor da terminação quente à terminação fria. Conforme a corrente elétrica é aumentada, a diferença de temperatura, e assim o calor conduzido, aumenta porque o efeito Peltier de refrigeração aumenta. Por outro lado, a dissipação devido ao efeito Joule é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente. Para qualquer intensidade de corrente, o equilíbrio térmico é estabelecido na junção fria quando o efeito Peltier nessa terminação for igual à soma da quantidade de calor conduzido mais a metade da quantidade de calor gerado por efeito Joule. Considera-se que a outra metade da quantidade de calor se dirige à terminação quente (Riffat e Ma, 2003).

Com o aumento da intensidade da corrente elétrica o aquecimento por efeito Joule se transforma no fator dominante. A partir desse ponto, qualquer acréscimo na intensidade da corrente resultará efeito de refrigeração líquido menor. A corrente máxima em que nenhum efeito de refrigeração adicional é alcançado é a corrente máxima, $I_{m\acute{a}x}$. Tensão máxima,

$V_{\text{máx}}$, e máxima diferença de temperatura, $\Delta T_{\text{máx}}$, ocorrerão para qualquer carga térmica dada para a corrente máxima (Riffat e Ma, 2003).

A Figura 2.4 a seguir mostra como a temperatura varia do lado frio da placa do módulo termoeletrico até o meio que recebe o calor transferido.

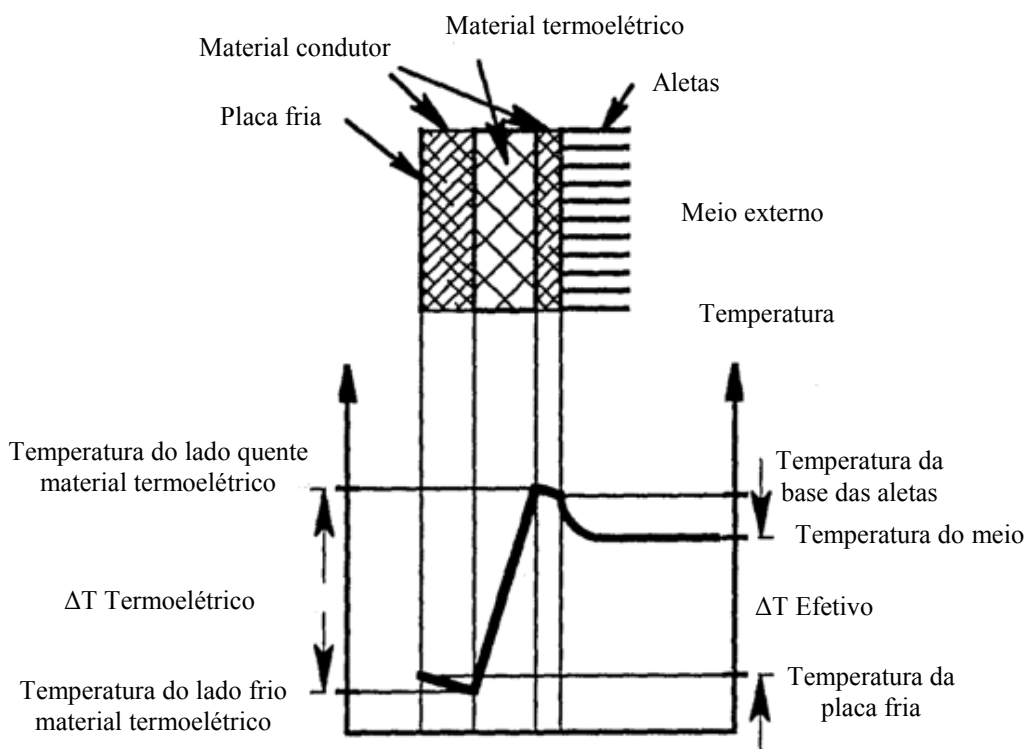


Figura 2.4 – Perfil de temperatura através do módulo termoeletrico
(adaptado de Stockholm, 1993)

Os dispositivos termoeletricos convencionais têm dimensões variando entre 3mm de lado por 4mm de espessura e 60mm de lado por 5mm de espessura, são formados por 3 a 127 termopares e têm taxa de retirada de calor variando de 1 a 125W (Riffat e Ma, 2003). A Figura 2.5 a seguir ilustra as dimensões de módulos termoeletricos em miniatura do fabricante Micropelt.

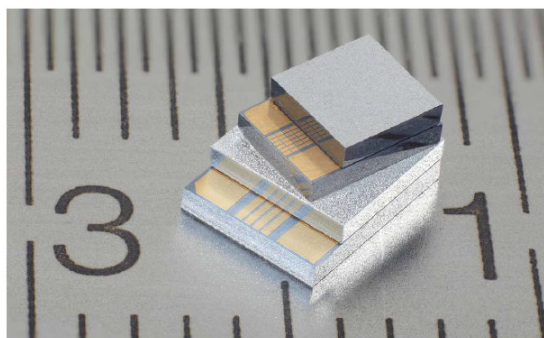


Figura 2.5 – Módulo termoelétrico miniatura (www.micropelt.com, 03/04/2011)

Pode-se mostrar que a máxima diferença de temperatura que pode ser alcançada por um par de material semicondutor tipo p e tipo n é diretamente proporcional a média da figura de mérito de cada semicondutor em uma faixa de temperatura. Dessa forma, maximizar a figura de mérito é o maior objetivo na seleção e otimização de materiais termoelétricos (Riffat e Ma, 2003).

A máxima diferença de temperatura entre os lados quente e frio alcançada com dispositivos termoelétricos convencionais é de 70°C aproximadamente. Segundo Riffat e Ma (2003), na prática, as mais baixas temperaturas alcançadas são de aproximadamente -100°C. Contudo, módulos termoelétricos multiestágio, ou módulos em cascata, podem alcançar diferenças de temperatura entre os lados quente e frio de até 130°C. A Figura 2.6 a seguir mostra módulos termoelétricos multiestágios do fabricante Kryotherm.

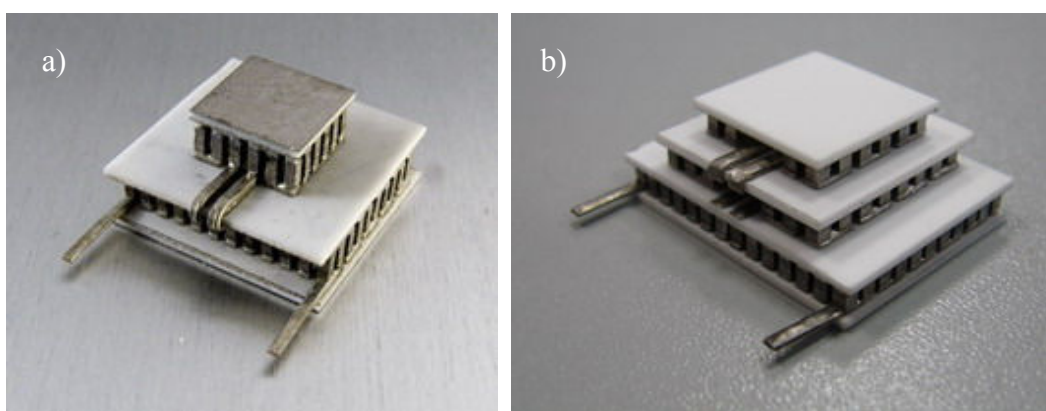


Figura 2.6 – Módulos termoelétricos de dois (a) e três (b) estágios
www.kryotherm.ru/index.phtml?tid=76, 21/04/2011)

As vantagens dos módulos termoeletrônicos são: conversão de energia de alta qualidade; a ausência de ruído e vibrações, por não haver partes móveis; pesos e dimensões reduzidos e controle preciso de temperatura, variações de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ podem ser alcançadas (Riffat e Ma, 2003). Dentre as vantagens, Gromov (2011) ainda reporta que os módulos termoeletrônicos comerciais têm longa vida útil, faixas de 100.000 a 200.000 horas de operação são registradas.

Mendonça *et al.* (2011) destacam algumas desvantagens dos módulos termoeletrônicos: alto custo, baixo rendimento e a utilização de fonte de corrente contínua de baixa tensão e alta corrente, o que implicam elevados custos de instalação desses dispositivos.

Tan e Fok (2008) reportam que, apesar da função a que se destinam ser a mesma, módulos termoeletrônicos refrigeradores similares de diferentes fabricantes têm características diferentes entre si. Geometria, especificações e outras características podem não ser equivalentes devido às especificidades de projeto e manufatura. Algumas características técnicas de módulos termoeletrônicos selecionados podem ser vistas na Tabela 2.5 a seguir.

Tabela 2.5 – Características operacionais. Fonte: Catálogos dos fabricantes.

Fabricante	Módulo	$V_{\text{máx}}$ [V]	$I_{\text{máx}}$ [A]	$\Delta T_{\text{máx}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$Q_{\text{máx}}$ [W]	$T_{\text{h módulo}}$ [K]
Tetech	TE-127-1.0-0.8	15,7	5,8	69,0	56,0	300,0
Danvic	DV-40-06	15,4	6,0	68,0	53,1	300,0
SCTB Nord	TM-241-1.0-3.0	27,0	3,3	71,0	56,5	298,0
	TM-127-1.4-6.0	14,7	6,4	71,0	56,0	298,0
Kryotherm	TB-127-1.0-0.8	15,7	5,8	69,0	56,0	300,0
	TB-99-1.4-1.5	12,4	6,1	70,0	46,0	300,0

Da Tabela 2.5 destaca-se a quantidade máxima de calor ($Q_{\text{máx}}$) que os módulos termoeletrônicos são capazes de bombear em uma determinada temperatura $T_{\text{h módulo}}$ quando $\Delta T = 0$, ou seja, $T_{\text{h}} = T_{\text{c}}$. Essa informação é particularmente considerada quando da seleção de um módulo termoeletrônico para uma dada aplicação.

Tan e Fok (2008) informam que o processo de seleção do módulo termoelétrico mais adequado envolve aspectos construtivos e dimensionais inerentes a cada aplicação, as especificidades de cada modelo de dispositivo termoelétrico e restrições técnicas como corrente e tensão elétricas operacionais. Dessa forma, além das informações apresentadas pelos fabricantes nos catálogos de seus produtos, como as listadas na Tabela 2.5, é útil estimar o desempenho dos módulos termoelétricos com fins de se obter uma base de dados para comparação dentre as muitas possibilidades de dispositivos ofertados.

2.5 Aplicações dos Módulos Termoelétricos

Apesar do efeito termoelétrico ter sido descoberto há mais de um século e meio, os módulos termoelétricos têm sido aplicados comercialmente apenas nas últimas décadas (Gromov, 2011).

Devido às suas vantagens, ausência de ruído e vibrações, peso e dimensões reduzidos, dentre outras, os módulos termoelétricos são aplicados em diversas áreas inclusive militar e aeroespacial (Mendonça *et al.*, 2011).

De acordo com Riffat e Ma (2003) os módulos termoelétricos podem ser classificados em três categorias considerando a utilização: refrigeradores ou aquecedores, geradores de potência ou sensores de energia térmica.

2.5.1 Módulos Geradores de Energia

A geração de energia a partir da termoeletricidade é restrita a aplicações específicas devido a eficiência relativamente baixa, em torno de 5%, nas quais o custo não é a principal consideração, como, por exemplo, aplicações militares. Entretanto, nos últimos anos, devido a maior conscientização da sociedade das questões ambientais globais, a geração de energia pela termoeletricidade tem surgido como opção a ser considerada (Riffat e Ma, 2003).

A configuração básica de um dispositivo termoelétrico gerador de energia pode ser vista na Figura 2.7 a seguir.

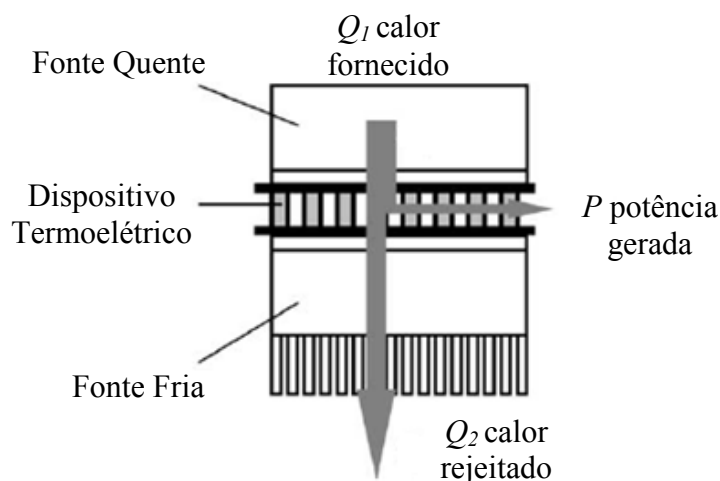


Figura 2.7 – Arranjo típico de módulo termoeletrico para geracao de energia
(adaptado de Riffat e Ma, 2003)

Calor Q_1 proveniente da fonte quente flui através do módulo termoeletrico e é rejeitado na fonte fria, calor Q_2 . Mantida a diferenca de temperatura entre as fontes quente e fria através do módulo termoeletrico, potencia elétrica P será gerada.

Uma aplicacao bastante útil de módulos termoeletricos para geracao de energia é através da utilizacao de calor rejeitado. Comumente, diversos sistemas e processos industriais rejeitam calor diretamente para o meio ambiente e essa energia desperdicada pode ter aplicacao viável em muitos casos para a geracao de potencia elétrica.

De modo geral, os custos de producao de energia a partir da termoeletricidade consistem basicamente dos custos de operacao e do custo dos dispositivos termoeletricos. Os custos operacionais são determinados pela eficiencia de conversao da energia enquanto os custos do dispositivo estão relacionados aos custos de manufatura.

Quando utilizados em processos para reaproveitamento de calor, mesmo com baixa eficiencia de conversao, os custos operacionais dos dispositivos termoeletricos podem ser negligenciados quando comparados aos custos do dispositivo, uma vez que a energia proveniente do calor rejeitado tem custo baixo ou mesmo nulo (Riffat e Ma, 2003).

Riffat e Ma (2003) reportam que o custo por watt gerado pode ser reduzido pela otimização da geometria do dispositivo termoeétrico, melhoria da qualidade do processo de manufatura ou simplesmente pelo aumento da diferença de temperatura em que o módulo opera. Por outro lado, a potência gerada por área pode ser melhorada pela redução do espaço entre os termoelementos.

A redução do espaço entre os termoelementos aumenta significativamente a relação potência-área do módulo que opera como gerador de energia, embora o espaçamento entre os termoelementos pode não afetar a maioria das aplicações em refrigeração (Riffat e Ma, 2003). A Figura 2.8 a seguir ilustra o espaçamento entre os termoelementos do módulo termoeétrico.

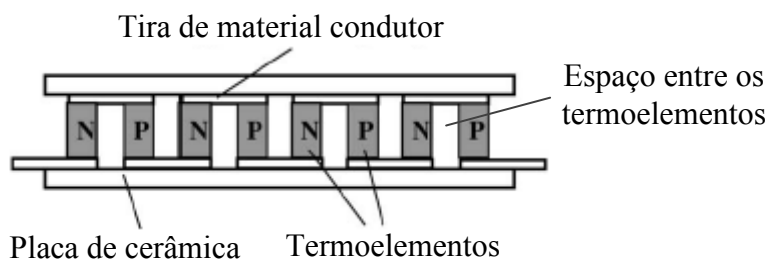


Figura 2.8 – Espaço entre os termoelementos do módulo termoeétrico
(adaptado de Riffat e Ma, 2003)

2.5.2 Módulos Sensores Térmicos

Haruyama (2001) testou módulos termoeétricos comercialmente disponíveis em temperaturas entre 200K e 60K para possível medição *in situ* de fluxo de calor radiante. Dispositivos com 127 termopares tipo p e tipo n e com superfície de 30 por 30mm mostraram sensibilidade de $27\mu\text{V} \cdot (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ a 80K, sensibilidade 10 vezes maior, aproximadamente, que a de um sensor de fluxo de calor convencional. A sensibilidade a 60K é ainda elevada, $17\mu\text{V} \cdot (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$, demonstrando promissor uso prático dos dispositivos termoeétricos em criogenia.

2.5.3 Módulos Aquecedores e Refrigeradores

Bicalho *et al.* (2010) fizeram um estudo de viabilidade técnica e econômica de bomba de calor termoelétrica para aquecimento de água residencial. Para o estudo, um protótipo de pequeno porte de bomba de calor termoelétrica com capacidade para aquecer 3 litros de água de 25°C a 40°C através de um módulo termoelétrico com 41W de potência foi construído e testado. Os resultados encontrados foram comparados aos obtidos no aquecimento do mesmo volume de água através de uma resistência elétrica com mesma potência do módulo e submersa na mesma quantidade de água. O estudo apontou que ainda não há viabilidade econômica para a utilização desse tipo de equipamento para aquecimento residencial de água apesar da viabilidade técnica.

Usualmente, refrigeradores termoelétricos são usados em situações nas quais os critérios de projeto do sistema de refrigeração incluem alta confiabilidade, dimensões e pesos reduzidos e controle preciso de temperatura. Riffat e Ma (2003), entretanto, relatam que refrigeradores termoelétricos são mais apropriados em aplicações abaixo de 25W nas quais o baixo COP não seja um inconveniente.

Carvalho (2011) estudou dissipadores de calor para remoção de calor da superfície quente de um módulo termoelétrico utilizado no resfriamento de bolsa térmica usada em procedimentos médicos. Dos três tipos de trocadores de calor estudados, trocador de calor de base aletada, trocador de calor de microcanais retos e trocador de calor de tubo em espiral, foi observado que o trocador de calor de tubo em espiral mostrou-se mais interessante para essa aplicação específica. Isso devido à capacidade do dispositivo de manter a temperatura da superfície quente do módulo termoelétrico a 27°C que, por sua vez, possibilita menores temperaturas no lado frio, tornando, assim, viável estender sua aplicação para outros procedimentos terapêuticos.

O sistema de refrigeração termoelétrico é composto por um circuito elétrico, uma fonte de alimentação que fornece corrente contínua, pelo dispositivo termoelétrico, por pelo menos um dissipador de calor, uma fonte de calor capaz de ser resfriada a uma faixa de temperatura predeterminada e um sistema de controle (Riffat e Ma, 2003). A utilização de

dispositivos termoelétricos em sistemas de refrigeração segue a configuração básica mostrada na Figura 2.9 a seguir.

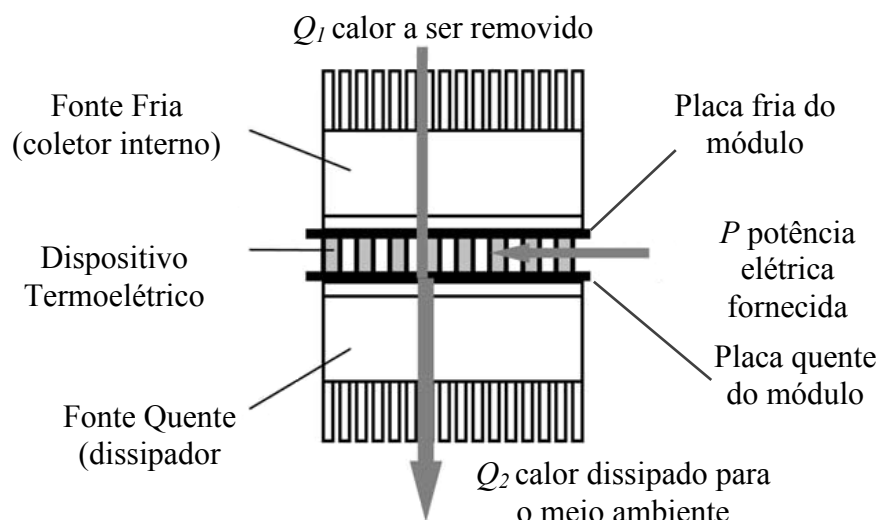


Figura 2.9 – Montagem convencional de um módulo termoelétrico para refrigeração (adaptado de Riffat e Ma, 2003)

Romani (2007) destaca a necessidade de utilização de dissipadores para dissipar calor para o meio ambiente para evitar o superaquecimento do dispositivo termoelétrico. O superaquecimento do módulo conduziria a falhas caso as temperaturas alcançassem temperaturas próximas a temperatura de fusão das soldas dos elementos termoelétricos.

De fato, Astrain e Vián (2005) relatam que um dos aspectos mais importantes dos refrigeradores termoelétricos é a necessidade considerável de dissipação de calor no lado quente do módulo termoelétrico onde o fluxo de calor é da ordem de 40 kW/m^2 .

Tan e Fok (2008) reportam gradientes de temperatura típicos de 10 a 15°C no lado quente do módulo termoelétrico quando se utilizam trocadores de calor com superfície aletada e convecção forçada. Gradientes de temperatura da ordem de 50% daqueles encontrados no lado quente podem ser considerados no lado frio do módulo assumindo-se trocadores de calor similares.

2.6 Refrigeradores Termoelétricos

O refrigerador termoelétrico consiste da câmara de refrigeração, do módulo termoelétrico montado entre os dois trocadores de calor, de uma fonte de alimentação e de um controlador de temperatura. A configuração básica de um refrigerador termoelétrico pode ser vista no esquema da Figura 2.10 a seguir.

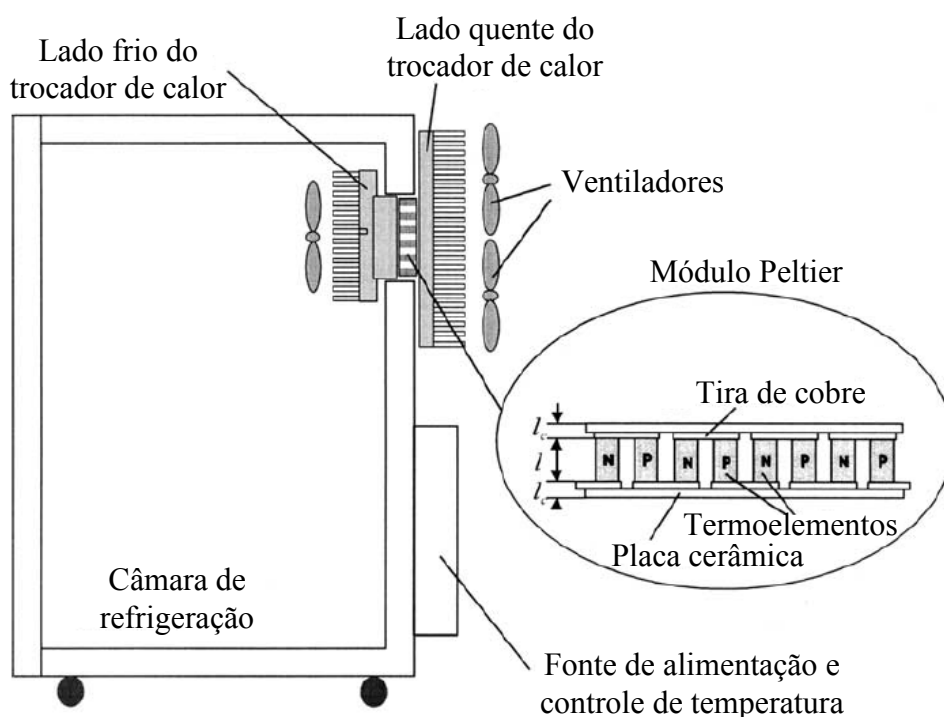


Figura 2.10 – Esquema básico de um refrigerador termoelétrico
(adaptado de Min e Rowe, 2006)

A eficiência energética de um refrigerador termoelétrico é principalmente determinada pelo coeficiente de *performance* (COP) do módulo termoelétrico, pela capacidade de remoção de calor e pelo tempo de “resfriamento”.

O COP pode ser definido como a razão entre a taxa de calor \dot{Q}_c e a potência elétrica aplicada P_{in} , conforme expressão a seguir (Riffat *et al.* 2006).

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{P_{in}} \quad (2.10)$$

Em que:

COP = Coeficiente de *performance*;

\dot{Q}_c = Taxa de calor líquido absorvido na junção fria, em W;

P_{in} = Potência elétrica aplicada, em W.

O tempo de resfriamento pode ser entendido como o tempo necessário para que a temperatura decresça da temperatura ambiente até uma temperatura que é 20% maior que a temperatura preestabelecida (Min e Rowe, 2006).

Vián e Astrain (2008) registram que o coeficiente de *performance* de refrigeradores termoelétricos são consideravelmente menores que o COP encontrados nos sistemas de compressão de vapor.

Min e Rowe (2006) reportam coeficientes de *performance* de refrigeradores termoelétricos entre 0,3 e 0,5 para temperaturas de operação típicas de 5°C e temperatura ambiente de 25°C. Os pesquisadores ainda reportam que o COP desses equipamentos pode ser aumentado através da redução das resistências de contato do módulo e maior eficiência dos trocadores de calor. Apesar dos baixos valores de COP, Riffat e Ma (2003) reportam que o interesse no uso de dispositivos termoelétricos em refrigeradores domésticos tem aumentado recentemente.

Menezes *et al.* (2010), projetaram, construíram e testaram um protótipo de refrigerador de pequeno porte para uso doméstico com volume de 6.460 cm³ e capacidade para resfriar 4 latas de 350 mililitros de refrigerante de 25°C a 5°C em 140 minutos. Na montagem do protótipo foi utilizado um módulo termoelétrico com 72W de potência montado entre dois dissipadores térmicos aletados com resistência térmica de 0,163 K.W⁻¹. Os resultados dos testes apontaram viabilidade técnica do refrigerador termoelétrico, pois o protótipo foi capaz de refrigerar uma lata com 350 mililitros de água a uma temperatura e tempo

menores que os obtidos com uma geladeira doméstica convencional. O protótipo de minirrefrigerador termoelétrico para uso doméstico testado e que foi construído por Menezes (2007) pode ser visto na Figura 2.11 a seguir.

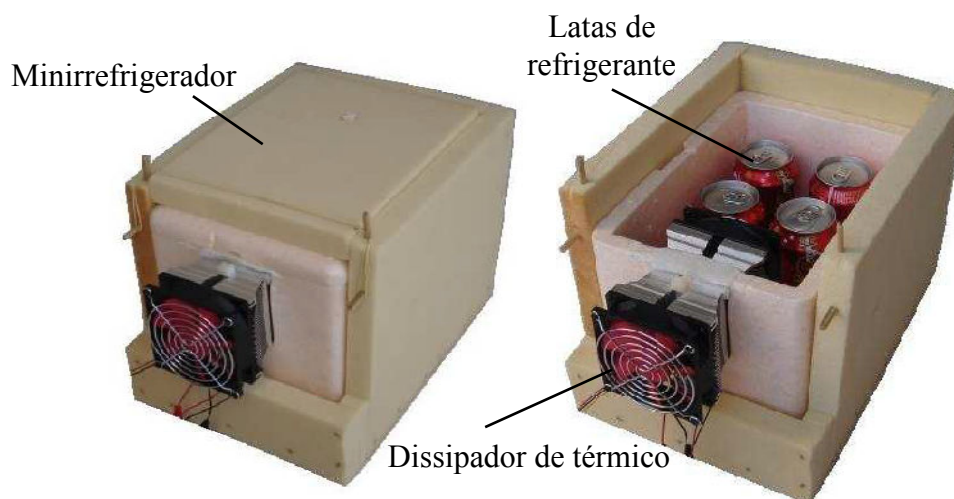


Figura 2.11 – Protótipo de minirrefrigerador (adaptado de Menezes, 2007)

Mendonça *et al.* (2011), baseados em trabalhos anteriores do Grupo de Refrigeração da UFMG, projetaram, construíram e testaram um protótipo de geladeira termoelétrica de pequeno porte com controle eletrônico de temperatura ideal. Visando ao aumento real de eficiência energética do refrigerador termoelétrico, os pesquisadores propuseram algumas modificações em relação aos protótipos construídos nos trabalhos anteriores como: adoção de trocadores de calor com base na mudança de fase, tipo “*heat pipe*”, otimização do isolamento térmico e o uso de um sistema de controle adaptativo PID da temperatura. Nos testes realizados, o protótipo alcançou temperaturas de aproximadamente 2°C e a utilização do sistema de controle de temperatura mostrou-se ser uma opção interessante a ser adotada.

2.7 Novos Materiais Termoelétricos

São reportadas diversas pesquisas na área da refrigeração termoelétrica com o objetivo de melhorar as propriedades dos materiais utilizados, de modo especial, a figura de mérito

(Z). As mais recentes pesquisas concentram-se em materiais nanoestruturados e na busca de novos materiais com propriedades termoelétricas.

Pesquisas com materiais nanoestruturados baseados em PbTe têm alcançado resultados satisfatórios, conduzindo a figuras de mérito elevadas tanto para composições de materiais semicondutores do tipo n quanto para composições do tipo p. Valores de ZT próximos a 1,7 foram obtidos a 700K (Marlow, 2011).

Foi demonstrado que a figura de mérito de ligas de telureto de bismuto pode ser melhorada a temperatura ambiente fabricando-se o material com tamanho de grão da ordem de 20nm (Marlow, 2011).

Souza (2007) reporta que ZT de 2,4 foi encontrado com películas finas de materiais semicondutores do tipo p, Bi_2Te_3 e Sb_2Te_3 . Os altos valores de ZT observados estariam relacionados à incomum estrutura oriunda da supercompactação de camadas alternadas dos materiais semicondutores.

A refrigeração termoelétrica, apesar de apresentar baixos coeficientes de *performance*, apresenta características interessantes, dessa forma, é utilizada em diversas áreas, desde a refrigeração doméstica até aplicações altamente específicas em dispositivos eletrônicos de ponta e também aplicação na área médica.

3. METODOLOGIA

O processo de seleção do módulo termoeétrico mais adequado para determinada aplicação pode ser agilizado se um esquema ou método de seleção estiver disponível. O método facilita a comparação entre os diferentes modelos de dispositivos termoeétricos considerando que está disponível no mercado uma grande variedade de módulos de vários fabricantes, desde produtos com custos mais baixos até dispositivos com alto desempenho.

Esse trabalho propõe uma metodologia que pode auxiliar na seleção de módulos termoeétricos (TEC) para aplicação em refrigeração termoeétrica doméstica. A metodologia proposta a seguir foi baseada no trabalho desenvolvido por Tan e Fok (2008) e em metodologias de seleção contidas em catálogos e manuais técnicos dos fabricantes de módulos termoeétricos.

3.1 Seleção de Módulos Termoeétricos

Todo projeto de aplicação da refrigeração termoeétrica é caracterizado por um conjunto de parâmetros e restrições operacionais que ditam a seleção do módulo termoeétrico otimizado dentre várias opções de dispositivos de simples e múltiplos estágios existentes. Devido ao comportamento não linear dos dispositivos termoeétricos refrigeradores e do número de variáveis envolvidas nas suas análises, os procedimentos propostos a seguir são aplicáveis principalmente a seleção de módulos de simples e duplo estágio. Para dispositivos com mais de dois estágios a precisão dos resultados pode ser afetada.

A seguir são apresentados os parâmetros envolvidos na seleção dos módulos termoeétricos.

ΔT = diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do módulo, em K;

Q_c = quantidade de calor a ser absorvida pela superfície fria do módulo, em W;

Q_h = quantidade de calor dissipada no lado quente do módulo, em W;

$Q_{máx}$ = quantidade máxima de calor absorvida no lado frio do módulo, em W;

i = corrente elétrica, em A;

R = resistência elétrica do módulo termoeétrico, em Ω ;

$\Delta T_{m\acute{a}x}$ = maxima diferenca de temperatura através do módulo, em K;

T_c = temperatura do lado frio do módulo, em K;

T_h = temperatura do lado quente do módulo, em K;

T_{carga} = temperatura do objeto a ser refrigerado, em K;

T_{amb} = temperatura ambiente, em K;

T_{HS} = temperatura da fonte quente, em K;

Θ_{HS} = resistência térmica da fonte quente, em $K.W^{-1}$;

Θ_{TEC} = resistência térmica do módulo, em $K.W^{-1}$;

α = coeficiente de Seebeck do módulo, em $V.K^{-1}$;

V = tensão aplicada, em V.

Os parâmetros mínimos para especificao do módulo termoeétrico apropriado são:

Q_c = quantidade de calor a ser absorvida pela superfície fria do módulo;

ΔT = diferenca de temperatura entre o lado quente (T_h) e o lado frio (T_c) do módulo;

i = corrente elétrica circulante;

V = tensão elétrica requerida.

Com base nos parâmetros mínimos e em aspectos construtivos, dimensionais e em restrioes operacionais inerentes a cada aplicao propõe-se a metodologia de seleo e análise descrita a seguir.

3.2 Metodologia de Seleo e Análise de Módulos Termoeétricos

Os procedimentos para seleo e análise de módulos termoeétricos para refrigerao podem ser resumidos e listados conforme a seguir.

a) determinao de Q_c ;

b) determinao da menor temperatura do objeto a ser refrigerado, T_{carga} ;

c) determinao da maior temperatura ambiente, T_{amb} ;

d) determinao da diferenca de temperatura entre os lados quente e frio do TEC, ΔT ;

e) definio no número mínimo de estágios do módulo termoeétrico a ser usado;

- f) seleção do módulo termoeétrico apropriado;
- g) cálculo da corrente e tensão operacionais do módulo selecionado;
- g) cálculo da potência e do calor dissipado na fonte quente do módulo selecionado;
- h) determinação do COP do módulo selecionado.

Os procedimentos listados anteriormente podem ser dispostos em um fluxograma como o mostrado na Figura 3.1 a seguir.

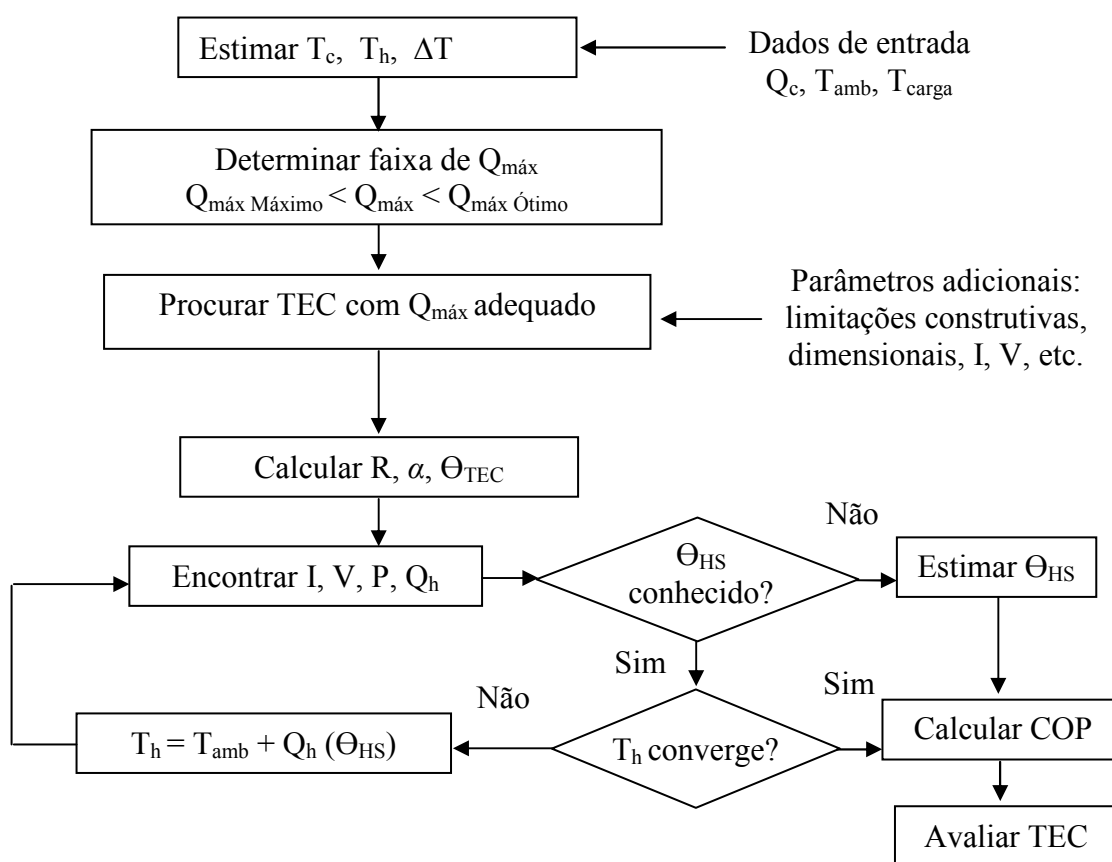


Figura 3.1 – Fluxograma para seleção e análise de módulo termoeétrico para refrigeração (adaptado de Tan e Fok, 2008)

Considerando que Q_c , T_{carga} e T_{amb} são parâmetros preestabelecidos no projeto de refrigeração na etapa de seleção do módulo termoeétrico, serão feitas considerações sobre

a estimativa dos demais parâmetros envolvidos na seleção, a saber: T_h , T_c , ΔT , $\Delta T_{\text{máx}}$ e $Q_{\text{máx}}$.

3.2.1 Determinação de T_h , T_c e ΔT

O processo de seleção do módulo termoelétrico mais adequado é um processo iterativo uma vez que parte-se da estimativa da temperatura da superfície quente e da temperatura da superfície fria do módulo, T_h e T_c , respectivamente.

T_h e T_c podem ser estimadas como:

$$T_h = T_{\text{amb}} + \text{queda de temperatura devido a resistência térmica da fonte quente}$$

$$T_c = T_{\text{carga}} - \text{queda de temperatura devido a resistência térmica da fonte fria}$$

Assim, $\Delta T = T_h - T_c$.

3.2.2 Determinação do Número Mínimo de Estágios do Módulo Termoelétrico

O número de estágios do módulo está ligado à máxima diferença de temperatura através do dispositivo termoelétrico ($\Delta T_{\text{máx}}$). Essa, por sua vez, está intimamente ligada ao ΔT estimado de forma que $\Delta T_{\text{máx}}$ seja maior que ΔT requerido.

Considera-se $\Delta T_{\text{máx}}$ de 65°C para módulos de simples estágio e $\Delta T_{\text{máx}}$ de 90°C e 110°C para módulos de dois e três estágios, respectivamente.

3.2.3 Determinação de $Q_{\text{máx}}$

A determinação da quantidade máxima de calor absorvido no lado frio do módulo termoelétrico, $Q_{\text{máx}}$, pode ser feita através das curvas de desempenho normalizadas apresentadas na Figura 3.2 a seguir.

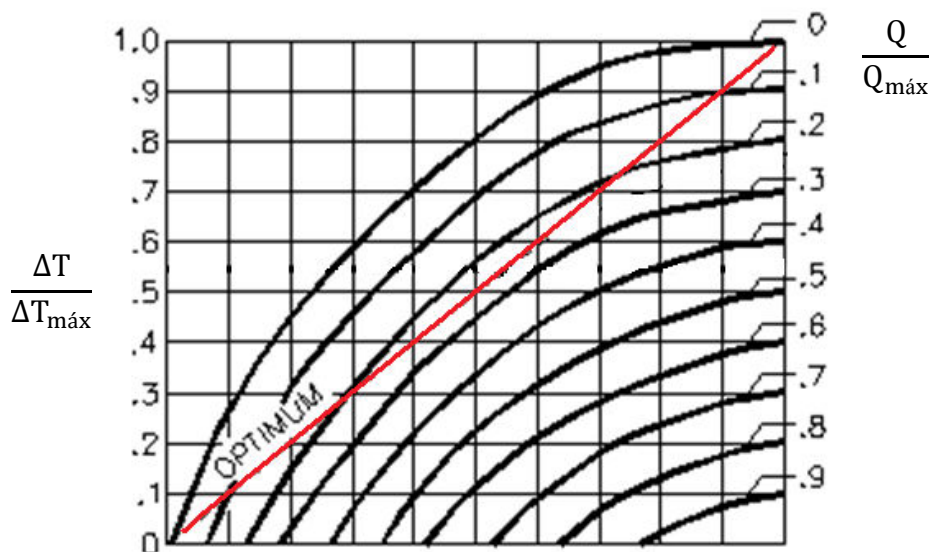


Figura 3.2 – Curva de desempenho normalizada (adaptado de Tan e Fok, 2008)

Para utilizar as curvas mostradas na Figura 3.2, é preciso obter o quociente entre o ΔT calculado no subitem 3.2.1 e $\Delta T_{\text{máx}}$, conforme segue.

$$\text{Quociente}_1 = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\text{máx}}} \quad (3.1)$$

A determinação de $\Delta T_{\text{máx}}$ pode ser feita de acordo com informações dos próprios fabricantes de módulos termoeétricos, conforme o número de estágios dos dispositivos, ou baseando-se em trabalhos científicos disponíveis na literatura especializada.

O quociente obtido com a Eq. 3.1 é utilizado como entrada nas curvas de desempenho mostradas na Figura 3.2 para obtenção de outros dois quocientes:

$$\text{Quociente}_2 = \frac{Q}{Q_{\text{máx}}} \text{ ótimo} \quad (3.2)$$

$$\text{Quociente}_3 = \frac{Q}{Q_{\text{máx}}} \text{ máximo} \quad (3.3)$$

Os quocientes expressos pelas Eq. 3.2 e Eq. 3.3 são obtidos a partir da leitura do ponto onde a linha horizontal representada pelo valor do Quociente₁ no eixo vertical à esquerda da Figura 3.2 encontra a linha “*optimum*” e o eixo vertical à direita na Figura 3.2, respectivamente.

A quantidade máxima de calor absorvido no lado frio do módulo termoelétrico, $Q_{\text{máx}}$, é, por fim, localizada entre duas quantidades de calor: $Q_{\text{máx Máximo}}$ e $Q_{\text{máx Ótimo}}$, da seguinte forma:

$$Q_{\text{máx Máximo}} < Q_{\text{máx}} < Q_{\text{máx Ótimo}}$$

A quantidade de calor $Q_{\text{máx Máximo}}$ é encontrada fazendo a divisão de Q_c (quantidade de calor a ser removida) pelo Quociente₃ e a quantidade de calor $Q_{\text{máx Ótimo}}$ encontrada através da divisão de Q_c pelo Quociente₂, como indicado pelas Eq. 3.4 e Eq. 3.5 a seguir.

$$Q_{\text{máx Máximo}} = \frac{Q_c}{\frac{Q}{Q_{\text{máx}} \text{ máximo}}} \quad (3.4)$$

$$Q_{\text{máx Ótimo}} = \frac{Q_c}{\frac{Q}{Q_{\text{máx}} \text{ ótimo}}} \quad (3.5)$$

Considerando que os fabricantes dos módulos termoelétricos normalmente identificam a quantidade máxima de calor ($Q_{\text{máx módulo}}$) que seus dispositivos são capazes de bombear em uma dada temperatura $T_{\text{h módulo}}$ quando $\Delta T = 0$, a determinação da faixa de $Q_{\text{máx}}$ possibilita a pré-seleção de vários módulos termoelétricos de diversos fabricantes.

A seleção de módulo termoelétrico com valor de $Q_{\text{máx}}$ mais próximo do valor de $Q_{\text{máx Máximo}}$ conduzirá a módulos mais compactos e provavelmente mais baratos. Por outro lado,

a escolha de módulos com valor de $Q_{m\acute{a}x}$ próximo a $Q_{m\acute{a}x}$ Ótimo resultará em módulos mais eficientes, porém, frequentemente com maiores custos.

3.2.4 Cálculo da Corrente e Tensão Elétricas do Módulo Selecionado

Com base nas informações de resistência elétrica (R), do coeficiente de Seebeck (α) e resistência térmica (Θ_{TEC}) contidas nos catálogos técnicos dos dispositivos pré-selecionados podem-se determinar os valores de corrente e tensão operacionais através das seguintes equações (Tan e Fok, 2008):

$$R = \frac{V_{m\acute{a}x}}{i_{m\acute{a}x}} \frac{T_{h \text{ módulo}} - \Delta T_{m\acute{a}x}}{T_{h \text{ módulo}}} \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{V_{m\acute{a}x}}{T_{h \text{ módulo}}} \quad (3.7)$$

$$\Theta_{TEC} = \frac{\Delta T_{m\acute{a}x}}{i_{m\acute{a}x} V_{m\acute{a}x}} \frac{2T_{h \text{ módulo}}}{T_{h \text{ módulo}} - \Delta T_{m\acute{a}x}} \quad (3.8)$$

Em que:

R = Resistência elétrica do módulo termoeletrico, em Ω ;

Θ_{TEC} = Resistência térmica do módulo, em $K.W^{-1}$;

α = Coeficiente de Seebeck do módulo, em $V.K^{-1}$;

$i_{m\acute{a}x}$ = Corrente elétrica que produz $\Delta T_{m\acute{a}x}$, em A;

$V_{m\acute{a}x}$ = Tensão elétrica quando ocorre $i_{m\acute{a}x}$, em V;

$T_{h \text{ módulo}}$ = Temperatura em que são tomados os parâmetros ($i_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{a}x}$, etc.), em K.

Os parâmetros $T_{h \text{ módulo}}$, $V_{m\acute{a}x}$, $i_{m\acute{a}x}$ e $\Delta T_{m\acute{a}x}$, são obtidos dos catálogos dos fabricantes para cada modelo de módulo termoeletrico.

Com os valores de resistência elétrica, coeficiente de Seebeck e resistência térmica, obtidos através das Eq. 3.6 a 3.8, determinam-se então a tensão (V) e corrente elétrica (i) operacionais através das expressões a seguir (Tan e Fok, 2008).

$$Q_c = \alpha T_c i - \frac{1}{2} i^2 R - \frac{\Delta T}{\theta_{TEC}} \quad (3.9)$$

$$V = \alpha \Delta T + iR \quad (3.10)$$

Em que:

Q_c = Quantidade de calor a ser removida, em W;

α = Coeficiente de Seebeck do módulo, em V.K⁻¹;

T_c = Temperatura do lado frio do módulo, em K;

i = Corrente elétrica que circula pelo módulo, em A;

R = Resistência elétrica do módulo termoelétrico, em Ω ;

ΔT = Diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do módulo;

θ_{TEC} = Resistência térmica do módulo, em K.W⁻¹;

V = Tensão elétrica operacional, em V;

3.2.5 Cálculo da Potência e do Calor Dissipado na Fonte Quente

A potência (P) dos módulos termoelétricos e a quantidade de calor dissipado na fonte quente (Q_h) podem ser encontradas a partir dos valores de corrente e tensão elétricas obtidas com as Eq. 3.9 e 3.10 utilizando as seguintes expressões (Tan e Fok, 2008):

$$P = i V \quad (3.11)$$

$$Q_h = Q_c + P \quad (3.12)$$

A atualização da temperatura do lado quente do módulo termoelétrico (T_h), estimado no subitem 3.2.1, pode ser feita conhecendo-se a resistência térmica da fonte quente (Θ_{HS}) através da expressão a seguir (Tan e Fok, 2008).

$$T_h = T_{amb} + Q_h \Theta_{HS} \quad (3.13)$$

O novo valor de T_h obtido com a Eq. 3.13 possibilita a atualização da diferença de temperatura entre os lados quente e frio do módulo (ΔT) estimada no subitem 3.2.1.

As atualizações dos valores de T_h e ΔT possibilitam novas estimativas de corrente e tensão elétricas (Eq. 3.9 e 3.10), bem como da potência do módulo termoelétrico e do calor dissipado (Eq. 3.11 e 3.12), que, por sua vez, permitem novo cálculo de T_h .

Esse processo iterativo deve ser executado até que os valores de T_h das iterações de número n e $n+1$ não variarem significativamente.

3.2.6 Determinação do COP do Módulo Selecionado

A determinação do coeficiente de *performance* (COP) dos módulos termoelétricos auxilia na análise e comparação de dispositivos diferentes. O cálculo do COP é feito conforme expressão a seguir.

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{P_{in}} \quad (3.14)$$

Seguidos os procedimentos descritos nessa metodologia estarão disponíveis as condições operacionais, corrente e tensão elétricas, e os respectivos coeficientes de *performance* de cada um dos módulos termoelétricos previamente selecionados

Juntamente com as especificidades de cada modelo e de cada fabricante de módulo termoeletrico: geometria, dimensões, número de termoelementos, custos, etc., as informações dos dispositivos obtidas com a metodologia apresentada podem ser uma ferramenta útil de seleção e análise do módulo termoeletrico mais apropriado para determinada aplicação.

4. RESULTADOS

A metodologia apresentada no Capítulo 3 foi aplicada em um estudo de caso que consistiu da identificação, seleção e análise de módulos termoelétricos a partir dos dados do trabalho desenvolvido por Menezes (2007) que desenvolveu o protótipo de minirrefrigerador termoelétrico mostrado na Figura 2.11 do Capítulo 2 desse trabalho.

A seguir são apresentados os dados de entrada, resultados dos cálculos e análises feitas.

4.1 Seleção de Módulos Termoelétricos

4.1.1 Determinação de Q_c

A carga térmica total calculada a ser removida pelo minirrefrigerador é de 11,30W.

4.1.2 Determinação da menor temperatura do objeto a ser refrigerado, T_{carga}

A menor temperatura do objeto a ser refrigerado foi estimada em 0°C, mesma temperatura interna do minirrefrigerador.

4.1.3 Determinação da maior temperatura ambiente, T_{amb}

Considerou-se a temperatura de 30°C como a maior temperatura ambiente a qual o minirrefrigerador estará exposto.

4.1.4 Determinação da diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do módulo termoelétrico, ΔT

Considerando os gradientes típicos entre 10 e 15°C no lado quente do módulo termoelétrico relatados por Tan e Fok (2008) quando se utiliza trocador de calor com superfície aletada e convecção forçada, a temperatura do lado quente do módulo termoelétrico (T_h) foi estimada a partir de um gradiente de temperatura de 12,5°C devido a resistência térmica da fonte quente, da seguinte forma:

$T_h = T_{amb} +$ queda de temperatura devido a resistência térmica da fonte quente

$$T_h = 30 + 12,5 = 42,5^\circ\text{C}$$

Da mesma forma, considerando gradientes de temperatura no lado frio do módulo 50% menores que os encontrados no lado quente, quando trocadores de calor similares são usados, conforme relatado por Tan e Fok (2008), estimou-se a temperatura do lado frio do módulo termoelétrico (T_c) considerando um gradiente de temperatura de $6,25^\circ\text{C}$ devido a resistência térmica da fonte fria, como segue:

$T_c = T_{carga} -$ queda de temperatura devido a resistência térmica da fonte fria

$$T_c = 0 - 6,25 = -6,25^\circ\text{C}$$

Dessa forma:

$$\Delta T = T_h - T_c$$

$$\Delta T = 42,5 - (-6,25) = 48,75^\circ\text{C}.$$

4.1.5 Definição do Número Mínimo de Estágios do Módulo Termoelétrico

O número de estágios do módulo termoelétrico foi fixado em um, considerando o ΔT estimado no subitem 4.1.4.

4.1.6 Seleção de Módulo Termoelétrico com $Q_{m\acute{a}x}$ Adequado

Utilizando a Eq. 3.1 e o valores de ΔT de $48,75^\circ\text{C}$ e o valor de $\Delta T_{m\acute{a}x}$ de 65°C para módulo de um estágio, encontrou-se o Quociente₁ de 0,75.

O valor de 0,75 para o Quociente₁ foi usado como parâmetro de entrada nas curvas mostradas na Figura 3.2 de onde foram obtidos os seguintes valores de Quociente₂ e Quociente₃:

$$Quociente_2 = \frac{Q}{Q_{m\acute{a}x}} \acute{o}timo = 0,20$$

$$Quociente_3 = \frac{Q}{Q_{m\acute{a}x}} m\acute{a}ximo = 0,25$$

Fazendo-se a divis\~ao de 11,3W pelos valores correspondentes ao Quociente₂ e ao Quociente₃, foram encontrados $Q_{m\acute{a}x}$ \acute{O}timo e $Q_{m\acute{a}x}$ M\acute{a}ximo como segue:

$$Q_{m\acute{a}x} \acute{O}timo = 56,0 \text{ W}$$

$$Q_{m\acute{a}x} M\acute{a}ximo = 45,2 \text{ W}$$

A Tabela 4.1 a seguir resume os par\~ametros de projeto e os par\~ametros que formam obtidos atrav\~es da metodologia proposta.

Tabela 4.1 – Par\~ametros de sele\~cao de m\~odulos termoel\~etricos

Q_c [W]	T_{carga} [°C]	T_{amb} [°C]	T_h [°C]	T_c [°C]	ΔT [°C]	$Q_{m\acute{a}x}$ \acute{O}timo [W]	$Q_{m\acute{a}x}$ M\acute{a}ximo [W]
11,30	0,00	30,00	42,50	- 6,25	48,75	56,0	45,2 W

Os valores encontrados para $Q_{m\acute{a}x}$ M\acute{a}ximo e $Q_{m\acute{a}x}$ \acute{O}timo representam a faixa de valores de $Q_{m\acute{a}x}$ a partir da qual m\~odulos termoel\~etricos podem ser selecionados dentre os v\~arios dispositivos dispon\~iveis no mercado.

As caracter\~isticas de alguns dispositivos termoel\~etricos pr\~e-selecionados obtidas dos cat\~alogos dos fabricantes est\~ao mostradas na Tabela 4.2 a seguir.

Tabela 4.2 – Módulos termoeletrônicos pré-selecionados. Fonte: Catálogos dos fabricantes.

Fabricante	Modelo	$Q_{\text{máx}}$ [W]	$V_{\text{máx}}$ [V]	$I_{\text{máx}}$ [A]	$\Delta T_{\text{máx}}$ [°C]
Tetech	TE-127-1.0-0.8	56,0	15,7	5,8	69,0
Danvic	DV-40-06	53,1	15,4	6,0	68,0
SCTB Nord	TM-241-1.0-3.0	56,5	27,0	3,3	71,0
	TM-127-1.4-6.0	56,0	14,7	6,4	71,0
Marlow	XLT12-6	52,0	14,4	5,6	59,0
Kryotherm	TB-127-1.0-0.8	56,0	15,7	5,8	69,0
	TB-99-1.4-1.5	46,0	12,4	6,1	70,0

4.1.7 Características Técnicas dos Módulos Termoeletrônicos

A partir das informações listadas na Tabela 4.2, foram estimadas a resistência elétrica (R), o coeficiente de Seebeck (α) e resistência térmica (Θ_{TEC}) de cada um dos módulos termoeletrônicos pré-selecionados. Os resultados encontrados através das Eq. 3.6 a 3.8 estão dispostos na Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3 – Características dos módulos termoeletrônicos pré-selecionados

Modelo	R [Ω]	α [$V.K^{-1}$]	Θ_{TEC} [$K.W^{-1}$]
TE-127-1.0-0.8	2,0846	0,0523	1,9679
DV-40-06	1,9852	0,0513	1,9030
TM-241-1.0-3.0	6,2334	0,0906	2,0919
TM-127-1.4-6.0	1,7499	0,0493	1,9811
XLT12-6	2,0660	0,0480	1,8213
TB-127-1.0-0.8	2,0846	0,0523	1,9679
TB-99-1.4-1.5	1,5587	0,0413	2,4138

4.1.8 Determinação de Parâmetros Operacionais

Com base nas informações contidas nas Tabelas 4.2 e 4.3 e através das Eq. 3.9 a 3.12 foram determinados os valores de corrente e tensão elétricas, potência dissipada e calor dissipado na fonte quente de cada um dos módulos termoeletrônicos pré-selecionados. Os resultados dos cálculos são mostrados a seguir na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros operacionais dos módulos pré-selecionados

Módulo	I [A]	V [V]	Potência [W]	Q_h [W]
TE-127-1.0-0.8	3,4968	9,8395	34,4067	45,7067
XLT12-6	4,9475	12,5602	62,1416	73,4416
TB-127-1.0-0.8	3,4968	9,8395	34,4067	45,7067
TB-99-1.4-1.5	3,9710	8,2036	32,5766	43,8766
TM-127-1.4-6.0	3,5816	8,6710	31,0562	42,3562
TM-241-1.0-3.0	1,8946	16,2246	30,7391	42,0391
DV-40-06	3,6746	9,7960	35,9963	47,2963

4.1.9 Atualização do Valor Estimado de T_h

Os valores de T_h estimados inicialmente no subitem 4.1.4 foram atualizados a partir do parâmetro operacional Q_h listado na Tabela 4.4 e do valor da resistência térmica (Θ_{HS}) do dissipador térmico utilizado no protótipo do minirrefrigerador usando-se da Eq. 3.13. A Tabela 4.5 a seguir contém os valores atualizados de T_h juntamente com os dados da primeira estimativa feita no subitem 4.1.4 para cada módulo pré-selecionado.

Tabela 4.5 – Atualização do valor do parâmetro T_h

Módulo	T_h estimado [°C]	T_h calculado [°C]	Variação (estimado - calculado)
TE-127-1.0-0.8	42,50	37,4502	5,0498
XLT12-6	42,50	41,9710	0,5290
TB-127-1.0-0.8	42,50	37,4502	5,0498
TB-99-1.4-1.5	42,50	37,1519	5,3481
TM-127-1.4-6.0	42,50	36,9041	5,5959
TM-241-1.0-3.0	42,50	36,8524	5,6476
DV-40-06	42,50	37,7093	4,7907

Executou-se o processo iterativo descrito no subitem 3.2.5 do Capítulo 3 desse trabalho para atualização dos valores de T_h , corrente e tensão elétricas, potência do módulo termoelétrico e do calor dissipado. O processo iterativo foi interrompido quando a diferença entre os valores de T_h de duas iterações subsequentes foi considerada insignificante para o estudo de caso analisado.

A Tabela 4.6 a seguir contém, para cada um dos módulos termoeletrônicos pré-selecionados, os valores dos parâmetros operacionais calculados de acordo com a metodologia apresentada nesse trabalho a cada iteração realizada.

Tabela 4.6 – Sequência de cálculos dos parâmetros através do processo iterativo

Primeira iteração					
Módulo	I [A]	V [V]	Potência [W]	Q _h [W]	T _h [°C]
TE-127-1.0-0.8	3,1328	8,8165	27,6204	38,9204	37,4502
XLT12-6	4,8397	12,3121	59,5869	70,8869	41,9710
TB-127-1.0-0.8	3,1328	8,8165	27,6204	38,9204	37,4502
TB-99-1.4-1.5	3,5425	7,3147	25,9125	37,2125	37,1519
TM-127-1.4-6.0	3,1911	7,7118	24,6091	35,9091	36,9041
TM-241-1.0-3.0	1,6870	14,4190	24,3250	35,6250	36,8524
DV-40-06	3,3027	8,8119	29,1030	40,4031	37,7093
Segunda iteração					
TE-127-1.0-0.8	3,0580	8,6027	26,3071	37,6071	36,3440
XLT12-6	4,7605	12,1285	57,7377	69,0377	41,5545
TB-127-1.0-0.8	3,0580	8,6027	26,3071	37,6071	36,3440
TB-99-1.4-1.5	3,4617	7,1439	24,7302	36,0302	36,0656
TM-127-1.4-6.0	3,1216	7,5383	23,5317	34,8317	35,8531
TM-241-1.0-3.0	1,6507	14,0981	23,2718	34,5718	35,8068
DV-40-06	3,2209	8,5918	27,6735	38,9735	36,5857
Terceira iteração					
TE-127-1.0-0.8	3,0437	8,5617	26,0594	37,3594	36,1299
XLT12-6	4,7058	12,0010	56,4745	67,7745	41,2531
TB-127-1.0-0.8	3,0437	8,5617	26,0594	37,3594	36,1299
TB-99-1.4-1.5	3,4475	7,1139	24,5250	35,8250	35,8729
TM-127-1.4-6.0	3,1101	7,5096	23,3556	34,6556	35,6775
TM-241-1.0-3.0	1,6448	14,0458	23,1026	34,4026	35,6352
DV-40-06	3,2042	8,5468	27,3855	38,6855	36,3526
Quarta iteração					
TE-127-1.0-0.8	3,0410	8,5540	26,0127	37,3127	36,0896
XLT12-6	4,6696	11,9164	55,6447	66,9447	41,0472
TB-127-1.0-0.8	3,0410	8,5540	26,0127	37,3127	36,0896
TB-99-1.4-1.5	3,4451	7,1087	24,4903	35,7903	35,8395
TM-127-1.4-6.0	3,1082	7,5048	23,3266	34,6266	35,6489
TM-241-1.0-3.0	1,6438	14,0371	23,0742	34,3742	35,6076
DV-40-06	3,2008	8,5376	27,3271	38,6271	36,3057

4.2 Comparação e Análise de Módulos Termoelétricos

O processo de seleção de módulos termoelétricos indicou diferentes dispositivos termoelétricos de fabricantes variados como aplicáveis para o estudo de caso. Para comparação de desempenho dos módulos pré-selecionados, foi calculado o coeficiente de *performance* de cada um dos dispositivos através da Eq. 3.14. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.7 a seguir.

Tabela 4.7 – Coeficientes de *performance*

Módulo	Q_c [W]	Potência [W]	COP
TE-127-1.0-0.8	11,3	26,0127	0,4344
XLT12-6		55,6447	0,2031
TB-127-1.0-0.8		26,0127	0,4344
TB-99-1.4-1.5		24,4903	0,4614
TM-127-1.4-6.0		23,3266	0,4844
TM-241-1.0-3.0		23,0742	0,4897
DV-40-06		27,3271	0,4135

Nota-se que os resultados obtidos com a metodologia de seleção e análise de módulos termoelétricos, conforme constam das tabelas anteriores, foram coerentes com os dados e parâmetros encontrados em trabalhos científicos publicados por outros autores.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A metodologia de seleção e análise de módulos termoelétricos apresentada nesse trabalho proporcionou a identificação de módulos de modelos e fabricantes variados para as condições de operação do protótipo de minirrefrigerador termoelétrico doméstico do estudo de caso.

Dos módulos pré-selecionados, o que apresentou maior COP, módulo TM-241-1.0-3.0 do fabricante SCTB Nord, foi aquele que apresentou o maior coeficiente de Seebeck estimado confirmando que características satisfatórias de desempenho dos módulos estão relacionadas à qualidade termoelétrica dos termoelementos constituintes.

Os parâmetros técnicos e operacionais dos módulos analisados obtidos com a metodologia de seleção e análise proposta conduziram a estimativas de desempenho dos dispositivos termoelétricos coerentes com os dados encontrados em trabalhos científicos, COP entre 0,3 e 0,5 (Min e Rowe, 2006). Dessa forma, a metodologia de seleção e análise de módulos termoelétricos apresentada pode ser uma ferramenta útil uma vez que a seleção do dispositivo termoelétrico mais adequado para determinada aplicação envolve, além de aspectos construtivos e geométricos, características operacionais, sendo a corrente e tensão elétricas e o desempenho térmico os principais meios de comparação e análise de dispositivos dentre os diversos modelos e fabricantes disponíveis no mercado.

Para trabalhos futuros, sugerem-se a verificação da metodologia apresentada em aplicações com maior carga térmica a ser removida e a avaliação de eficiência e de custos de dispositivos termoelétricos de diferentes modelos e fabricantes considerando a flexibilidade de seleção de dispositivos a partir de dados de capacidade, número de termopares e dos parâmetros operacionais, tensão e corrente elétrica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTRAIN, D.; VIÁN, J. G. *Study and optimization of the heat dissipater of a thermoelectric refrigerator*. Journal of Enhanced Heat Transfer, v. 12, p. 159–170, 2005.

BICALHO, L. R. L.; KOURY, R. N. N.; MACHADO, L.; MENDONÇA, C. *Estudo da viabilidade técnica e econômica da utilização de bombas de calor termoelétricas para aquecimento de água residencial*. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2010.

CARVALHO, Igor Soares. *Projeto de um dissipador de calor para um sistema de refrigeração baseado no efeito Pelteir*. Trabalho de Graduação – Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

COSTA, Ênnio Cruz da. *Refrigeração*. 3ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1982.

GROMOV, G. *Thermoelectric Cooling Modules*. Disponível em: <<http://www.rmtltd.ru/articles/Thermoelectric%20Cooling%20Modules.pdf>>. Acesso em 19 abr. 2011.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física. Eletromagnetismo*, Volume 3, 4ª ed., Ed. LTC, 2007.

HARUYAMA, T. *Performance of Peltier elements as a cryogenic heat flux sensor at temperature down to 60 K*. Cryogenics, v. 41, p. 335–339, 2001.

KASAP, Safa, O. *Thermoelectric Effects In Metals: Thermocouples*. 2001. Department of Electrical Engineering. University of Saskatchewan, Canada. Disponível em: <<http://materials.usask.ca/samples/Thermoelectric-Seebeck.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2011.

KRYOTHERM. Multistage thermoelectric coolers. Disponível em: <<http://www.kryotherm.ru/index.phtml?tid=76>>. Acesso em: 21 abr. 2011.

MARLOW. *Thermoelectric Materials of the Future*. Disponível em: <<http://www.marlow.com/resources/future-concepts/materials.html>>. Acesso em: 06 jul. 2011.

MENDONÇA, C.; KOURY, R. N. N.; MACHADO, L.; MAIA A. A. T. A. *Refrigerador termoelétrico com controle eletrônico ótimo de temperatura*. MERCOFRIO, ABRAVA, 2011.

MENEZES, Tiago Antunes Vieira de. *Contribuição ao Estudo sobre a Viabilidade Técnica da Utilização de Aquecedores e Refrigeradores Termoelétricos*. Trabalho de Graduação – Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MENEZES, T. A. V.; KOURY, R. N. N.; MACHADO, L.; MENDONÇA, C. *Contribuição ao estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de aquecedores e refrigeradores termoelétricos*. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2010.

MICROPELT. Datasheet MPG-D751. Disponível em: <<http://www.micropelt.com/products/datasheets.php>>. Acesso em: 03 abr. 2011.

MIN, G.; ROWE, D. M. *Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators*. *Applied Energy*, v. 83, p. 133–152, 2006.

POLLOCK, Daniel D. *Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool*. ASTM Special Technical Publication; 852. 1985. ASTM. Disponível em: <http://books.google.com/books?id=7WglwFGBNfgC&printsec=frontcover&hl=EN&source=gbs_hp#v=onepage&q&f=false>. Acesso em 02 jun. 2011.

REIS, Mateus Fonseca dos. *Controle de temperatura em um refrigerador termoelétrico*. Trabalho de Graduação – Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RIFFAT, S.B.; MA, Xiaoli. *Thermoelectrics: a review of present and potential applications*. Applied Thermal Engineering, v. 23, p. 913–935, 2003.

RIFFAT, S.B.; MA, Xiaoli; WILSON, Robin. *Performance simulation and experimental testing of a novel thermoelectric heat pump system*. Applied Thermal Engineering, v. 26, p. 494–501, 2006.

ROMANI, Rubens. *Aplicações de efeitos termoelétricos na indústria aeronáutica*. In: 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. 2007. Cusco, Peru. Disponível em: <<http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/29/29-14.pdf>> Acesso em: 05 abr. 2011.

SOUZA, Diego Henrique Cunha de. *Otimização do uso de refrigeradores termoelétricos em processos de refrigeração*. Projeto de Graduação – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

STOCKHOLM, J.G. *How to use Thermoelectrics for Cooling - Modular Approach*. SCT-93 Short Course on Thermoelectrics, Yokohama-shi, Japan, (1993). Disponível em: <<http://www.its.org/node/5003>>. Acesso em 27 jun. 2011.

STOCKHOLM, J.G. *Current state of Peltier Cooling*. 16th International Conference on Thermoelectrics. IEEE 97TH8291, p. 37-46, 1997.

TAN, F. L.; FOK, S. C. *Methodology on sizing and selecting thermoelectric cooler from different TEC manufacturers in cooling system design*. Energy Conversion and Management, v. 49, p. 1715–1723, 2008.

VIÁN, J. G.; ASTRAIN, D. *Development of a heat exchanger for the cold side of a thermoelectric module*. Applied Thermal Engineering, v. 28, p. 1514–1521, 2008.

7. APÊNDICE

As especificações técnicas dos módulos termoelétricos selecionados e analisados através da metodologia proposta nesse trabalho fornecidas pelos fabricantes dos dispositivos, a saber: dispositivo termoelétrico TE-127-1.0-0.8, fabricante Tetch; dispositivo DV-40-06, fabricante Danvic; dispositivos TM-241-1.0-3.0 e TM-127-1.4-6.0, fabricante SCTB Nord; dispositivo XLT12-6, fabricante Marlow e dispositivos TB-127-1.0-0.8 e TB-99-1.4-1.5 do fabricante Kryotherm; estão anexadas a esse trabalho e constituem-se seu apêndice.