

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Edson Nogueira**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROPOSTA DE CONTROLE  
DE UM SISTEMA TERMOELÉTRICO PARA  
CONDICIONAMENTO DE AR**

**Taubaté, SP**

**2005**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Edson Nogueira**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROPOSTA DE CONTROLE  
DE UM SISTEMA TERMOELÉTRICO PARA  
CONDICIONAMENTO DE AR**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo curso de Mestrado do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação  
Industrial e Robótica

Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

**Taubaté, SP**

**2005**

**EDSON NOGUEIRA**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROPOSTA DE CONTROLE DE UM SISTEMA  
TERMOELÉTRICO PARA CONDICIONAMENTO DE AR**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo curso de Mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação Industrial e Robótica

**Data:** 02 de Agosto de 2005.

**Resultado:** \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr.:** José Rui Camargo - Universidade de Taubaté

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

**Prof. Dr.:** Luiz Octávio Mattos dos Reis -

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

**Prof. Dr.:** Carlos Daniel Ebinuma -

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho à minha esposa Ercília e à minha filha Raissa Amor pela paciência e incentivos

Aos meus pais,  
Jaime e Almerinda.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir a concretização deste trabalho.

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

Ao corpo docente do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté que souberam transmitir conhecimentos, colaborando com o desenvolvimento científico.

Ao Professor Aurélio da Silva Neto do laboratório de instrumentação e robótica pela colaboração na parte prática do trabalho.

Aos colegas do curso que durante as disciplinas tanto foram solidários.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento teórico das equações que permitem avaliar o desempenho de um sistema para condicionamento de ar baseado no sistema termoelétrico e, ainda, as características de módulos termoelétricos disponíveis comercialmente. O sistema termoelétrico de refrigeração baseia-se no efeito descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834. De acordo com este fenômeno, quando uma corrente elétrica e contínua flui na junção de dois materiais semicondutores de propriedades diferentes, calor é dissipado ou absorvido. Os módulos termoelétricos são fabricados por materiais semicondutores selados entre duas placas e conforme o sentido que a corrente flui uma placa torna-se aquecida e a outra resfriada. Considera-se os parâmetros mais importantes para a avaliação da eficiência de um processo de refrigeração termoelétrico o coeficiente de desempenho, a taxa de calor transferido e a máxima diferença de temperatura possível de ser obtida entre o lado quente e o lado frio do módulo termoelétrico. Para essa avaliação foi construído um equipamento experimental utilizando módulo termoelétrico e dissipadores de calor disponíveis comercialmente, sensores de temperatura e um software para aquisição, armazenamento e comparação de dados.

Palavras-chave: sistema termoelétrico, condicionamento de ar, efeito Peltier.

## **ABSTRACT**

This paper presents the theoretical development of the equations that allow to evaluate the performance of an air conditioning system based on the thermoelectric effect. The cooling system is based on a phenomena discovered by Jean Charles Athanase Peltier, in 1834. According this when electricity runs through a junction between two semiconductors with different properties, heat is dissipated or absorbed. Thus, the thermoelectric modules are made by semiconductors materials sealed between two plates through which a continuous current that keeps one plate hot and the other cold. The most important parameters to evaluate the performance of the device thermoelectric refrigeration are the coefficient of performance, the heat pumping rate and the maximum temperature difference between the hot side and the cold side. A device was designed and built using thermoelectric module and heat sink commercial, a temperature measuring system and a software to evaluate the datas.

**Keywords:** Thermoelectric System, air conditioning, Peltier effect

## LISTA DE SIMBOLOS

A	Área da secção transversal	[m <sup>2</sup> ]
E	Força eletromotriz	[V]
I	Densidade de corrente elétrica	[A]
k	Condutividade térmica	[W/°C.m]
K	Condutância térmica	[W/°C]
P	Potência elétrica	[W]
Q <sub>C</sub>	Taxa de bombeamento de calor	[W]
Q <sub>J</sub>	Calor de Joule gerado por unidade de volume na unidade de tempo	[W/m <sup>3</sup> ]
Q <sub>P</sub>	Taxa de calor de Peltier por unidade de área da junção	[W]
Q <sub>T</sub>	Calor de Thomson	[W]
R	Resistência elétrica total	[Ω]
R <sub>c</sub>	Resistência de contato na junção quente ou junção quente	[Ω]
T	Temperatura	[°C,K]
$\bar{T}$	Temperatura média da junção	[°C]
T <sub>c</sub>	Temperatura do lado frio do módulo termoeétrico	[°C, K]
T <sub>h</sub>	Temperatura do lado quente do módulo termoeétrico	[°C, K]
V	Tensão elétrica	[V]
x, l	Comprimento dos elementos semicondutores	[m]
W	Potência gerada	[W]
Z	Figura de Mérito	[°C <sup>-1</sup> ]

## SIMBOLOGIA GREGA

$\alpha$	Coeficiente de Seebeck	[V/°C]
$\gamma$	Razão A/L	[m]
$\rho$	Resistividade elétrica	[ $\Omega$ .m]
$\rho'$	Resistividade elétrica aparente	[ $\Omega$ .m]
$\tau$	Coeficiente de Thomson	[V/°C]
$\phi$	Coeficiente de desempenho	[adimensional]
$\phi_{\text{máx}}$	Coeficiente de desempenho ótimo	[adimensional]
$\Delta T$	Diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio do módulo termoelétrico	[°C]
$\pi$	Coeficiente de Peltier da ligação térmica	[V]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Par termoelétrico genérico	24
Figura 2.2a	Gerador termoelétrico - Efeito Seebeck	26
Figura 2.2b	Refrigerador termoelétrico - Efeito Peltier	26
Figura 2.3	Seção infinitesimal de uma barra transportando uma corrente $I$ em um gradiente de temperatura	27
Figura 2.4	Distribuição de temperatura em uma barra transportando uma corrente elétrica	30
Figura 2.5	Coeficiente de eficácia de uma associação termoelétrica em função de $Z\bar{T}$ ou de $Z$ para três valores particulares de $\bar{T}$	41
Figura 2.6	Valores de $w$ como função de $Z\bar{T}$ ou de $Z$ para três valores particulares de $\bar{T}$	42
Figura 2.7	Desempenho de uma associação termoelétrica em função da diferença	45
Figura 2.8	Coeficiente de eficácia e taxa de bombeamento de calor em função da corrente	46
Figura 2.9	Refrigerador termoelétrico de 3 estágios tendo 3 associações no 2º estágio e 6 no 3º estágio e as associações estão eletricamente em série	54
Figura 2.10	Dispositivo termoelétrico de simples estágio composto de 4 associações termicamente em paralelo e eletricamente em série	55
Figura 3.1	Fluxograma de um sistema de termoelétrico para condicionamento de	57
Figura 3.2	Foto - Dissipadores de calor lado quente e lado frio, e módulo termoelétrico – Sub-conjunto	58
Figura 3.3	Foto - Dissipadores de calor lado quente e lado frio, módulo termoelétrico e dutos – Sub-conjunto	58

Figura 3.4	Foto - Sub-conjunto	58
Figura 3.5	Foto – Conjunto Montado com Instrumentos	58
Figura 3.6	Foto - Conjunto montado – Aquisição de dados	58
Figura 3.7	Gráfico - Curva aproximada de calibração de termopar tipo J	60
Figura.3.8	Fluxograma do controle do sistema experimental	63
Figura 4.1	Gráfico com valores de $T_h$ e $T_c$ em função do tempo de 0 a 30 min	73
Figura 4.2	Gráfico com valores médios de $T_h$ e $T_c$ em função do tempo de 0 a 30 min	73
Figura 4.3	Gráfico com a variação da temperatura ( $\Delta T$ ) do lado quente e do lado frio em função da vazão do ar do lado quente. Vazão média de ar frio	75
Figura 4.4	Coeficiente de desempenho e taxa de bombeamento de calor em função do tempo (regime transitório)	76
Figura 4.5	Coeficiente de desempenho e taxa de bombeamento de calor em função da vazão do ar do lado quente (regime transitório)	77
Figura 4.6	Coeficiente de desempenho em função da variação da temperatura $\Delta T$ ( $T_h-T_c$ )	79
Figura 4.7	Coeficiente de desempenho e a taxa de bombeamento de calor como função da corrente elétrica.	80
Figura 4.8	Gráfico - Variação da temperatura $\Delta T$ ( $T_h-T_c$ ) em função da tensão aplicada	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Dados para elaboração da curva aproximada para calibração dos termopares tipo J.	60
Tabela 4.1	Tabela com as temperaturas $T_h$ e $T_c$ médias dos ensaios 1 a 7	72
Tabela 4.2	Valores médios de temperaturas, de vazão de ar do lado quente e de corrente e tensão elétricas aplicadas	74
Tabela 4.3	Valores calculados e dados dos ensaios do regime transitório	76
Tabela 4.4	Dados para regime permanente (14 a 30 minutos)	78
Tabela 4.5	Resultados dos principais parâmetros do sistema no regime permanente	79

## SUMÁRIO

CAPITULO 1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações Iniciais	14
1.2 Objetivo	15
1.3 Desenvolvimento do Trabalho	16
1.4 Revisão da Literatura	17
CAPÍTULO 2 O EFEITO TERMOELÉTRICO	22
2.1 Efeito Joule	22
2.2 Efeito Thomson	23
2.3 Efeito Seebeck	23
2.4 Efeito Peltier	25
2.5 Desenvolvimento Matemático	27
2.5.1 Equação Diferencial para Distribuição de Temperatura em uma Barra	27
2.5.2 Transferência de Energia Térmica por $\alpha$ , $\rho$ e $K$ Independentes da Temperatura	30
2.6 Refrigeração	33
2.6.1 Coeficiente de Desempenho	35
2.6.2 Taxa de Bombeamento de Calor com Coeficiente de Eficácia Maximizado	42
2.6.3 Máxima Taxa de Bombeamento de Calor	47
2.6.4 Máxima Diferença de Temperatura	48
2.6.5 Resistência de Contato	49
2.6.6 Sistemas com Multi-Associações	50

CAPÍTULO 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
3.1 Equipamento Termoelétrico Experimental para Condicionamento de Ar	56
3.1.1 Principais Características dos Componentes do Sistema	56
3.2 Fotos de partes, Sub-Conjuntos e Conjunto do Equipamento Experimental	58
3.3 Instrumentação e controle	59
3.3.1 Instrumentos - Sensor	59
3.3.1.1 Calibração dos Termopares	59
3.3.2 Controle	61
3.3.2.1 Proposta para o Controle do Processo do Sistema Experimental	61
3.4 Ensaios	63
3.5 Ensaio 1	64
3.6 Ensaio 2	65
3.7 Ensaio 3	66
3.8 Ensaio 4	67
3.9 Ensaio 5	68
3.10 Ensaio 6	69
3.11 Ensaio 7	70
CAPITULO 4 RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	71
4.1 Geral	71
4.2 Variação da Temperatura em Função da Vazão do Ar do Lado Quente	74
4.3 Regime Transitório	75
4.4 Regime Permanente	77
4.5 Conclusões	82
REFERENCIAS	84
ANEXO 1 Módulo Termoelétrico	86

## **CAPITULO 1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Os efeitos térmicos e elétricos podem ser detectados em um circuito constituído de dois condutores diferentes tendo suas junções a diferentes temperaturas.

Esses efeitos termoelétricos podem ser utilizados para a produção de energia elétrica (potência) e para refrigeração. A principal dificuldade tem sido o desenvolvimento de materiais apropriados e a tecnologia para sua utilização para se conseguir melhor coeficiente de eficácia. Alguns pesquisadores tem estudado o sistema termoelétrico utilizando módulos termoelétricos e dissipadores de calor disponíveis comercialmente com objetivo de conseguir um rendimento melhor.

O sistema termoelétrico é empregado em diversas áreas, como militar, aeroespacial, medicina, microeletrônica, laboratório, sensores e instrumentos e indústria.

Estudos no Brasil referente ao assunto são raros, por isso a necessidade de novos estudos e pesquisa e nesse trabalho apresenta-se ênfase em sistema termoelétrico de refrigeração.

Este sistema é baseado no fenômeno descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834. Segundo o qual, quando uma corrente elétrica e contínua flui na junção de dois materiais semicondutores de propriedades diferentes, calor é dissipado ou absorvido.

Os módulos termoelétricos são formados por materiais semicondutores, sendo mais utilizado a liga Telureto de Bismuto, selados entre duas placas e conforme o sentido que a corrente flui uma placa torna-se aquecida e a outra resfriada.

## 1.2 OBJETIVO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento teórico das equações que permitem avaliar o desempenho de um sistema para condicionamento de ar baseado no efeito termoelétrico e, ainda, a verificação das características de um módulo termelétrico disponível comercialmente e o desempenho de um equipamento experimental.

O emprego deste sistema de refrigeração pode ser bastante viável conforme sua aplicação, pois o mesmo apresenta muitas vantagens quando comparado a outros processos (HEIKES & URE JR., 1961).

Não possui peças móveis, não necessita manutenção; não contém gás refrigerante; a direção de bombeamento de calor é revertida, i.e, invertendo a polaridade da tensão aplicada o refrigerador torna-se um aquecedor; pode funcionar em aplicações severas, também sensíveis ou em pequenos espaços onde necessitam de refrigeração convencional e não depende de posição de instalação. Devido a essas vantagens os módulos termoelétricos são utilizados em diversas áreas. Os parâmetros mais importantes para a avaliação do desempenho de um condicionador de ar termelétrico são: coeficiente de desempenho, taxa de calor transferido e máxima diferença de temperatura possível de ser obtida entre o lado frio e o lado quente. A taxa de bombeamento de calor é função da corrente circulante e a maximização do coeficiente de eficácia para cada diferença de temperatura é feita ajustando-se a tensão aplicada.

Para os ensaios experimentais foi desenvolvido um equipamento para análise do desempenho e arquitetura de montagem de dissipadores de calor e propriedades do ar ambiente com o objetivo de avaliar o coeficiente de desempenho, onde são verificadas as temperaturas, umidade do ar, potência, corrente e tensão ideais para otimização do coeficiente de desempenho.

Para essa análise foi utilizado o *software matlab* para aquisição de dados dos instrumentos de medição que elaboram gráficos e tabelas. Com o gerenciamento destes dados a análise do sistema se dá de forma mais precisa.

### **1.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

Este trabalho apresenta-se desenvolvido em quatro capítulos.

O primeiro capítulo refere-se a considerações iniciais, apresenta uma breve descrição do sistema termoelétrico, como o mesmo ocorre em dois materiais semicondutores e seu emprego. Apresenta o objetivo deste trabalho, que contém o desenvolvimento teórico que permitem avaliar o desempenho de um sistema termoelétrico para condicionamento de ar, o emprego do sistema de refrigeração e suas vantagens, descreve os parâmetros mais importantes para avaliar o desempenho de um sistema termoelétrico, e apresenta também a revisão da literatura.

O segundo capítulo apresenta os efeitos termoelétricos e o desenvolvimento das equações que permitem avaliar o desempenho de um sistema termoelétrico de refrigeração, conforme Heikes e Ure Jr, 1961.

O terceiro capítulo trata-se do desenvolvimento e montagem do protótipo e descrição de um equipamento experimental de refrigeração.

Apresenta-se também, a instrumentação e o controle, sendo a descrição, especificação e a calibração dos instrumentos utilizados para a aquisição de dados, o conversor analógico/digital e a análise.

Referente ao controle propõem-se a ação de controle proporcional e integral (PI), que deverá atuar no retificador controlando a variação da corrente contínua e da tensão elétrica aplicadas no módulo termoelétrico, que influi nas temperaturas do lado frio e do lado quente da

placa. Atua também no inversor de frequência controlando a frequência e conseqüentemente a rotação de saída do ventilador, variando a vazão do ar quente. Assim, tem-se o controle das variáveis que influem no processo.

O quarto e último capítulo refere-se aos resultados, discussões e conclusões deste trabalho.

#### **1.4 REVISÃO DA LITERATURA.**

Em 1961, Heikes e Ure Jr fazem um estudo completo referente aos fenômenos termoelétricos e com muita precisão descrevem as equações que permitem o estudo e análise de um sistema de refrigeração termoelétrico, bem como análise de materiais e suas propriedades termoelétricas.

Em 1995, Göktun, estudando as considerações para o processo de um refrigerador termoelétrico, afirma que a transferência de calor numa taxa finita e perda de resistividade elétrica são necessariamente processos irreversíveis e inevitáveis num processo termoelétrico. É mostrado que as irreversibilidades interna e externa num refrigerador termoelétrico pode ser caracterizado por um parâmetro denominado processo-equipamento.

A presença deste parâmetro nas equações para efeito de refrigeração e máxima potência aplicada, mostra que um refrigerador real tem baixa capacidade de refrigeração e precisa mais potência que um refrigerador ideal.

Sofrata (1996) apresentou um estudo em que analisa desempenho de um refrigerador termoelétrico, com alternativas para retirar o calor rejeitado. Utilizou processo por ar forçado com ventilador e processo ventilação natural. A temperatura mínima do lado frio alcançada foi  $-3^{\circ}\text{C}$ . A diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio alcançada com ventilação natural foi de  $26^{\circ}\text{C}$  e com ventilação forçada variando a vazão do ar foi de  $14^{\circ}\text{C}$  a  $22^{\circ}\text{C}$ .

Böjic et al (1997) utilizaram em vagão de trem de passageiro um sistema de condicionamento de ar combinando equipamento de refrigeração termoelétrica e um aparelho de condicionamento de ar convencional por compressão de vapor para aumentar o coeficiente de desempenho. O sistema é descrito em termos de trocador de calor em linha. Analisando o comportamento do sistema através de *software* específico, concluíram que o uso do aparelho de condicionamento de ar convencional por compressão de vapor produz alto rendimento no sistema incrementando o coeficiente de desempenho do refrigerador termoelétrico.

Em 1998, Lindler apresentou um trabalho sobre o uso de multiestágios em cascata para o aumento do bombeamento de calor. Para refrigeração de componentes eletrônicos, a academia naval dos Estados Unidos propôs usar uma bomba de calor miniatura termoelétrica para manter um equipamento próximo de temperaturas constantes para obter leituras mais precisas. Verificou-se que o coeficiente de desempenho da bomba de calor decresce rapidamente com o aumento da diferença da temperatura. O estudo investiga uma potencial melhoria no desempenho da bomba de calor que pode ser obtida usando duas ou mais bombas de calor (associações termoelétricas) operando em série.

Huang e Duang (2000) apresentaram o desenvolvimento de um sistema de modelo dinâmico e de controle de temperatura de um refrigerador termoelétrico. Mostraram que o modelo dinâmico de um refrigerador termoelétrico tem dois pólos e um zero. O modelo linear é apresentado para variar em condições operante. Um sistema *realimentação* linear foi desenvolvido para controle da temperatura “fria” final comparando com a média linear do modelo dinâmico e uma estrutura de controle. As respostas nos testes mostraram que o controle teve uma eficácia satisfatória. Testes para avaliar a carga de refrigeração e temperatura ambiente foram feitas para analisar a propriedade distúrbio-rejeição do controlador. Resultados experimentais mostraram que a temperatura fria final pode ser

mantida num valor fixado com  $0,1^{\circ}\text{C}$  independente da variação da carga de refrigeração e condições do ambiente.

Em 2000, Huang et al apresentaram um modelo de refrigerador termoelétrico. O modelo matemático utiliza a curva de desempenho do modulo termoelétrico determinado experimentalmente. Um sistema de testes automático foi desenvolvido para ilustrar os testes. Os resultados dos testes de desempenho do modelo são usados para determinar as propriedades físicas e derivar uma relação empírica para desempenho do módulo. Estes resultados são utilizados no sistema de análise de um refrigerador termoelétrico usando um modelo de rede térmica. A resistência térmica do dissipador de calor é escolhida como um dos parâmetros na construção de um refrigerador. A simulação coincide com os dados experimentais usando um dissipador de ar frio com resistência térmica de  $0,2515^{\circ}\text{C/W}$ . O projeto ótimo de um refrigerador termoelétrico nas condições de coeficiente de eficácia ótimo pode ser feito tendo como base o máximo valor da capacidade de refrigeração ótima ou tendo a melhor tecnologia viável de um dissipador.

Chen et al (2002) apresentaram estudo que fizeram sobre modelos cíclicos em sistema de refrigeração termoelétrica de um estágio e dois estágios baseado em equilíbrio não-termodinâmico. Analisaram as expressões mais importantes sobre eficiência, sendo taxa de refrigeração, coeficiente de eficácia e potência aplicada. Com essas expressões o desempenho de um sistema termoelétrico com dois estágios é analisado. O máximo coeficiente de eficácia e a taxa de refrigeração são calculados, a estrutura interna do equipamento é otimizada e outras propriedades determinadas. Os resultados obtidos foram analisados e as vantagens dos refrigeradores de dois estágios são melhores que as dos refrigeradores de simples estágio.

Daí et al (2003) apresentaram resultado de uma experiência em que construíram um refrigerador termoelétrico alimentado por energia solar. Eles conseguiram uma temperatura entre 5° a 10°C e um coeficiente de eficácia de aproximadamente 0,3. Concluíram que o desempenho do sistema depende da isolamento térmica e da diferença da temperatura do lado frio e do lado quente do módulo termoelétrico. O refrigerador desenvolvido tem capacidade para conservar em temperaturas baixas, vacinas, comidas e bebidas em áreas remotas onde não há eletricidade.

Austin et al (2003) apresentaram um trabalho baseado no princípio de termosifão com mudança de fase, com o objetivo de otimizar a dissipação do calor e conseqüentemente obter um incremento no coeficiente de eficácia. Construíram um protótipo termosifão com resistência térmica de 0,110 K/W, dissipando calor de um módulo termoelétrico medindo 40 x 40mm. Construíram dois protótipos de refrigeradores domésticos, sendo um deles com o equipamento desenvolvido e outro com dissipadores de calor convencional. Os resultados obtidos mostraram que o uso do termosifão aumenta o coeficiente de desempenho em 32%.

Luo et al (2003) apresentaram estudo referente à ótima transferência de calor em área superficial para carga de refrigeração e otimização do coeficiente de eficácia de um refrigerador termoelétrico. A teoria termodinâmica de tempo finito é aplicada para análise e otimização do desempenho de um refrigerador termoelétrico composto de multi-elementos (multi-associações). Foi adotado área superficial de transferência de calor total de dois trocadores, a taxa de transferência de calor da área superficial dos trocadores e o coeficiente de desempenho foram otimizados maximizando a carga de refrigeração. Os autores indicam os resultados para servir de exemplo prático para análise e otimização de refrigeradores termoelétricos.

Kurosaki et al (2004) com um equipamento de medição de pulso ultra-sônico, estudaram e mediram as propriedades termoelétricas, como a resistividade elétrica, coeficiente de Seebeck e a condutividade térmica de uma amostra de liga tálio-antimônio-telúrio (TISbTe<sub>2</sub>) e verificaram que a resistividade elétrica é levemente alta e dependente da temperatura positiva. O coeficiente de Seebeck é positivo em toda a faixa de temperatura, mostrando o comportamento do semicondutor positivo. A condutividade térmica é relativamente baixa se comparada com o arranjo dos materiais termoelétricos. O valor máximo da figura de mérito ZT é 0,87 na temperatura de 715K.

## CAPÍTULO 2 O EFEITO TERMOELÉTRICO

O desenvolvimento matemático e as equações contidas neste capítulo são conforme Heikes e Ure Jr, 1961. A parte termodinâmica consultou-se Zerbini, E. J. e Simões, R. S. E. – Fundamentos da Termodinâmica Clássica - Tradução da 4ª edição americana.

Os efeitos termoelétricos a serem considerados no objeto em estudo, que são o efeito Joule, o efeito Seebeck e o efeito Peltier, bem como o efeito Thomson que é desprezível são descritos a seguir.

### 2.1 EFEITO JOULE

Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, calor é gerado. A intensidade deste efeito é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica e independe do sentido da corrente. O calor de Joule produzido é dado por:

$$Q_j = R.I^2 \quad (2.1)$$

A condução térmica resulta do fato que o gradiente de temperatura num material induz o calor a fluir na direção de menor temperatura. A taxa na qual este calor é conduzido por unidade de área é proporcional ao gradiente da temperatura e é dado por:

$$q = -k. \Delta T \quad (2.2)$$

### 2.2 EFEITO THOMSON

Quando em um condutor homogêneo, submetido a um gradiente de temperatura, flui uma corrente elétrica, calor é absorvido ou dissipado, em adição ao “calor Joule”. A diferença

entre o calor total dissipado ou absorvido e o calor Joule é chamado de “efeito Thomson”, dado por:

$$Q_T = \tau \cdot I \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

O coeficiente de Thomson é positivo quando o calor é absorvido pelo material e quando a corrente flui em direção à região de maior temperatura. Logo  $q_t > 0$  significa que o calor é absorvido da vizinhança.

### **2.3 EFEITO SEEBECK**

Descoberto por Thomas J. Seebeck em 1823, este fenômeno diz que quando um circuito composto por dois materiais diferentes, conforme apresenta a figura 2.1, se as duas junções entre os materiais são aquecidas a temperaturas diferentes, uma tensão  $V$  é gerada no circuito, isto devido a difusão de portadores livres da junção de alta temperatura para a junção de baixa temperatura. Esta tensão é diretamente proporcional a diferença de temperatura e é dada por:

$$V = \alpha \Delta T \quad (2.4)$$

Onde:

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre as junções,  $\Delta T = T_1 - T_0$

$\alpha$  é chamado de coeficiente de SEEBECK, expresso em  $V/^\circ C$ .

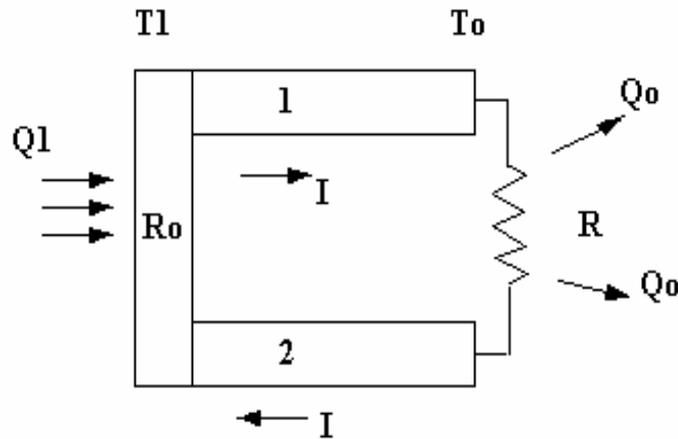


Fig. 2.1. Par termoelétrico genérico

$R$  pode ser qualquer consumidor de potência, como uma lâmpada ou um rádio, por exemplo.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \text{ expressa em [V}^\circ\text{C]}$$

onde  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são propriedades dos materiais do circuito e são as forças eletromotrizes que aparecem nos materiais 1 e 2 devido à diferença de temperatura de  $1^\circ\text{C}$  entre as extremidades.

A Força eletromotriz total gerada é dada por:

$$E = (\alpha_1 + \alpha_2)(T_1 - T_0) \quad (2.5)$$

A corrente que flui no circuito é:

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (2.6)$$

A Potência gerada:

$$W = V \cdot I = \frac{E^2 R}{(R + R_0)^2} \quad (2.7)$$

Substituindo as equações (2.4) e (2.5) em (2.6) tem-se a potência produzida no circuito:

$$W = (\alpha_1 + \alpha_2)^2 (T_1 - T_0)^2 \frac{R}{(R + R_0)^2} \quad (2.8)$$

A potência  $W$  torna-se máxima quando  $R = R_0$ , logo:

$$W_{\max} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 (T_1 - T_0)^2}{4R} \quad (2.9)$$

Para o maior desempenho, em detrimento da potência máxima  $R$  deve ser maior que  $R_0$ .

## 2.4 EFEITO PELTIER

Descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834, de acordo com este fenômeno, quando uma corrente elétrica e contínua flui na junção de dois materiais semicondutores de propriedades diferentes, calor é dissipado ou absorvido, e a direção de bombeamento de calor é revertida invertendo a polaridade da tensão aplicada. Parte é o “calor de Joule”, sempre dissipado, e é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica. Há uma parcela adicional de calor denominado “calor de Peltier”, é linear com a corrente e é o principal efeito referente a bombeamento de calor e refrigeração termoelétrica.

O calor de Peltier é dado por:

$$Q_p = -\pi \cdot I = -\alpha T I \quad (2.10)$$

Se o calor é absorvido pelo sistema a quantidade  $Q_p$  é positiva.

A junção quente absorve:

$$q_1 = \alpha T_1 I \quad (2.11)$$

A junção fria dissipa:

$$q_0 = \alpha \cdot T_0 \cdot I \quad (2.12)$$

As Figuras 2.2(a) e 2.2(b) a seguir mostram exemplos de um gerador e de um refrigerador termoelétrico respectivamente

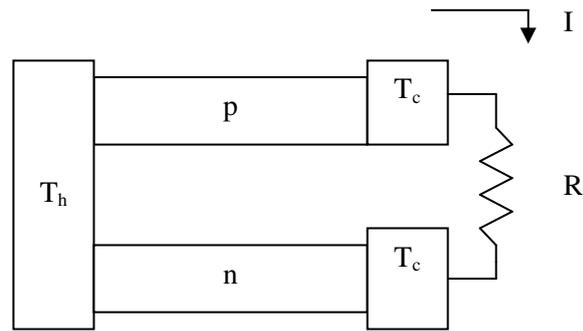


Figura 2.2(a) gerador termoelétrico (Efeito Seebeck)

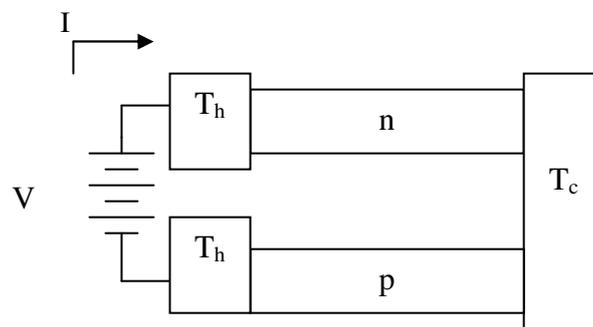


Figura 2.2(b) refrigerador termoelétrico (Efeito Peltier)

Os elementos  $T_h$  e  $T_c$  são fontes térmicas, os elementos **p** e **n** são chamados braços ou ramais. O elemento **p** normalmente tem um coeficiente de Seebeck absoluto positivo e o elemento **n** tem um coeficiente negativo.

Os braços são formados por materiais semicondutores tipo **p** e tipo **n**, circulando uma corrente contínua. Os materiais mais utilizados em sistemas de resfriamento termoelétrico é a liga Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), existem ligas de Telureto de Chumbo ( $\text{PbTe}$ ), Silício-Germânio ( $\text{SiGe}$ ) e Bismuto-Antimônio que encontram aplicação em situações específicas.

## 2.5 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

Para o desenvolvimento do modelo matemático que permite a análise de sistemas termoelétricos de refrigeração serão feitas inicialmente, as seguintes considerações:

- a - O sistema opera entre as temperaturas  $T_h$  e  $T_c$  dos reservatórios térmicos;

b - O isolamento térmico é perfeito, ou seja, calor é transferido somente através dos braços p e n\_e não há transferência de calor pelas superfícies laterais dos braços;

c - A resistência da junção é desprezível em comparação com a resistência volumétrica dos ramais;

d - Os braços tem seção transversal constante em todo o comprimento;

e - A resistividade elétrica  $\rho$ , a condutividade térmica  $k$  e o coeficiente de Seebeck dos materiais são independentes da temperatura.

### 2.5.1 EQUAÇÃO DIFERENCIAL PARA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM UMA BARRA

Considerando-se a seção infinitesimal de uma barra transportando uma corrente  $I$  em um gradiente de temperatura, conforme figura 2.3.

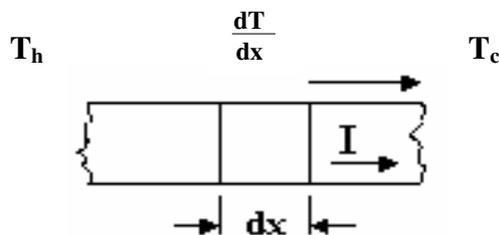


Figura 2.3 uma barra transportando uma corrente  $I$  em um gradiente de temperatura

A temperatura e a corrente são componentes na direção  $x$  somente, ou seja, paralelo ao eixo da barra.

Assim, da equação 2.2, o calor que entra no elemento  $dx$  pela face esquerda é:

$$q_e = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.13)$$

O calor que deixa o elemento através da face direita é:

$$q_s = -k \left[ \left( \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx \right] \quad (2.14)$$

O calor gerado por unidade de volume por efeito Joule é:

$$Q_j = I^2 \rho dx \quad (2.15)$$

O calor de Thomson é nulo uma vez que se assumiu coeficiente de Seebeck  $\alpha$  independente da temperatura.

Uma vez que o calor que sai do elemento é igual à soma do calor que entra com o calor gerado:

$$q_s = q_e + q_j \quad (2.16)$$

obtém-se:

$$q_s = -k \left( \frac{dT}{dx} \right) + I^2 \rho dx \quad (2.16.1)$$

$$k \left( \frac{d^2 T}{dx^2} \right) + I^2 \rho = 0 \quad (2.16.2)$$

Aplicando-se as seguintes condições de contorno,:

$$T = T_h \quad \text{para } x = 0$$

$$T = T_c \quad \text{para } x = L$$

A solução geral para a equação (2.16.2) é:

$$T + \frac{I^2 \rho x^2}{2k} + C_1 x + C_2 = 0 \quad (2.17)$$

Para  $x = 0$ ,  $T = T_h$ ;

$$C_2 = -T_h \quad (2.17.1)$$

e,

$$(T - T_h) + \frac{I^2 \rho x^2}{2k} + C_1 x = 0 \quad (2.17.2)$$

Quando  $x=L$ ,  $T=T_c$ :

$$-\Delta T + \frac{I^2 \rho L^2}{2k} + C_1 L = 0 \quad (2.17.3)$$

$$C_1 = \frac{\Delta T}{L} - \frac{I^2 \rho L}{2k} \quad (2.17.4)$$

Onde:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.18)$$

Substituindo-se as equações (2.17.4) e (2.17.1) na equação (2.17), tem-se:

$$T = \left[ T_h - \left( \frac{x}{L} \right) \Delta T \right] + \left( \frac{I^2 \rho}{2k} \right) x(L - x) \quad (2.19)$$

Que é a equação da distribuição de temperatura em uma barra transportando uma corrente elétrica I.

## 2.5.2 - TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA TÉRMICA POR $\alpha$ , $\rho$ E $k$ INDEPENDENTES DA TEMPERATURA

Para  $\alpha$ ,  $\rho$  e  $k$  independentes da temperatura, a energia térmica distribuída nos reservatórios no processo termoelétrico tem três componentes independentes:

O calor de Joule, a taxa de transferência de calor para corrente igual a zero e a taxa de absorção de calor de Peltier

Há dois termos independentes na equação 2.18 e conforme mostra a figura 2.4. O primeiro é responsável pela relação linear normal na ausência de corrente ( $I=0$ ). O segundo termo possui a forma parabólica que é causado pelo calor de Joule.

Na figura 2.4, a linha pontilhada mostra a distribuição para corrente igual a zero e com temperaturas diferentes nas extremidades, que representa o primeiro termo da equação 2.19, a linha tracejada e a cheia mostram a distribuição com corrente elétrica, mas com temperaturas iguais nas extremidades, segundo termo da equação 2.19.

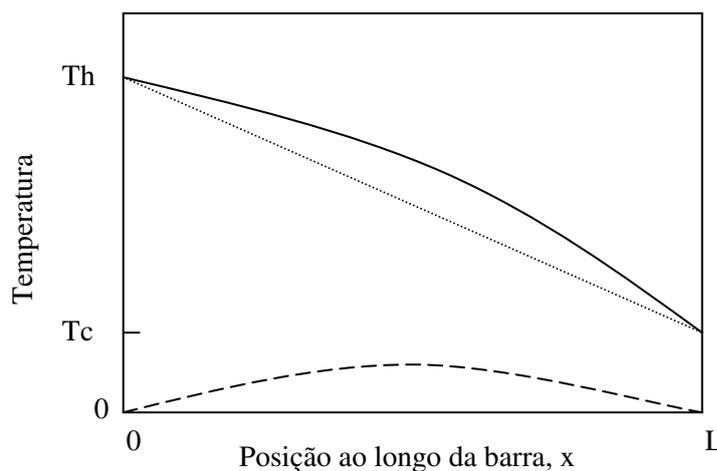


Figura 2.4 - Distribuição de temperatura em uma barra transportando uma corrente elétrica

O calor total que é absorvido ou dissipado na junção é a soma do calor Peltier desta junção mais o calor que entra ou sai dos braços conectados á junção.

O segundo termo é o calor conduzido por unidade de área e é proporcional ao gradiente temperatura.

O calor de joule gerado nos braços passa para a junção pelo processo de condução térmica e conseqüentemente é adicionado.

Deste modo, a taxa na qual o calor emerge da extremidade fria de uma barra de comprimento L e seção transversal A que transporta uma corrente I, será:

$$-AK \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = \gamma K \Delta T + \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{\gamma} \quad (2.20)$$

Onde  $\gamma = A/L$ .

A taxa na qual o calor entra na barra pela junção quente será:

$$-AK \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \gamma \cdot K \Delta T - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{\gamma} \quad (2.21)$$

O segundo termo mostra que exatamente a metade do calor de Joule produzido na barra vai para cada extremidade. Não é um resultado aproximado, mas é exatamente verdadeiro para o caso aqui considerado, onde  $\alpha$ ,  $\rho$  e  $k$  são independentes da temperatura. Isso é uma conseqüência da distribuição da temperatura, conforme equação 2.19 que tem dois termos independentes.

Em geral, a distribuição de temperatura não pode ser dividida em termos independentes conforme mostrado nesta seção.

Assim, a energia térmica transferida das fontes térmicas quente e fria em uma associação termoelétrica é a soma de três componentes:

a) O calor de Joule liberado de cada fonte térmica por unidade de tempo é:

$$Q_j = \frac{1}{2} I^2 R \quad (2.22)$$

onde;  $R = \left( \frac{\rho_n}{\gamma_n} \right) + \left( \frac{\rho_p}{\gamma_p} \right) \quad (2.22a)$

$\rho_n$  e  $\rho_p \rightarrow$  são as resistividades dos braços **n** e **p**, respectivamente e,

$\gamma_n$  e  $\gamma_p \rightarrow$  são as razões entre a área e o comprimento para os braços, A/L.

b) A taxa de transferência de calor para corrente igual a zero entre os dois reservatórios é

$K\Delta T$ , onde:

$$K = k_n \gamma_n + k_p \gamma_p \quad (2.23)$$

$k_n$  e  $k_p \rightarrow$  são as condutividades térmicas dos ramos **n** e **p**, respectivamente.

c) A taxa de absorção de calor de Peltier de cada reservatório é dada pela equação:

$$Q_p = - [\pi_{pr}(T) + \pi_{pn}(T)] I_{pn} = -\pi_{pn}(T) I_{pn} \quad (2.24)$$

Onde  $\pi_{pr}(T)$  é o coeficiente de Peltier na temperatura T da associação composta pelo material **p** e pelo material **n** da fonte térmica e  $I_{pn}$  é a corrente fluindo do ramo **p** ao ramo **n** na junção em questão. Da equação 2.10, isto pode ser escrito como:

$$-\pi_{pn}(T) I_{pn} = -T \alpha I_{pn} \quad (2.25)$$

OBS: O calor de Joule é o calor transferido da fonte térmica quente para a fria, em virtude da condutividade térmica do material e do gradiente de temperatura são fenômenos irreversíveis, que reduzem o desempenho do sistema.

## 2.6 - REFRIGERAÇÃO

Os parâmetros considerados importantes para a avaliação do desempenho de um sistema de refrigeração genérico são:

- a) coeficiente de desempenho  $\varphi$
- b) taxa de calor transferido
- c) máxima diferença de temperatura produzida

O coeficiente de desempenho  $\varphi$  é o quociente da taxa de remoção de calor do corpo frio dividido pela potencia aplicada ao circuito (HEIKES & URE JR., 1961), assim:

$$\varphi = \frac{Q_c}{P} \quad (2.26)$$

O coeficiente de desempenho dependerá da diferença de temperatura entre os corpos quente e frio que será maior com uma diferença de temperatura menor.

O “efeito refrigerante” ou taxa de bombeamento de calor é definido pela taxa de remoção de calor que é removido no corpo frio.

Para um dado par de materiais há uma diferença máxima de temperatura que um par termoelétrico produzirá, quando operando nesta máxima diferença de temperatura calor não é removido do corpo frio.

A taxa de bombeamento de calor do reservatório frio, conforme Heikes e Ure Jr., 1961, é dada pela soma dos três termos definidos anteriormente, ou seja, o calor de Joule liberado de cada corpo por unidade de tempo, a taxa de transferência de calor para corrente igual a zero entre os corpos quente e frio e a taxa de absorção de calor de Peltier de cada corpo:

$$q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (2.27)$$

No bombeamento de calor a direção positiva da corrente é de n para p na junção fria, como mostrado na figura 2.2.

Como a tensão nos terminais é calculada pela soma da tensão termoelétrica com a tensão Joule:

$$V = \alpha\Delta T \quad (\text{Tensão termoelétrica})$$

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

Tem-se:

$$V = \alpha\Delta T + IR \quad (2.28)$$

E a corrente é:

$$I = (V - \alpha\Delta T) / R \quad (2.29)$$

Então a potência fornecida pode ser calculada por:

$$P = VI \quad (2.30)$$

Introduzindo as equações 2.28 e 2.29 na equação 2.30, tem-se:

$$P = (\alpha\Delta T + IR)I = \alpha I\Delta T + I^2 R \quad (2.30.1)$$

e também;

$$P = V \left( \frac{V - \alpha\Delta T}{R} \right) \quad (2.30.2)$$

Assim;

$$P = VI = \alpha I\Delta T + I^2 R = \frac{V(V - \alpha\Delta T)}{R} \quad (2.31)$$

### 2.6.1 - COEFICIENTE DE DESEMPENHO

Das equações (2.26), (2.27) e (2.31), o coeficiente do par é termoelétrico é:

$$\varphi = \frac{\alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{(\alpha \Delta T + I^2 R)} \quad (2.32)$$

Introduzindo uma nova variável, ou seja, fazendo-se  $m = \frac{IR}{\alpha}$  e rearranjando os

termos, o coeficiente pode ser escrito:

$$\varphi = \frac{m T_c - \frac{1}{2} m^2 - \left( \frac{KR \Delta T}{\alpha^2} \right) K \Delta T}{(m \Delta T + m^2)} \quad (2.33)$$

Das equações 2.22 e 2.23, o produto da condutância térmica paralela e da resistência térmica em série é:

$$KR = (k_n \gamma_n + k_p \gamma_p) \left( \frac{\rho_n}{\gamma_n} + \frac{\rho_p}{\gamma_p} \right) \quad (2.34)$$

$$KR = k_n \rho_n + k_n \rho_p \left( \frac{\gamma_n}{\gamma_p} \right) + k_p \rho_n \left( \frac{\gamma_p}{\gamma_n} \right) + k_p \rho_p \quad (2.34.1)$$

Examinando-se as equações (2.33) e (2.34.1) nota-se que há duas variáveis que podem ser ajustadas para maximizar  $\varphi$ , essas variáveis são  $m$  e a razão  $(\gamma_n / \gamma_p)$ .

Desde que o coeficiente seja positivo, isto é maximizado pelo produto  $KR$  mínimo. O valor de  $(\gamma_n / \gamma_p)$  que satisfaz é obtido da derivada parcial de  $KR$  com relação a  $(\gamma_n / \gamma_p)$  e igualando o resultado a zero:

$$\frac{dKR}{d\left(\frac{\gamma_n}{\gamma_p}\right)} = k_n \rho_p \left( \frac{\gamma_n}{\gamma_p} \right)^2 - k_p \rho_n = 0 \quad (2.35)$$

$$\left(\frac{\gamma_n}{\gamma_p}\right)^2 = \frac{k_p \rho_n}{k_n \rho_p} \Rightarrow \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_p}\right) = \sqrt{\frac{k_p \rho_n}{k_n \rho_p}} \quad (2.35.1)$$

$$\left(\frac{\gamma_n}{\gamma_p}\right) = \left(\frac{k_p \rho_n}{k_n \rho_p}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.35.2)$$

E o valor de KR para essa condição será:

$$(KR)_{\min} = \left[ \sqrt{(\rho_n k_n)(\rho_p k_p)} \right]^2 \quad (2.36)$$

$$(KR)_{\min} = \left[ \sqrt{(\rho_n k_n)} + \sqrt{(\rho_p k_p)} \right]^2 \quad (2.36.1)$$

$$(KR)_{\min} = \left[ (\rho_n k_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p k_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (2.36.2)$$

O valor do coeficiente de desempenho com essa geometria é:

$$\varphi = \frac{\left[ mT_c - \frac{1}{2}m^2 - \left(\frac{\Delta T}{Z}\right) \right]}{(m\Delta T + m^2)} \quad (2.37)$$

onde Z é chamado de “FIGURA DE MÉRITO” do efeito Peltier do par termoelétrico e é dado por:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\left[ (\rho_n k_n)^{\frac{1}{2}} + (\rho_p k_p)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (2.38)$$

A expressão (2.38) pode ser decomposta em duas parcelas, permitindo identificar a Figura de Mérito para cada material:

$$Z_i = \frac{\alpha_i^2}{\rho_i k_i} \quad (2.38.1)$$

Para se deduzir o valor da corrente que maximiza o coeficiente de desempenho deriva-se a equação (2.32), e assim, igualando-se essa derivada a zero:

$$\frac{d\phi}{dI} = \frac{I(IR + \alpha\Delta T)(\alpha T_c - IR) - \left(\alpha T_c - \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T\right)(2IR + \alpha\Delta T)}{I^2(IR + \alpha\Delta T)} = 0 \quad (2.39)$$

$$(I^2R + \alpha\Delta T)(\alpha T_c - IR) = \left(\alpha T_c - \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T\right)(2IR + \alpha\Delta T) \quad (2.39.1)$$

Obtem-se uma quadrática em I:

$$R\alpha\left(\frac{\Delta T}{2} + T_c\right)I^2 - (2KR\Delta T)I - (K\alpha\Delta T^2) = 0 \quad (2.39.2)$$

A solução para I:

$$I = \frac{2KR\Delta T \pm \sqrt{(2KR\Delta T)^2 + 4KR\alpha^2\Delta T^2\left[\left(\frac{\Delta T}{2}\right) + T_c\right]}}{2R\alpha\left[\left(\frac{\Delta T}{2}\right) + T_c\right]} \quad (2.39.3)$$

Nota-se que o valor do radical sempre ultrapassará o valor  $2KR\Delta T$ , porque contém  $(2KR\Delta T)^2$  mais alguns outros números positivos. Para garantir refrigeração não se deve ter corrente negativa, assim ignora-se o caso onde se subtrai o valor do radical.

Assim para refrigeração, na equação (2.39.3) dividindo-se o radical por  $4(KR)^2\Delta T^2$ , tem-se:

$$I = \frac{2KR\Delta T + 2KR\Delta T\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha^2}{KR}\right)\left[\left(\frac{\Delta T}{2}\right) + T_c\right]}}{R\alpha\left[\left(\frac{\Delta T}{2}\right) + T_c\right]} \quad (2.40)$$

Sendo  $\left(\frac{\alpha^2}{KR}\right) = Z$  e:

$$\frac{\Delta T}{2} + T_c = \frac{T_h - T_c}{2} + T_c = \frac{T_h + T_c}{2}$$

Substituindo na equação (2.40) e adequando-se os termos, tem-se;

$$I = \frac{K\Delta T}{\alpha} \left\{ \frac{1 + \sqrt{1 + Z \left[ \left( \frac{T_h + T_c}{2} \right) \right]}}{\frac{1}{2}(T_h + T_c)} \right\} \quad (2.41)$$

Esta expressão pode ser ajustada multiplicando por:

$$I = \frac{R\alpha}{R\alpha} \left( \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1} \right) = 1 \quad (2.42)$$

Assim obtém-se:

$$I = \frac{KR\alpha\Delta T}{R\alpha^2} \left( \frac{1 + \sqrt{1 + Z\bar{T}}}{\bar{T}} \right) \left( \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1} \right) \quad (2.42.1)$$

e com  $1/Z\bar{T} = KR/\alpha^2$ , adequando-se os termos da equação (2.42.1):

$$I = \frac{\alpha\Delta T}{R} \left[ \frac{Z\bar{T}}{Z\bar{T} \left( \sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1 \right)} \right] \quad (2.42.2)$$

E a equação para a corrente que maximiza (corrente ótima) o coeficiente de desempenho é:

$$I = \frac{\alpha\Delta T}{R \left( \sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1 \right)} \quad (2.43)$$

$\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2}$  é a temperatura média da junção.

Fazendo  $w = \left(1 + Z\bar{T}\right)^{\frac{1}{2}}$ , tem-se a equação final para a corrente que maximiza o coeficiente de desempenho:

$$I = \frac{\alpha\Delta T}{R(w-1)} \quad (2.44)$$

Para obter o coeficiente de desempenho máximo (ótimo)  $\phi_{\max}$  em termos de temperatura e da figura de mérito  $Z$ , inserindo-se a equação (2.43) da corrente ótima na equação (2.32) do coeficiente de desempenho.

Fazendo-se  $w = \sqrt{1 + Z/2(T_h + T_c)}$  e conseqüentemente  $Z = \frac{2(w^2 - 1)}{(T_h + T_c)}$

$$\phi_{\max} = \frac{\alpha T_c \left[ \frac{\alpha\Delta T}{R(w-1)} \right] - \frac{1}{2} \left[ \frac{\alpha\Delta T}{R(w-1)} \right]^2 R - K\Delta T}{\frac{\alpha\Delta T}{R(w-1)} \left\{ \alpha\Delta T + \left[ \frac{\alpha\Delta T}{R(w-1)} \right] R \right\}} \quad (2.45)$$

$$\phi_{\max} = \frac{\frac{\alpha^2 \Delta T^2}{R(w-1)^2} (w-1) \frac{T_c}{\Delta T} - \frac{1}{2} - \frac{KR(w-1)^2}{\alpha^2 \Delta T}}{\frac{\alpha^2 \Delta T^2 w}{R(w-1)^2}} \quad (2.45.1)$$

Fazendo-se  $\frac{KR}{w^2} = \frac{1}{Z} = \left[ \frac{T_h - T_c}{2(w^2 - 1)} \right]$  e substituindo-se no termo entre parênteses da equação

(2.45.1) no numerador e simplificando os termos, obtem-se:

$$\phi_{\max} = \frac{1}{w} \left[ (w-1) \frac{T_c}{\Delta T} \right] - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{(w-1)^2}{(w^2 - 1)} \left( \frac{T_h + T_c}{\Delta T} \right) \quad (2.46)$$

Sendo  $\frac{(w-1)^2}{(w^2 - 1)} = \left( \frac{w-1}{w+1} \right)$  e, após dividir a equação (2.46) por  $\frac{T_c}{\Delta T}$ , tem-se:

$$\phi_{\max} = \frac{T_c}{w\Delta T} \left[ (w-1) - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_c} - \frac{1}{2} \left( \frac{w-1}{w+1} \right) \left( \frac{T_h + T_c}{\Delta T} \right) \right] \quad (2.47)$$

ou,

$$\varphi_{\max} = \frac{T_c}{w\Delta T} \left[ (w-1) - \frac{1}{2} \frac{T_h}{T_c} - 1 \left( \frac{w-1}{w+1} \right) \left( \frac{T_h}{T_c} + 1 \right) \right] \quad (2.47.1)$$

Achando-se o denominador comum, a equação (2.47.1) resulta:

$$\varphi_{\max} = \frac{T_c}{w\Delta T} \left\{ \frac{(2w-1)(w+1) - \left[ \left( \frac{T_h}{T_c} - 1 \right) \right] - (w-1) \left[ \left( \frac{T_h}{T_c} + 1 \right) \right]}{2(w+1)} \right\} \quad (2.48)$$

Simplificando-se a equação (2.48) obtem-se a equação do coeficiente de desempenho ótimo:

$$\varphi_{\max} = \frac{T_c}{\Delta T} \left[ \frac{w - \left( \frac{T_h}{T_c} \right)}{(w+1)} \right] \quad (2.49)$$

Assim, o máximo coeficiente de desempenho depende somente das propriedades dos materiais através da figura de mérito Z.

A tensão resultante do fluxo da corrente ótima que maximiza o coeficiente é calculada substituindo-se a equação (2.44) em (2.28):

Assim obtem-se:

$$V = \frac{\alpha \Delta T w}{(w-1)} \quad (2.50)$$

A tensão é independente da geometria da associação termoeétrica, substituindo-se a equação (2.50) na equação (2.31), obtem-se a potência:

$$P = \frac{\frac{\alpha \Delta T w}{(w-1)} \left( \frac{\alpha \Delta T w}{(w-1)} - \alpha \Delta T \right)}{R} \quad (2.51)$$

Assim;

$$P = \left(\frac{w}{R}\right) \left[ \frac{\alpha \Delta T}{(w-1)} \right]^2 \tag{2.52}$$

A figura 2.5 abaixo, mostra o coeficiente de desempenho como função de  $Z\bar{T}$  para vários valores de  $\bar{T}$  ( $T_h / T_c$ ).

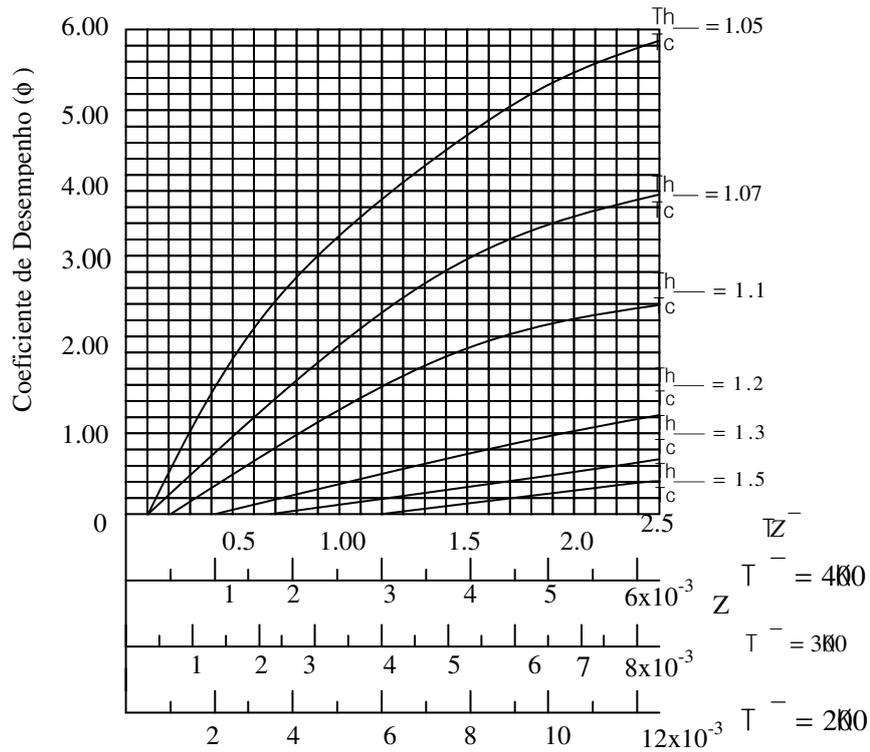


Figura 2.5 - Coeficiente de desempenho de uma associação termoeétrica em função de  $Z\bar{T}$  ou de  $Z$  para três valores particulares de  $\bar{T}$  (HEIKES & URE JR., 1961).

A tensão aplicada é facilmente calculada através da figura 2.6.

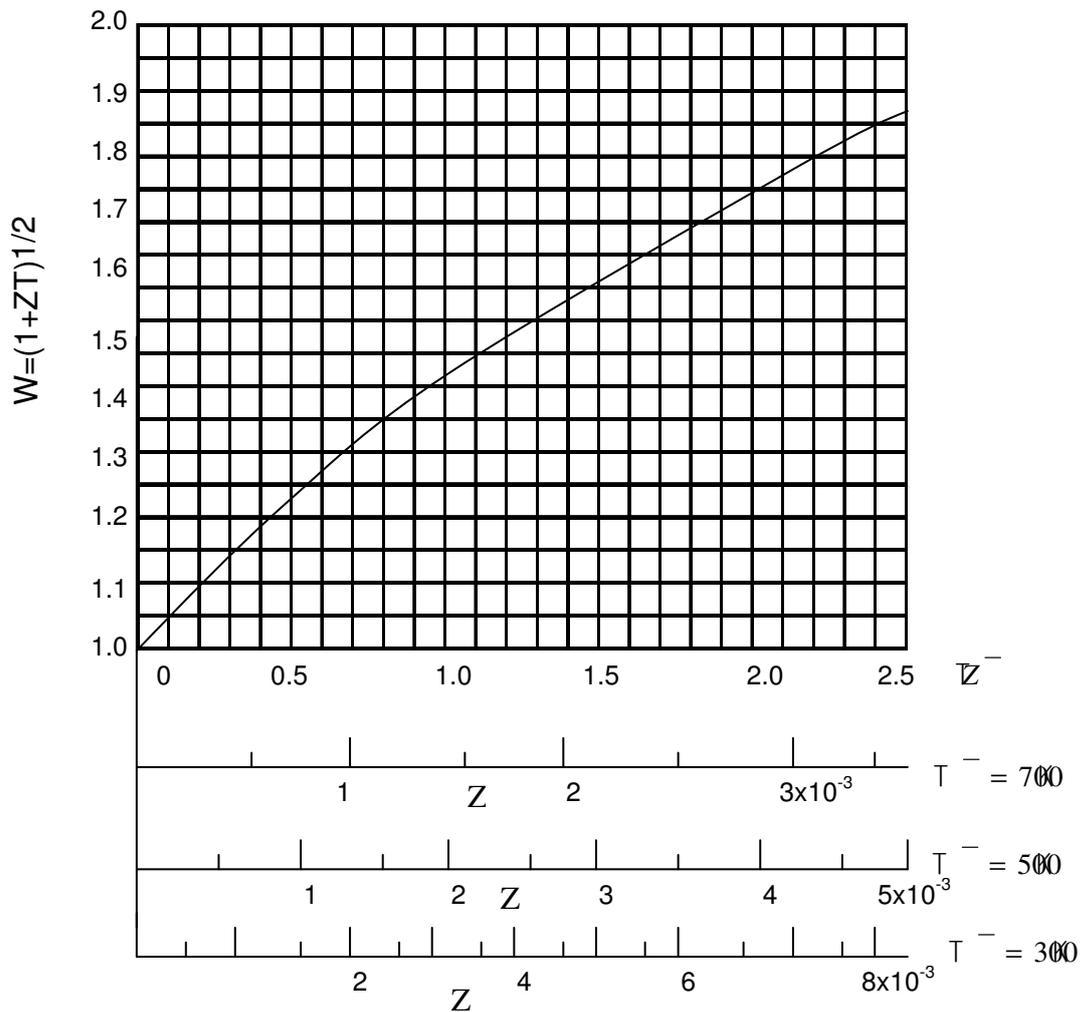


Figura 2.6 - Valores de  $w = (1 + Z\bar{T})^{1/2}$  como função de  $Z\bar{T}$  ou de  $Z$  para três valores particulares de  $\bar{T}$  (HEIKES & URE JR, 1961).

## 2.6.2 - TAXA DE BOMBEAMENTO DE CALOR COM COEFICIENTE DE DESEMPENHO MAXIMIZADO

A taxa de bombeamento de calor quando os parâmetros são ajustados para maximizar o coeficiente de desempenho é calculada por (2.27) ou através da equação da potência fornecida (consumida) (2.30.1) e o coeficiente de desempenho pela equação (2.49).

Em cada caso é necessário ter os valores da resistência elétrica  $R$ .

Quando a taxa de bombeamento tem o valor que vem da equação (2.35.2) e considerando-se a equação (2.22a) a equação da resistência elétrica  $R$  é dada por:

$$R = \left( \frac{\alpha}{Z^{\frac{1}{2}}} \right) \left( \frac{1}{\gamma_p} \right) \left( \frac{\rho_p}{k_p} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{\alpha}{Z^{\frac{1}{2}}} \right) \left( \frac{1}{\gamma_n} \right) \left( \frac{\rho_n}{k_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.53)$$

e a condutância térmica paralela, considerando-se a equação (2.23) é dada por:

$$K = \left( \frac{\alpha}{Z^{\frac{1}{2}}} \right) \gamma_p \left( \frac{k_p}{\rho_p} \right) = \left( \frac{\alpha}{Z^{\frac{1}{2}}} \right) \gamma_n \left( \frac{k_n}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.54)$$

Deste modo, considerando as equações (2.44) e (2.53), a corrente que maximiza o coeficiente de desempenho torna-se:

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{\left( \frac{\alpha}{Z^{\frac{1}{2}}} \right) \left( \frac{1}{\gamma_n} \right) \left( \frac{\rho_n}{K_n} \right)^{\frac{1}{2}} (w-1)} \quad (2.55)$$

$$I = \gamma_p \left( \frac{K_p}{\rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{\Delta T Z^{\frac{1}{2}}}{(w-1)} \right] \quad (2.55.1)$$

As três equações anteriores fornecem a resistência, a condutância térmica e a corrente em função de  $\gamma$  (A/L) para um dos elementos apenas, p ou n.

Quando **p** e **n** tem o mesmo comprimento, ou seja,  $L_n = L_p = L$  e sendo a área da seção transversal total  $A_T$ , onde:

$$A_T = A_n + A_p \quad (2.56)$$

e considerando a equação (2.35.2) e  $\gamma = \frac{A}{L}$ , obtem-se as áreas dos elementos:

$$A_p = \frac{A_T (\rho_p k_n)^{\frac{1}{2}}}{\left[ (\rho_p k_n)^{\frac{1}{2}} + (k_p \rho_n)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (2.57)$$

$$A_n = \frac{A_T (\rho_n k_p)^{1/2}}{\left[ (\rho_p k_n)^{1/2} + (k_p \rho_n)^{1/2} \right]} \quad (2.58)$$

Em conseqüência, considerando-se as equações (2.56), (2.57) e (2.58) e  $R = \left( \frac{\rho L}{A} \right)$ ,

obtem-se a resistência R:

$$R = \left( \frac{L}{A_T} \right) \left\{ \frac{(\rho_p k_n)^{1/2}}{\left[ (\rho_p k_n)^{1/2} + (k_p \rho_n)^{1/2} \right]} + \frac{\left[ (\rho_p k_n)^{1/2} + (k_p \rho_n)^{1/2} \right]}{(\rho_n k_p)^{1/2}} \right\} \quad (2.59)$$

$$R = \left( \frac{L}{A_T} \right) \left\{ \rho_n + \rho_p + (\rho_n \rho_p)^{1/2} \left[ \left( \frac{k_n}{k_p} \right)^{1/2} + \left( \frac{k_p}{k_n} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2.59.1)$$

onde:  $L = L_p = L_n$

Uma aproximação adequada para um cálculo estimativo reduz (2.59) para:

$$R = \left( \frac{2L}{A_T} \right) (\rho_n + \rho_p) \quad (2.60)$$

Se  $0,1k_n \leq k_p \leq 10 k_n$  e  $0,1\rho_n \leq \rho_p \leq 10\rho_n$ , o erro usando a equação (2.60) no lugar da equação(2.59) é menor que 40%.

Para  $0,25 k_n \leq k_p \leq 4 k_n$  e  $0,25\rho_n \leq \rho_p \leq 4\rho_n$ , o erro é menor que 12%.

Assim, o procedimento para calcular a taxa de bombeamento de calor é obter o coeficiente de desempenho por (2.49) ou através da consulta à figura 2.5. A resistência é calculada pelas equações (2.53), (2.59) ou (2.59.1) e a potência fornecida (consumida) é calculada pela equação (2.52). A taxa de bombeamento de calor é dada pela equação (2.26).

Na figura 2.7 o coeficiente de desempenho, a taxa de bombeamento de calor e a potência fornecida de um refrigerador típico são mostrados como função da diferença de

temperatura. É assumido que para cada temperatura ( $\Delta T$ ) a tensão aplicada é ajustada para maximizar o coeficiente.

Quando a diferença de temperatura diminui o coeficiente de desempenho tende a um valor máximo. A taxa de bombeamento de calor inicia em zero atinge um valor máximo e depois diminui quando a diferença de temperatura aumenta. Pode ser visto que a taxa de bombeamento de calor será pequena para pequenas diferenças de temperatura. Porém deve ser lembrado que os parâmetros devem ser ajustados para maximizar o coeficiente de desempenho. Quando a diferença de temperatura se aproxima de zero, a potência equação (2.52) que maximiza o coeficiente de eficácia se aproxima de zero e conseqüentemente a taxa de bombeamento de calor também se aproxima de zero. Da equação 2.49, obtém-se o coeficiente máximo quando a diferença de temperatura tende a zero.

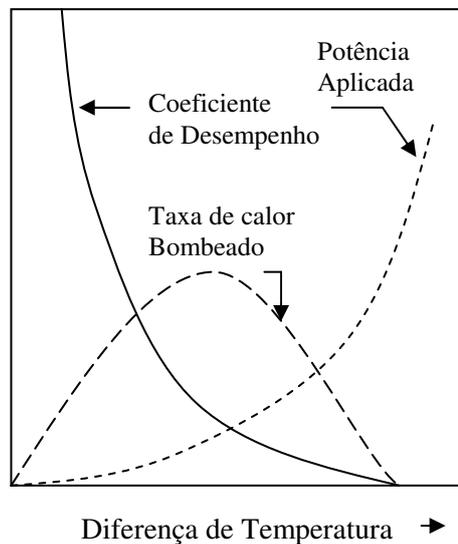


Figura 2.7 - Desempenho de uma associação termoelétrica em função da diferença de temperatura (HEIKES & URE JR, 1961).

A figura 2.8 mostra o coeficiente de desempenho e a taxa de bombeamento de calor como função da corrente para diferença de temperatura  $\Delta T$  e  $\gamma$  constantes.

Para máxima taxa de bombeamento de calor o coeficiente é bem pequeno, em algumas aplicações, isto é importante para se conseguir uma boa taxa de bombeamento de calor.

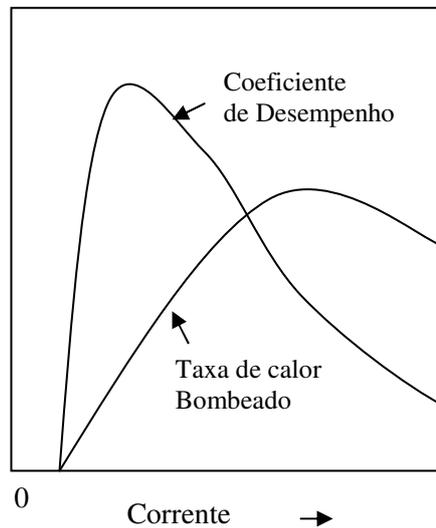


Figura 2.8 - Coeficiente de desempenho e taxa de bombeamento de calor em função da corrente (HEIKES & URE JR, 1961).

### 2.6.3 MÁXIMA TAXA DE BOMBEAMENTO DE CALOR

Fazendo-se a derivada da taxa de transferência de calor com relação a  $I$  e igualando a zero, determina-se qual é a corrente que maximiza a taxa de bombeamento de calor.

Da equação (2.29), a corrente que satisfaz a condição  $\frac{dq}{dI} = 0$  :

$$\frac{dq}{dI} = \alpha T_c - IR \quad (2.61)$$

$$I = \frac{\alpha T_c}{R} \quad (2.61.1)$$

Da equação (2.28) a tensão modifica-se para:

$$V = \alpha T_h \quad (2.62)$$

e a taxa de bombeamento para essa corrente será calculada por:

$$Q_c = \alpha \left( \frac{\alpha T_c}{R} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha T_c}{R} \right)^2 - K \Delta T \quad (2.63)$$

$$Q_c = \left( \frac{\alpha^2 T_c^2}{2R} \right) - K \Delta T \quad (2.63.1)$$

onde:  $\mathbf{R}$  e  $\mathbf{K}$  são dadas pelas equações (2.22a) e (2.23).

O objetivo em um projeto de refrigeração com a máxima taxa de bombeamento de calor é obter junção com tamanho ou peso mínimos, ou ainda, uma quantidade de material termoelétrico requerido mínimo. Assim, a área da seção transversal  $A_T = A_n + A_p$ , deve ser a menor possível. Conseqüentemente o termo que será maximizado é  $\left( \frac{q_c}{A_T} \right)$ . O tamanho, peso e quantidade de material podem ser minimizados, se for escolhido um valor pequeno de  $\mathbf{L}$ .

Fazendo-se a divisão da equação 58 pela equação 57, obtém-se:

$$\frac{A_n}{A_p} = \frac{\rho_n B + \left\{ \left( \frac{\rho_n}{\rho_p} \right) \left[ 1 + B(\rho_n - \rho_p) \right] \right\}^{1/2}}{1 - B \rho_p} \quad (2.64)$$

onde:

$$B = \frac{2(k_p - k_n) \Delta T}{\alpha^2 T_c^2} \quad (2.64.1)$$

A taxa de bombeamento de calor será:

$$Q_c = \left( \frac{1}{L} \right) \left\{ \frac{\alpha^2 T_c^2}{2 \left[ \left( \frac{\rho_n}{A_n} \right) + \left( \frac{\rho_p}{A_p} \right) \right]} - \Delta T (A_n k_n + A_p k_p) \right\} \quad (2.65)$$

Das equações (2.61.1) e (2.62) a potência fornecida será:

$$P = \left[ (\alpha T_h) \left( \frac{\alpha T_c}{R} \right) \right] \quad (2.66)$$

$$P = \frac{\alpha^2 T_h T_c}{R} \quad (2.66.1)$$

Uma estimativa preliminar pode ser feita tomando-se  $\bar{\rho} = \frac{1}{2}(\rho_n + \rho_p)$  e  $\bar{K} = \frac{1}{2}(k_n + k_p)$ .

Assim:

$$Q_c \cong \left( \frac{A_r}{L} \right) \left[ \frac{(\alpha^2 T_c^2)}{8\rho} \right] - \bar{K} \Delta T \quad (2.67)$$

#### 2.6.4 - MÁXIMA DIFERENÇA DE TEMPERATURA

Partindo-se da equação (2.63.1) é possível mostrar que a máxima diferença de temperatura que um refrigerador termoelétrico é capaz de produzir é dada por:

$$\Delta T = \frac{\alpha^2 T_c^2}{2RK} \quad (2.68)$$

Isto ocorre quando a junção fria é termicamente isolada, ou seja,  $q = 0$ .

Conforme Heikes e Ure Jr, 1961, essa expressão pode ser maximizada através da busca de um

valor mínimo para  $KR$ , das equações (2.35.2) e (2.68) e,  $Z = \frac{\alpha^2}{KR}$ , tem-se

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 T_c^2}{KR} \quad (2.69)$$

Logo:

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} Z T_c^2 \quad (2.69.1)$$

Na junção, a temperatura mínima da parte fria, para uma temperatura da parte quente conhecida pode ser calculada por:

$$T_c = \left[ \frac{(1 + 2ZT_h)^{1/2} - 1}{Z} \right] \quad (2.70)$$

### 2.6.5 - RESISTÊNCIA DE CONTATO

Outro parâmetro importante em muitas aplicações é o volume de material termoelétrico requerido. Deve-se sempre procurar reduzir o volume de material, utilizando os menores elementos possíveis e, quando isto ocorre, os efeitos da resistência de contato devem ser levados em conta.

Assumindo-se que a resistência de contato nas duas junções seja:

$$R_c = \left( \frac{r_n}{A_n} \right) + \left( \frac{r_p}{A_p} \right) \quad (2.71)$$

onde  $r_n$  e  $r_p$  são independentes da área de contato e que a resistência de contato na junção quente seja a mesma que a da junção fria, a resistência dos dois ramais em série pode ser calculada por:

$$R = \left( \frac{\rho_n}{\gamma_n} \right) + \left( \frac{\rho_p}{\gamma_p} \right) + 2 \left[ \frac{r_n}{A_n} + \frac{r_p}{A_p} \right] \quad (2.72)$$

$$\text{e sendo } \gamma_n = \frac{A_n}{L_n} \Rightarrow A_n = \gamma_n \cdot L_n \text{ e } \gamma_p = \frac{A_p}{L_p} \Rightarrow A_p = \gamma_p \cdot L_p \quad (2.73)$$

$$R = \left[ \left( \frac{\rho_n}{\gamma_n} \right) + \frac{2}{\gamma_n} \left( \frac{r_n}{L_n} \right) \right] + \left[ \left( \frac{\rho_p}{\gamma_p} \right) + \frac{2}{\gamma_p} \left( \frac{r_p}{L_p} \right) \right] \quad (2.73.1)$$

$$R = \left(\frac{1}{\gamma_n}\right) \left[ \rho_n + 2 \left( \frac{r_n}{L_n} \right) \right] + \left(\frac{1}{\gamma_p}\right) \left[ \rho_p + 2 \left( \frac{r_p}{L_p} \right) \right] \quad (2.73.2)$$

Assim todas as fórmulas anteriormente deduzidas para o caso de resistência de contato nulas podem ser utilizadas, considerando-se agora uma resistividade aparente  $\rho'$ , definida por:

$$\rho' = \rho + 2 \left( \frac{r}{L} \right) \quad (2.74)$$

## 2.6.6 - SISTEMAS COM MULTI-ASSOCIAÇÕES

Em uma associação simples de elementos termelétricos a máxima diferença de temperatura pode ser calculada por (2.69.1). Empregando-se uma segunda associação para esfriar a junção quente da primeira associação é possível obter uma diferença de temperatura maior. Este processo pode ser repetido para  $n$  estágios termicamente associados em série. O conjunto denomina-se refrigerador em cascata.

Em um refrigerador de dois estágios onde o primeiro estágio contém a carga de refrigeração  $q_1$  na temperatura  $T_{c1}$ . O calor gerado no primeiro estágio, que ocorre na temperatura  $T_{h1}$  é somado à carga de refrigeração  $q_1$  e a potência fornecida é  $P_1$ .

Para o primeiro estágio o calor bombeado do reservatório frio é:

$$q_1 = \alpha T_{c1} I_1 - \frac{1}{2} I_1^2 R_1 - K_1 \Delta T_1 \quad (2.75)$$

onde,  $\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1}$

A potência é dada por:

$$P_1 = \alpha I_1 \Delta T_1 + I_1^2 R_1 \quad (2.76)$$

O coeficiente de desempenho  $\phi_1$  é dado por:

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{P_1} \quad (2.77)$$

Na ausência de perdas, a temperatura da junção quente do primeiro estágio será igual a temperatura da junção fria do segundo estágio,  $T_{h1} = T_{c2}$

Para o segundo estágio o calor bombeado do corpo frio é:

$$q_2 = q_1 + P_1 = \alpha T_{c2} I_2 - \frac{1}{2} I_2^2 R_2 - K_2 \Delta T_2 \quad (2.78)$$

onde,  $\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c2}$

A potência será:

$$P_2 = \alpha I_2 \Delta T_2 + I_2^2 R_2 \quad (2.79)$$

e o coeficiente de eficácia  $\varphi_2$  é dado por:

$$\varphi_2 = \frac{q_2}{P_2} = \frac{q_1 + P_1}{P_2} \quad (2.80)$$

O coeficiente de eficácia total para refrigerador de dois estágios pode ser representado por:

$$\varphi = \frac{q_1}{P_1 + P_2} \quad (2.81)$$

Para n estágios onde i-énésimo estágio tem temperatura da junção quente  $T_{hi}$ , temperatura da junção fria  $T_{ci}$ , capacidade de bombeamento de calor  $q_i$  e potência  $P_i$ , pode ser escrito:

$$T_{c,i+1} = T_{h,i} \quad i = 1,2,3,\dots \quad (2.82)$$

$$q_{i+1} = q_i + P_i \quad i = 1,2,3,\dots \quad (2.83)$$

$$\varphi_i = \frac{q_i}{P_i} \quad i = 1,2,3,\dots \quad (2.84)$$

e,

$$\varphi = \frac{q_1}{\sum_{i=n} P_i}$$

e da equação (2.83) verifica-se que,

$$q_{i+1} = q_i + P_i = qi \left( 1 + \frac{P_i}{q_i} \right) = qi \left( 1 + \frac{1}{\varphi_i} \right) \quad (2.85)$$

e para  $q_{i+2}$ :

$$q_{i+2} = q_{i+1} + P_{i+1} = q_{i+1} \left( 1 + \frac{P_{i+1}}{q_{i+1}} \right) \quad (2.86)$$

$$q_{i+2} = q_{i+1} \left( 1 + \frac{1}{\varphi_{i+1}} \right) \quad (2.86.1)$$

$$q_{i+2} = q_i \left( 1 + \frac{1}{\varphi_i} \right) \left( 1 + \frac{1}{\varphi_{i+1}} \right) \quad (2.86.2)$$

e finalmente para n estágios pode-se escrever:

$$q_n = q_{n-1} + p_{n-1} = q_{n-1} \left( 1 + \frac{p_{n-1}}{q_{n-1}} \right) = q_{n-1} \left( 1 + \frac{1}{\varphi_{n-1}} \right) \quad (2.86.3)$$

onde  $q_n$  pode ser representado em termos de coeficiente de eficácia de todos os estágios anteriores e a carga de refrigeração  $q_1$ .

Para a cascata total tem-se:

$$q_n = q_1 \left( 1 + \frac{1}{\varphi_1} \right) \left( 1 + \frac{1}{\varphi_2} \right) \left( 1 + \frac{1}{\varphi_{n-1}} \right) \quad (2.87)$$

Mas a capacidade de bombeamento de calor de n estágios pode ser representada pela soma da carga de refrigeração  $q$  e a potencia total consumida por todos os estágios;

$$\sum P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (2.88)$$

Assim, tem-se:

$$q_n = q_1 + \sum P = q_1 \left( 1 + \frac{\sum P}{q_1} \right) = q_1 \left( 1 + \frac{1}{\varphi} \right) \quad (2.89)$$

onde  $\varphi$  é o coeficiente de desempenho para toda a cascata.

As equações (2.87) e (2.89), podem ser igualadas:

$$q_1 \left( 1 + \frac{1}{\varphi} \right) = q_1 \left( 1 + \frac{1}{\varphi_1} \right) \left( 1 + \frac{1}{\varphi_2} \right) \left( 1 + \frac{1}{\varphi_{n-1}} \right) \quad (2.90)$$

Conseqüentemente,

$$\left( 1 + \frac{1}{\varphi} \right) = \prod_{i=1}^n \left( 1 + \frac{1}{\varphi_i} \right) \quad (2.91)$$

Assim, conforme Heikes e Ure Jr, 1961, o coeficiente de eficácia para n estágios pode ser calculado por:

$$\varphi = \frac{1}{\prod_{i=1}^n \left( 1 + \frac{1}{\varphi_i} \right) - 1} \quad (2.92)$$

ou

$$\varphi = \left[ -1 + \prod_{i=1}^n \left( 1 + \frac{1}{\varphi_i} \right) \right]^{-1} \quad (2.93)$$

É possível demonstrar que o coeficiente de eficácia alcança um valor máximo se as temperaturas intermediárias forem ajustadas de forma que:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_n$$

A figura 2.9 mostra um refrigerador de 3 estágios tendo 3 associações no 2º estágio e 6 no 3º estágio. Todas as associações estão eletricamente em série

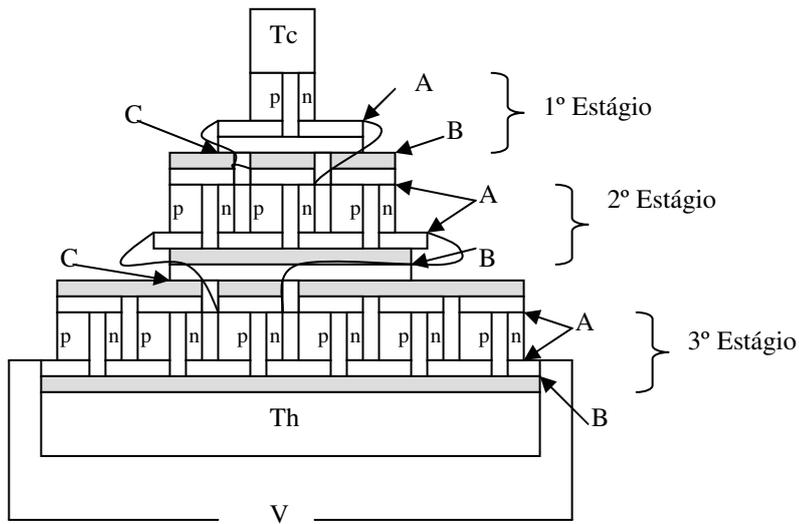


Figura 2.9 - Refrigerador de 3 estágios tendo 3 associações no 2º estágio e 6 no 3º estágio.

B → isolante elétrico

C → material com alta condutividade térmica

É desejável colocar os estágios eletricamente em série para manter a tensão aplicada em valores razoáveis e manter a corrente baixa. Para isto, cada estágio deverá consistir de um número de associações em paralelo.

Para as associações eletricamente em série e termicamente em paralelo teremos:

Tensão aplicada:  $V_n = n.V$

Corrente:  $I_n = I$

Potência fornecida:  $P_n = n.P$

Calor removido:  $Q_n = n.Q$

Onde  $n$  é o número de associações

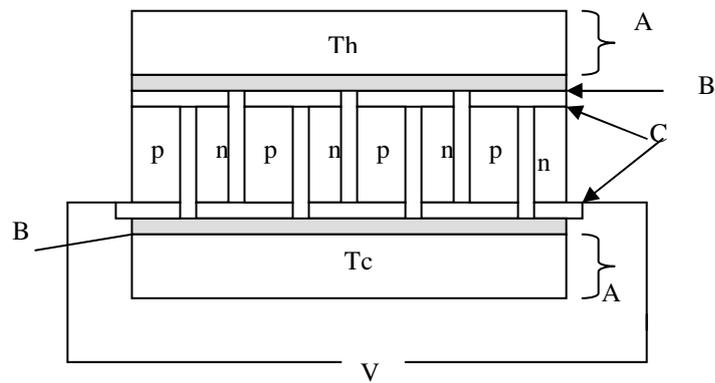


Figura 2.10 - Dispositivo termoelétrico de simples estágio composto de 4 associações termicamente em paralelo e eletricamente em série.

A → fontes térmicas quente e fria

B → isolante elétrico com alta condutividade térmica para que as pontes C tenham a mesma temperatura dos reservatórios térmicos adjacentes.

## **CAPÍTULO 3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

### **3.1 - EQUIPAMENTO TERMOELÉTRICO EXPERIMENTAL PARA CONDICIONAMENTO DE AR**

Para análise do modelo matemático apresentado no capítulo dois, com o objetivo de avaliar o desempenho de um sistema para condicionamento de ar, foi construído um equipamento termoelétrico experimental (ver fluxograma figura 3.1).

Neste equipamento é possível o monitoramento das temperaturas do lado quente e do lado frio do módulo termoelétrico, das temperaturas de entrada e das temperaturas do lado quente e do lado frio, da vazão de ar dos dois lados, frio e quente, da tensão e corrente aplicadas no módulo. Com esses dados é possível obter e analisar o desempenho do sistema, verificar a potência, a tensão e a corrente para maximizar o coeficiente de desempenho.

Neste trabalho experimental o ar é canalizado em duto e direcionado em pontos específicos.

Para aquisição de dados de temperatura, utilizou-se termopares tipo J, conversor analógico/digital placa de aquisição de dados LPT1 e o *software matlab* para gravação e armazenagem dos dados, elaboração de gráficos e tabelas que nos permitirá a análise.

#### **3.1.1 COMPONENTES DO SISTEMA E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS**

- 1 - Ventilador lado frio – Potência e Vazão ajustáveis
- 2 - Ventilador lado quente – Potência e Vazão ajustáveis
- 3 - Dissipador Lado Frio e Dissipador Lado Quente – Em alumínio, medindo 150 x 80 x 40mm, 19 aletas e espaçamento entre aletas 2 mm.
- 4 - Duto em alumínio isolado termicamente com fibra de vidro e isopor
- 5 - Módulo Termoelétrico modelo HT6-12-40 (ver anexo 1)

6 - Medição de Temperatura – Termopares Tipo J – Sensor Termoelemento Fé-Co, modelo TE/AA.

7 - Isolação – Fibra de vidro e isopor

8 - Conversor A/D para interfaceamento – Placa LPT1

9 - PC – *Software Matlab*

10 - Fonte de alimentação do módulo termoeletrico - Tensão de saída variável: 0 a 12V

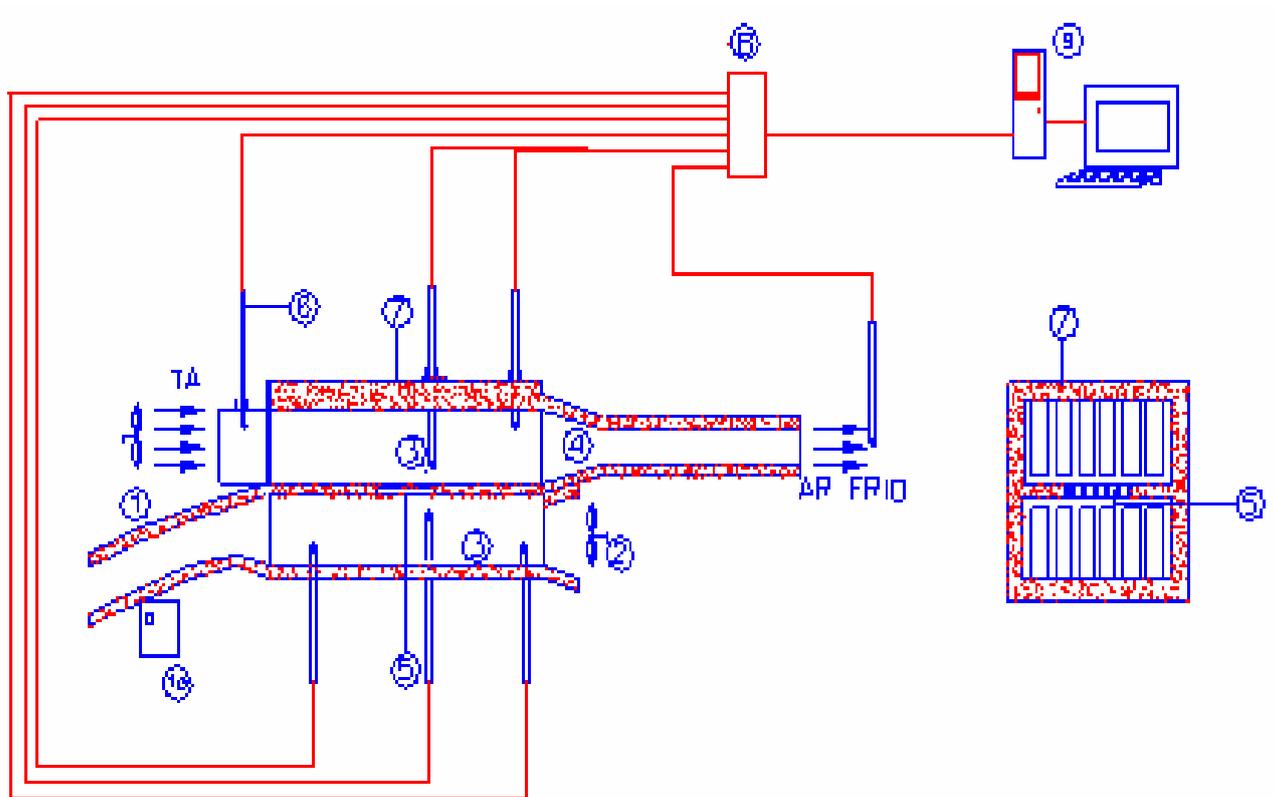


Figura 3.1 - Fluxograma do um sistema termoeletrico para condicionamento de ar

### 3.2 FOTOS DE PARTES, SUB-CONJUNTOS E CONJUNTO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

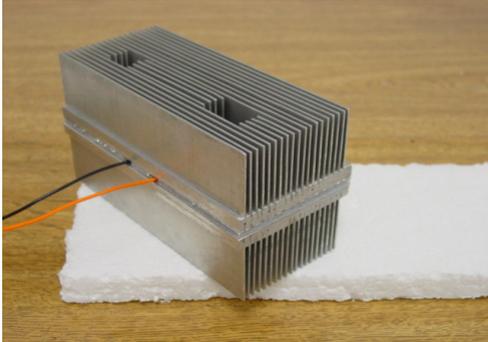


Figura 3.2 - Dissipadores de calor lado quente e lado frio, e módulo termoeletrico – Sub-conjunto



Figura 3.3 - Dissipadores de calor lado quente e lado frio, módulo termoeletrico e dutos - Sub-conjunto

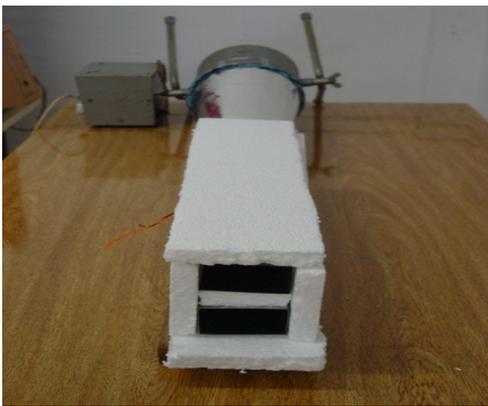


Figura 3.4 - Sub-conjunto



Figura 3.5 - Conjunto montado com instrumentos



Figura 3.6 - Conjunto montado – Aquisição de dados

### **3.3 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE**

#### **3.3.1 INSTRUMENTOS - SENSOR**

Definidos como dispositivo sensível ao movimento, à luz, calor e a outros tipos de energia, os sensores são instrumentos importantes em sistemas de controle. Eles fornecem as informações necessárias ao controlador para que sejam comparadas à referência, oferecendo assim, a possibilidade de análise e controle de funcionamento do sistema.

Neste equipamento experimental para aquisição e medição de temperatura utilizou-se sensores termopares tipo J.

O termopar detecta a quantidade de calor e a converte em sinal elétrico em milivolts de tensão (FIALHO, A. B., 2002).

As variações de tensão na saída do termopar são transmitidas (passam por) a um conversor de sinal analógico/digital, cuja saída é de 0 a 5 milivolts sinal digital.

Os sinais digitais são transmitidos a um processador onde são gravados e convertidos em temperatura.

A temperatura e a tensão são lineares e tem a forma:

$$y = ax + b$$

##### **3.3.1.1 CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES**

Foi elaborado a curva aproximada de calibração para os termopares, conforme Tabela 3.1 e gráfico da figura 3.2, permitindo assim as medidas das temperaturas.

Tabela 3.1 – Dados para elaboração da curva aproximada para calibração dos termopares tipo J.

<b>CURVA DE CALIBRAÇÃO - TERMOPAR - TIPO “J” DADOS</b>	
<b>TENSÃO (mV)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
4.20	98
3.38	91
3.00	82
2.65	72
2.50	67.5
1.90	58
1.20	46
0.90	37
0.10	21

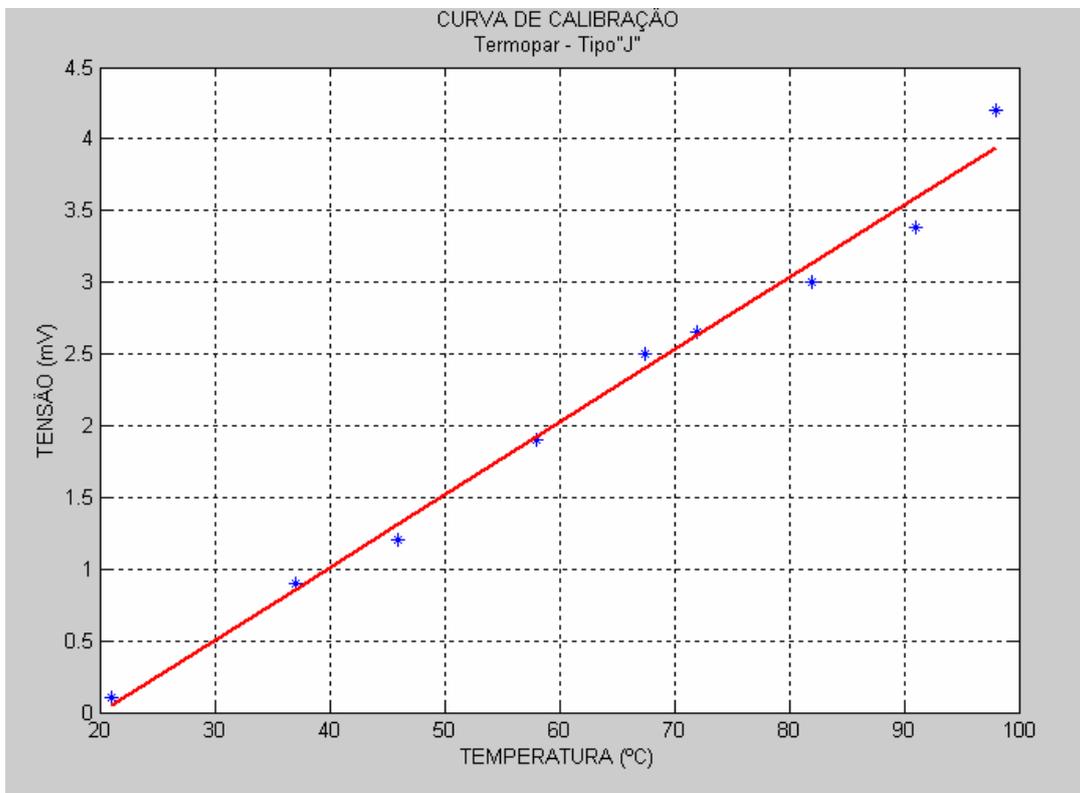


Figura 3.7 – Curva aproximada de calibração de termopar tipo J

### 3.3.2 CONTROLE

Um sistema de controle é basicamente um sistema de entrada(s) e saída(s).

O controle é a regulação dos parâmetros de processo definidos em uma escala especificada, denominado ponto a ser ajustado (*Set Point*).

Assim, o controle do processo é utilizado para monitorar e corrigir os parâmetros de processo através das variáveis dinâmicas.

Um sistema de controle aplica sinais adequados na entrada do processo com o intuito de fazer com que o sinal na saída satisfaça o ponto ajustado.

O controle consiste em determinar a partir da saída desejada e do conhecimento do processo, os sinais adequados a serem aplicados na entrada.

Informações sobre como a saída do processo está evoluindo é utilizada a cada instante de tempo para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo a cada instante de tempo.

#### 3.3.2.1 PROPOSTA PARA O CONTROLE DO PROCESSO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

A temperatura de saída do lado frio (TSF) é a variável dinâmica, denominada também de variável de processo (PV) a ser comparada com o sinal de realimentação e ela depende da variação da vazão do ar do lado quente (Qq) e do lado frio, e da corrente e da tensão elétrica aplicadas no módulo termoeletrico que faz a temperatura do lado frio da placa ( $T_c$ ) aumentar ou diminuir.

A temperatura de saída é então comparada com o valor de referência (ponto ajustado). A diferença entre estes dois valores, denominado erro (E) é utilizado para determinar o valor ou sinal de controle (CV) que deve efetivamente ser aplicado ao processo.

Neste trabalho propõem-se a ação de controle proporcional e integral (PI).

A ação integral consiste em aplicar um sinal de controle  $u(t)$  proporcional à integral do sinal erro  $e(t)$ :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t)dt$$

$T_i$  é denominado de tempo integral ou *reset-time*

A ação integral tem assim uma função armazenadora de energia. Se a partir de um determinado tempo  $t$  o erro é igual a zero, o sinal de controle  $u(t)$  será mantido em um valor constante proporcional a energia armazenada até o instante  $t$ . Este fato permitirá no sistema de malha fechada obter-se o seguimento de uma referência com erro nulo em regime permanente, pois a ação integral garantirá a aplicação ao processo de um sinal de controle constante de forma a ter-se  $r(t) = y(t)$ , ou seja,  $e(t) = 0$ .

A ação de controle proporcional e integral (PI), atua no retificador controlando a variação da corrente contínua e da tensão elétrica (I e V) aplicadas no módulo termoeletrico, que influi nas temperaturas do lado frio e do lado quente da placa. Atua também no inversor de frequência controlando a frequência e conseqüentemente a potência (P) do motor e a rotação (n) de saída do ventilador, variando a vazão do ar quente. Assim, tem-se o controle das variáveis que influem no processo.

Não há controle na vazão de ar do lado frio, podendo manter um valor constante para a mesma.

Abaixo na figura.3.8 é apresentado o fluxograma do controle do sistema experimental:

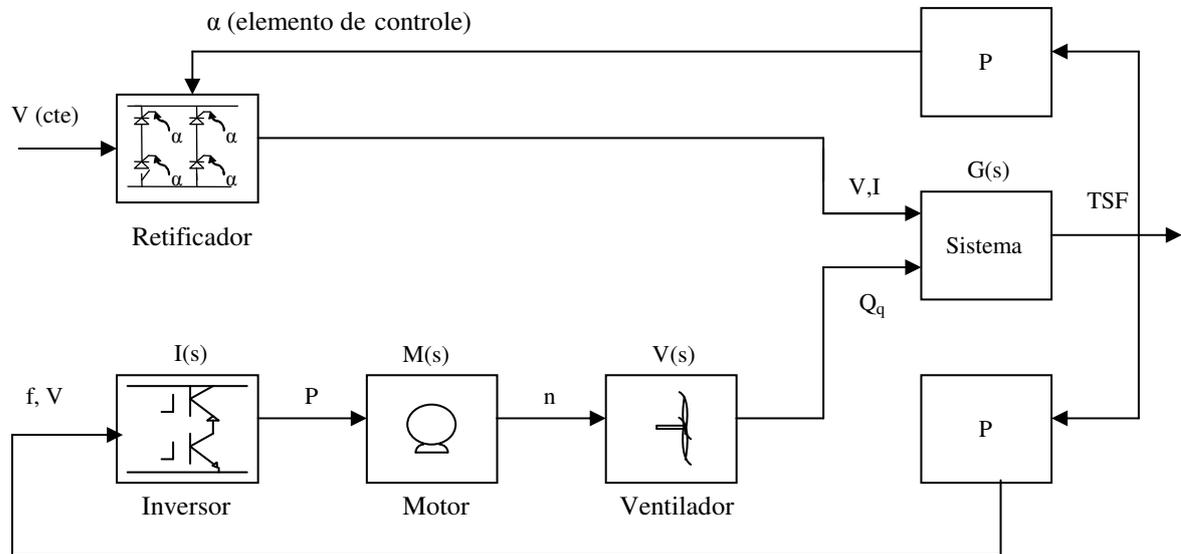


Figura.3.8 – Fluxograma do controle do sistema experimental

### 3.4 ENSAIOS

Foram realizados sete ensaios, em que foi medido a temperatura de entrada do ar do lado quente (TEQ), a temperatura de saída do ar do lado quente (TSQ), a temperatura de entrada do ar do lado frio (TEF), a temperatura de saída do ar do lado frio (TSF), a temperatura da placa do lado quente do módulo termoeletrônico ( $T_h$ ), a temperatura da placa do lado frio do módulo termoeletrônico ( $T_c$ ), a corrente elétrica aplicada  $I$  (A), a tensão elétrica aplicada ( $V$ ), a vazão do ar do lado quente e do lado frio do módulo termoeletrônico, com o objetivo de determinar o tempo para estabilidade térmica e desempenho do sistema.

### 3.5 Ensaio 1

TEQ (°C)	TSQ (°C)	Th (°C)	TEF (°C)	TSF (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$
20,0	20,0	20,0	20,4	19,9	20,0	0	0	0	0
20,5	21,9	29,7	21,6	20,6	19,1	1	10,60	1,04	24,40
20,8	22,9	30,4	21,9	21,1	19,7	4	10,70	1,04	25,05
20,9	23,1	30,8	22,5	21,6	20,2	6	10,60	1,04	25,50
21,1	23,4	31	22,9	22,1	20,7	8	10,30	1,04	25,85
21,4	23,6	31,2	23,1	22,5	20,9	10	10,30	1,04	26,05
21,4	23,9	31,4	23,4	22,8	21,2	12	10,20	1,03	26,30
21,5	23,9	31,6	23,8	23	21,4	14	10,20	1,03	26,50
21,6	23,9	31,6	23,9	23,3	21,6	16	10,00	1,03	26,60
21,8	24,1	31,7	23,9	23,4	21,7	18	10,00	1,03	26,70
21,9	24,1	31,8	23,9	23,4	21,8	20	10,00	1,03	26,80
21,9	24,3	31,9	24,1	23,6	21,9	22	10,00	1,03	26,90
21,9	24,4	32	24,1	23,6	21,9	24	10,10	1,03	26,95
22	24,4	32,1	24,4	23,9	22,1	26	10,00	1,03	27,10
22,1	24,5	32,1	24,4	23,9	22,2	28	9,90	1,03	27,15
22,1	24,5	32,1	24,5	23,9	22,3	30	9,80	1,03	27,20
22,3	24,6	32,2	24,5	24	22,3	32	9,90	1,03	27,25
22,3	24,8	32,3	24,6	24	22,4	34	9,90	1,03	27,35
22,4	24,9	32,4	24,8	24,1	22,5	36	9,90	1,03	27,45
22,4	24,9	32,4	24,9	24,1	22,5	38	9,90	1,03	27,45
22,4	24,9	32,5	24,9	24,3	22,5	40	10,00	1,03	27,50
22,5	24,9	32,5	25,1	24,4	22,4	42	10,10	1,03	27,45
22,5	24,9	32,5	24,9	24,4	22,6	44	9,90	1,03	27,55
22,6	24,9	32,6	25,3	24,4	22,7	46	9,90	1,03	27,65
22,6	25	32,6	25,4	24,5	22,7	48	9,90	1,03	27,65
22,6	25	32,4	25,1	24,5	22,7	50	9,70	1,03	27,55
22,8	25	32,2	25,1	24,5	22,7	52	9,50	1,03	27,45
22,8	24,9	32,3	25	24,4	22,5	54	9,80	1,03	27,40
22,8	24,9	32,2	25	24,4	22,4	56	9,80	1,03	27,30
22,8	25	32,3	25	24,4	22,4	58	9,90	1,03	27,35
22,8	25	32,3	25,1	24,4	22,5	60	9,80	1,03	27,40

Corrente: 2,67 A

Tensão elétrica: 11,17 V

Potência Elétrica: 29,824 W

Vazão ar quente: 23,66 m<sup>3</sup>/h

Vazão ar frio: 11,30 m<sup>3</sup>/h

## 3.6 Ensaio 2

TEQ (°C)	TSQ (°C)	Th (°C)	TEF (°C)	TSF (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$
23,0	23,0	23,2	23,8	23,3	23,1	0	0	0	0-
23,2	23,9	31,2	24,6	24,1	22,1	2	9,1	1,031	26,650
23,3	24,5	31,8	24,8	24,1	22,3	4	9,5	1,032	27,050
23,4	24,6	31,8	24,9	24,1	22,3	6	9,5	1,032	27,050
23,4	24,8	32	24,9	24,1	22,4	8	9,6	1,032	27,200
23,5	24,9	32	24,9	24,3	22,5	10	9,5	1,032	27,250
23,6	24,9	32,1	25	24,4	22,5	12	9,6	1,032	27,300
23,6	24,9	32,1	25,1	24,4	22,6	14	9,5	1,032	27,350
23,6	24,9	32,1	25,1	24,5	22,6	16	9,5	1,032	27,350
23,8	25	32,1	25,1	24,5	22,7	18	9,4	1,032	27,400
23,8	25	32,1	25,1	24,6	22,6	20	9,5	1,032	27,350
23,9	25	32,2	25,1	24,6	22,6	22	9,6	1,032	27,400
23,9	25,1	32,1	25,3	24,6	22,6	24	9,5	1,032	27,350
23,9	25,1	32,2	25,3	24,6	22,6	26	9,6	1,032	27,400
23,9	25,1	32,1	25,4	24,8	22,7	28	9,4	1,032	27,400
23,9	25,1	32,3	25,4	24,9	22,7	30	9,6	1,032	27,500
23,9	25,3	32,2	25,5	24,9	22,7	32	9,5	1,032	27,450
23,9	25,3	32,2	25,4	24,9	22,7	34	9,5	1,032	27,450
24	25,4	32,2	25,6	24,9	22,7	36	9,5	1,032	27,450
24	25,4	32,3	25,6	24,9	22,8	38	9,5	1,032	27,550
24,1	25,4	32,3	25,6	24,9	22,8	40	9,5	1,032	27,550
24,1	25,4	32,3	25,8	25	22,9	42	9,4	1,032	27,600
24,1	25,4	32,4	25,8	25	22,9	44	9,5	1,032	27,650
24,1	25,5	32,5	25,9	25	22,9	46	9,6	1,032	27,700
24,1	25,5	32,4	25,9	25,1	22,9	48	9,5	1,032	27,650
24,3	25,6	32,4	25,9	25,1	23	50	9,4	1,032	27,700
24,3	25,6	32,4	25,9	25,1	23	52	9,4	1,032	27,700
24,3	25,6	32,4	25,9	25,1	22,9	54	9,5	1,032	27,650
24,3	25,6	32,6	25,9	25,1	23	56	9,6	1,032	27,800
24,4	25,6	32,6	25,9	25,1	23	58	9,6	1,032	27,800
24,4	25,6	32,6	25,9	25,3	23,1	60	9,5	1,032	27,850

Corrente: 2,62 A  
 Tensão elétrica: 11,21 V  
 Potência Elétrica: 29,370 W  
 Vazão ar quente: 39,43 m<sup>3</sup>/h  
 Vazão ar frio: 11,60 m<sup>3</sup>/h

## 3.7 Ensaio 3

TEQ (°C)	TSQ (°C)	Th (°C)	TEF (°C)	TSF (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$
20,3	20,2	20,2	20,9	20,4	20,3	0	0	0	0
20,4	20,5	27,4	21,4	20,8	18,8	1	8,60	1,036	23,10
20,5	21,9	29,4	21,8	20,9	19,1	2	10,30	1,041	24,25
20,8	23,6	31	22,1	21,4	19,7	4	11,30	1,041	25,35
20,9	24,3	31,6	22,8	21,9	20,3	6	11,30	1,040	25,95
21	24,6	31,9	23,1	22,4	20,7	8	11,20	1,038	26,30
21,1	24,9	32	23,4	22,8	21	10	11,00	1,038	26,50
21,4	24,9	32,1	23,6	23	21,2	12	10,90	1,038	26,65
21,4	25,1	32,3	23,9	23,3	21,4	14	10,90	1,037	26,85
21,5	25,1	32,4	23,9	23,4	21,6	16	10,80	1,037	27,00
21,6	25,3	32,4	24,1	23,6	21,7	18	10,70	1,037	27,05
21,8	25,4	32,5	24,1	23,8	21,8	20	10,70	1,037	27,15
21,9	25,6	32,6	24,1	23,8	21,8	22	10,80	1,036	27,20
21,9	25,6	32,4	24,4	23,9	21,8	24	10,60	1,036	27,10
21,9	25,6	32,4	24,4	23,9	21,8	26	10,60	1,036	27,10
21,9	25,6	32,5	24,4	23,9	21,9	28	10,60	1,037	27,20
21,9	25,6	32,9	24,4	23,9	22	30	10,90	1,038	27,45
22	25,9	33,1	24,6	24	22,2	32	10,90	1,037	27,65
22	25,9	33,2	24,6	24	22,2	34	11,00	1,038	27,70
22,1	25,9	33,3	24,6	24,1	22,3	36	11,00	1,037	27,80
22,1	25,9	33,2	24,6	24,1	22,3	38	10,90	1,037	27,75
22,1	25,9	33,3	24,6	24,1	22,3	40	11,00	1,037	27,80
22,2	25,9	33,3	24,6	24,1	22,3	42	11,00	1,038	27,80
22,3	26,1	33,4	24,8	24,1	22,3	44	11,10	1,038	27,85
22,3	26,1	33,5	24,9	24,3	22,5	46	11,00	1,037	28,00
22,4	26,1	33,4	24,9	24,4	22,5	48	10,90	1,037	27,95
22,4	26,1	33,5	24,9	24,4	22,5	50	11,00	1,037	28,00
22,4	26,1	33,5	25	24,5	22,5	52	11,00	1,038	28,00
22,4	26,3	33,6	24,9	24,5	22,5	54	11,10	1,037	28,05
22,5	26,3	33,5	25,1	24,5	22,6	56	10,90	1,037	28,05
22,5	26,4	33,6	25	24,6	22,6	58	11,00	1,037	28,10
22,6	26,4	33,6	25,1	24,6	22,7	60	10,90	1,037	28,15

Corrente: 2,59 A

Tensão elétrica: 11,20 V

Potência Elétrica: 29,00 W

Vazão ar quente: 15,77 m<sup>3</sup>/h

Vazão ar frio: 11,10 m<sup>3</sup>/h

## 3.8 Ensaio 4

TEQ (°C)	TSQ (°C)	Th (°C)	TEF (°C)	TSF (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$
23,1	23,0	23,3	23,6	24,3	23,1	0	0	0	0
23,1	23,1	24,6	24,6	24,3	22,6	1	2,00	1,007	23,60
23,3	23,5	30	24,8	24,1	22	2	8,00	1,027	26,00
23,4	24,3	31,3	24,8	23,9	21,9	4	9,40	1,032	26,60
23,5	24,5	31,5	24,9	23,9	21,9	6	9,60	1,033	26,70
23,6	24,6	31,5	25	23,9	22	8	9,50	1,032	26,75
23,8	24,6	31,4	25,1	23,9	21,9	10	9,50	1,032	26,65
23,9	24,9	31,6	25,1	24	22,1	12	9,50	1,032	26,85
23,9	24,9	31,5	25,1	24,1	22,1	14	9,40	1,032	26,80
23,9	24,9	31,6	25,1	24,1	22,1	16	9,50	1,032	26,85
23,9	24,9	31,6	25,3	24,1	22,1	18	9,50	1,032	26,85
23,9	24,9	31,6	25,4	24,1	22,2	20	9,40	1,032	26,90
23,9	24,9	31,6	25,4	24,3	22,3	22	9,30	1,031	26,95
23,9	25	31,8	25,4	24,4	22,3	24	9,50	1,032	27,05
24	25,1	31,8	25,5	24,4	22,3	26	9,50	1,032	27,05
24,1	25,1	31,8	25,5	24,4	22,4	28	9,40	1,032	27,10
24,1	25,1	31,8	25,5	24,4	22,3	30	9,50	1,032	27,05
24,1	25,1	31,7	25,6	24,5	22,3	32	9,40	1,032	27,00
24,1	25,1	31,8	25,6	24,5	22,4	34	9,40	1,032	27,10
24,1	25,1	31,8	25,6	24,6	22,4	36	9,40	1,032	27,10
24,1	25,3	31,8	25,6	24,6	22,4	38	9,40	1,032	27,10
24,3	25,3	31,8	25,6	24,6	22,4	40	9,40	1,032	27,10
24,4	25,4	31,9	25,8	24,6	22,5	42	9,40	1,032	27,20
24,4	25,4	32	25,9	24,6	22,5	44	9,50	1,032	27,25
24,4	25,4	32	25,9	24,8	22,6	46	9,40	1,032	27,30
24,5	25,5	32,1	25,9	24,9	22,7	48	9,40	1,032	27,40
24,5	25,5	32	25,9	24,9	22,7	50	9,30	1,031	27,35
24,6	25,6	32	25,9	24,9	22,7	52	9,30	1,031	27,35
24,6	25,6	32,1	25,9	24,9	22,7	54	9,40	1,032	27,40
24,6	25,6	32,2	26	24,9	22,8	56	9,40	1,032	27,50
24,6	25,6	32,3	25,9	25	22,8	58	9,50	1,032	27,55
24,8	25,8	32,2	25,9	25	22,8	60	9,40	1,032	27,50

Corrente: 2,59 A  
 Tensão elétrica: 11,16 V  
 Potência Elétrica: 28,904 W  
 Vazão ar quente: 48,10 m<sup>3</sup>/h  
 Vazão ar frio: 9,40 m<sup>3</sup>/h

### 3.9 Ensaio 5

TEQ (°C)	TSQ (°C)	Th (°C)	TEF (°C)	TSF (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$
18,4	18,4	18,4	19,65	19,5	18,3	0	0	0	0
18,4	18,4	19,1	20,3	19,4	18	1	1,10	1,004	18,55
18,5	19,1	26,1	20,4	19,4	17,6	2	8,50	1,029	21,85
18,6	20,6	28,4	20,6	19,4	18	3	10,40	1,036	23,20
18,6	21,6	29,5	20,9	19,4	18,2	4	11,30	1,039	23,85
18,9	22,9	30,5	21,3	19,6	18,7	6	11,80	1,040	24,60
18,9	23,3	30,9	21,8	20	19,1	8	11,80	1,040	25,00
19	23,5	31	22	20,5	19,6	10	11,40	1,039	25,30
19,1	23,6	31,2	22,3	20,9	19,9	12	11,30	1,039	25,55
19,3	23,8	31,3	22,6	21,4	20,2	14	11,10	1,038	25,75
19,4	23,9	31,5	22,8	21,5	20,5	16	11,00	1,037	26,00
19,4	23,9	31,5	22,9	21,8	20,6	18	10,90	1,037	26,05
19,4	23,9	31,6	22,9	21,9	20,7	20	10,90	1,037	26,15
19,6	24	31,6	23,1	21,9	20,8	22	10,80	1,037	26,20
19,6	24,1	31,7	23,3	22,1	20,9	24	10,80	1,037	26,30
19,6	24,1	31,8	23,4	22,1	21,1	26	10,70	1,036	26,45
19,8	24,3	31,8	23,6	22,4	21,2	28	10,60	1,036	26,50
19,9	24,4	31,9	23,6	22,5	21,3	30	10,60	1,036	26,60

Corrente: 2,48 A  
 Tensão elétrica: 11,30 V  
 Potência Elétrica: 28,02 W  
 Vazão ar quente: 19,71 m<sup>3</sup>/h  
 Vazão ar frio: 8,47 m<sup>3</sup>/h

### 3.10 Ensaio 6

TEQ (°C)	TSQ (°C)	Th (°C)	TEF (°C)	TSF (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$
19,9	20,0	20,1	20,2	20,1	20,1	0	0	0	0
19,9	20,6	27,3	22,6	22	19,8	1	7,50	1,026	23,55
20	22,3	29,6	22,9	21,9	20,1	2	9,50	1,032	24,85
20,1	23,5	31,2	23	21,9	20,2	3	11,00	1,037	25,70
20,1	24,6	32	23,3	21,9	20,4	4	11,60	1,040	26,20
20,3	25,9	32,9	23,6	22,1	20,8	6	12,10	1,041	26,85
20,4	26,5	33,3	23,9	22,4	21,1	8	12,20	1,041	27,20
20,4	26,9	33,5	23,9	22,6	21,4	10	12,10	1,041	27,45
20,4	26,9	33,6	24,1	22,9	21,5	12	12,10	1,041	27,55
20,4	26,9	33,6	24,3	23,1	21,7	14	11,90	1,040	27,65
20,4	27	33,7	24,4	23,3	21,8	16	11,90	1,040	27,75
20,4	27	33,8	24,4	23,4	21,9	18	11,90	1,040	27,85
20,4	27,1	33,8	24,5	23,4	21,9	20	11,90	1,040	27,85
20,4	27,1	33,9	24,6	23,5	22,1	22	11,80	1,040	28,00
20,4	27,1	33,9	24,6	23,6	22,1	24	11,80	1,040	28,00
20,5	27,1	33,9	24,6	23,8	22,2	26	11,70	1,040	28,05
20,5	27,1	33,9	24,8	23,8	22,2	28	11,70	1,040	28,05
20,5	27,3	33,9	24,9	23,9	22,3	30	11,60	1,039	28,1

Corrente: 2,64 A

Tensão elétrica: 11,20 V

Potência Elétrica: 29,57 W

Vazão ar quente: 12,10 m<sup>3</sup>/h

Vazão ar frio: 9,84 m<sup>3</sup>/h

### 3.11 Ensaio 7

TEQ (°C)	TSQ (°C)	Th (°C)	TEF (°C)	TSF (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$
20,4	20,4	20,5	20,3	20,4	20,3	0	0	0	0
20,4	20,9	26,9	22,9	22,3	20	1	6,90	1,024	23,45
20,4	22,1	29,1	22,9	22,1	20	2	9,10	1,031	24,55
20,4	23	30,1	23,1	22	20,2	3	9,90	1,034	25,15
20,4	23,6	30,7	23,3	22	20,3	4	10,40	1,035	25,50
20,5	24	31,1	23,6	22,3	20,6	6	10,50	1,036	25,85
20,6	24,3	31,2	23,9	22,4	20,8	8	10,40	1,035	26,00
20,6	24,4	31,4	23,9	22,6	21	10	10,40	1,035	26,20
20,6	24,4	31,5	23,9	22,9	21,1	12	10,40	1,035	26,30
20,8	24,5	31,5	24,1	22,9	21,3	14	10,20	1,035	26,40
20,9	24,6	31,6	24,1	23	21,3	16	10,30	1,035	26,45
20,9	24,6	31,6	24,4	23,1	21,4	18	10,20	1,035	26,50
20,9	24,6	31,6	24,4	23,3	21,5	20	10,10	1,034	26,55
21,1	24,9	31,7	24,4	23,4	21,5	22	10,20	1,035	26,60
21,1	24,9	31,7	24,5	23,5	21,6	24	10,10	1,034	26,65
21,1	24,9	31,8	24,6	23,6	21,7	26	10,10	1,034	26,75
21,3	25	31,8	24,6	23	21,7	28	10,10	1,034	26,75
21,4	25,1	31,9	24,9	23,6	21,9	30	10,00	1,034	26,90

Corrente: 2,64 A

Tensão elétrica: 11,22 V

Potência Elétrica: 29,621 W

Vazão ar quente: 23,66 m<sup>3</sup>/h

Vazão ar frio: 10,80 m<sup>3</sup>/h

## **CAPITULO 4 RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES**

### **4.1 Geral**

Os resultados dos ensaios para um espaço de tempo de 0 a 30 minutos são apresentados na Tabela 4.1. Valores de  $T_h$  e  $T_c$ , bem como os valores médios estão representados nos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Temperaturas médias do lado quente e do lado frio – Ensaio 1 a 7

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 1 a 7	Ensaio 1 a 7	Ensaio 1 a 7	Ensaio 1 a 7	Ensaio 1 a 7	Ensaio 1 a 7
Th (°C)	Tc (°C)	Tempo (min)	Th Média	Tc Média	$\Delta T$	Th/Tc	$\bar{T}$												
20,2	23,2	20,2	23,3	18,4	20,1	20,5	20	24,1	20,3	24,1	19,3	22,1	22,3	0	20,84	21,74	-	-	-
27,1	29,4	27,4	24,6	19,1	27,3	26,9	19,1	22,7	18,8	22,6	18	19,8	20	1	25,97	20,14	5,83	1,020	23,06
29,7	31,2	29,4	30	26,1	29,6	29,1	19	22,1	19,1	22	17,6	20,1	20	2	29,30	19,99	9,31	1,032	24,64
30,2	31,6	30,4	31,1	28,4	31,2	30,1	19,4	22,2	19,4	21,9	18	20,2	20,2	3	30,43	20,19	10,24	1,035	25,31
30,4	31,8	31	31,3	29,5	32	30,7	19,7	22,3	19,7	21,9	18,2	20,4	20,3	4	30,96	20,36	10,60	1,036	25,66
30,8	31,8	31,6	31,5	30,5	32,9	31,1	20,2	22,3	20,3	21,9	18,7	20,8	20,6	6	31,46	20,69	10,77	1,037	26,07
31	32	31,9	31,5	30,9	33,3	31,2	20,7	22,4	20,7	22	19,1	21,1	20,8	8	31,69	20,97	10,71	1,036	26,33
31,2	32	32	31,4	31	33,5	31,4	20,9	22,5	21	21,9	19,6	21,4	21	10	31,79	21,19	10,60	1,036	26,49
31,4	32,1	32,1	31,6	31,2	33,6	31,5	21,2	22,5	21,2	22,1	19,9	21,5	21,1	12	31,93	21,36	10,57	1,036	26,64
31,6	32,1	32,3	31,5	31,3	33,6	31,5	21,4	22,6	21,4	22,1	20,2	21,7	21,3	14	31,99	21,53	10,46	1,035	26,76
31,6	32,1	32,4	31,6	31,5	33,7	31,6	21,6	22,6	21,6	22,1	20,5	21,8	21,3	16	32,07	21,64	10,43	1,035	26,86
31,7	32,1	32,4	31,6	31,5	33,8	31,6	21,7	22,7	21,7	22,1	20,6	21,9	21,4	18	32,10	21,73	10,37	1,035	26,91
31,8	32,1	32,5	31,6	31,6	33,8	31,6	21,8	22,6	21,8	22,2	20,7	21,9	21,5	20	32,14	21,79	10,36	1,035	26,96
31,9	32,2	32,6	31,6	31,6	33,9	31,7	21,9	22,6	21,8	22,3	20,8	22,1	21,5	22	32,21	21,86	10,36	1,035	27,04
32	32,1	32,4	31,8	31,7	33,9	31,7	21,9	22,6	21,8	22,3	20,9	22,1	21,6	24	32,23	21,89	10,34	1,035	27,06
32,1	32,2	32,4	31,8	31,8	33,9	31,8	22,1	22,6	21,8	22,3	21,1	22,2	21,7	26	32,29	21,97	10,31	1,035	27,13
32,1	32,1	32,5	31,8	31,8	33,9	31,8	22,2	22,7	21,9	22,4	21,2	22,2	21,7	28	32,29	22,04	10,24	1,035	27,16
32,1	32,3	32,9	31,8	31,9	33,9	31,9	22,3	22,7	22	22,3	21,3	22,3	21,9	30	32,40	22,11	10,29	1,035	27,26
Média 31,88	Média 32,34	Média 32,49	Média 31,68	Média 31,63	Média 33,82	Média 31,69	Média 21,88	Média 22,63	Média 21,76	Média 22,23	Média 20,81	Média 22,02	Média 21,54	Média 14 a 30					

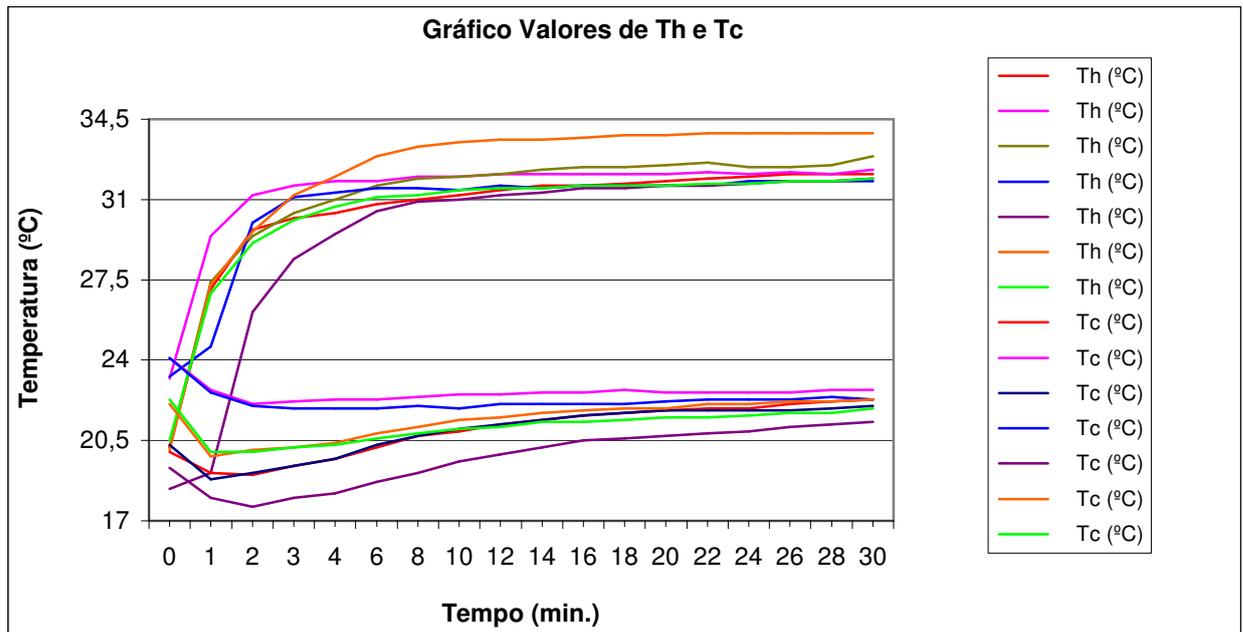


Figura 4.1 – Gráfico com valores de  $T_h$  e  $T_c$  em função do tempo de 0 a 30 min.

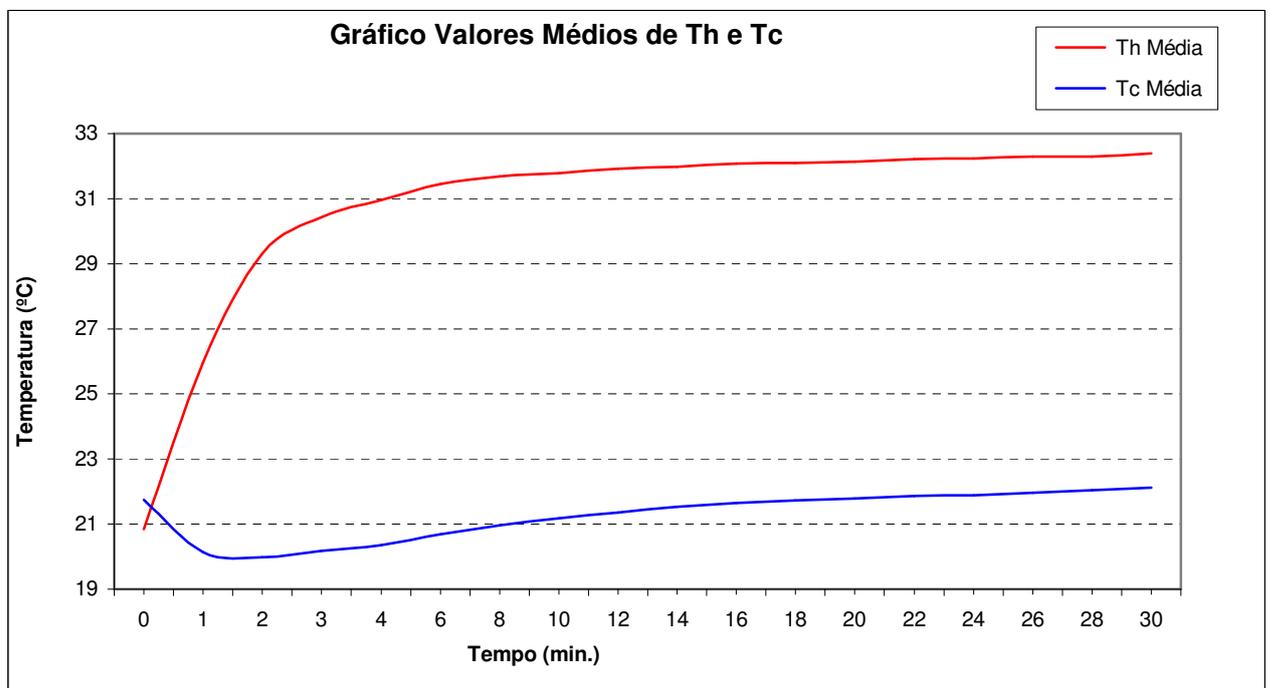


Figura 4.2– Gráfico com valores médios de  $T_h$  e  $T_c$  em função do tempo de 0 a 30 min.

Utiliza-se para as análises os valores médios de  $T_h$  e  $T_c$  para regime transitório o espaço de tempo de 0 a 14 minutos aproximadamente e como regime permanente a partir de 14 até 30 minutos.

## 4.2 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA VAZÃO DO AR DO LADO QUENTE

Abaixo Tabela 4.2 com valores de corrente e tensão elétricas aplicadas, temperaturas médias, e variação de temperatura do lado quente ( $\Delta T$  quente) e do lado frio ( $\Delta T$  fria) em função da vazão do ar do lado quente ( $Q_q$ ) e o gráfico da figura 4.3 representando tais valores.

Tabela 4.2 - Valores médios de temperaturas, de vazão de ar do lado quente e de corrente e tensão elétricas aplicadas

Medições	I (A)	Tensão (V)	$T_h$ média (°C)	$T_c$ Média (°C)	TEQ Média (°C)	TSQ Média (°C)	TEF Média (°C)	TSF Média (°C)	$\Delta T$ quente (°C)	$\Delta T$ fria (°C)	Vazão Ar $Q_q$ (m <sup>3</sup> /h)
Ensaio 1	2,67	11,17	31,53	21,83	21,99	24,22	24,11	23,46	2,23	0,65	23,66
Ensaio 2	2,62	11,21	31,91	22,72	23,874	25,1	25,397	24,719	1,226	0,678	15,77
Ensaio 3	2,59	11,2	32,16	21,66	21,77	25,16	24,03	23,48	3,39	0,55	39,43
Ensaio 4	2,59	11,16	31,25	22,39	24,09	24,96	25,44	24,43	0,87	1,01	48,1
Ensaio 5	2,48	11,3	29,43	19,76	19,13	22,66	22,11	20,87	3,53	1,24	19,72
Ensaio 6	2,64	11,2	32,11	21,31	20,3	25,6	23,94	22,87	5,3	1,07	12,1
Ensaio 7	2,64	11,22	30,43	21,02	20,77	23,9	23,91	22,8	3,13	1,11	23,66

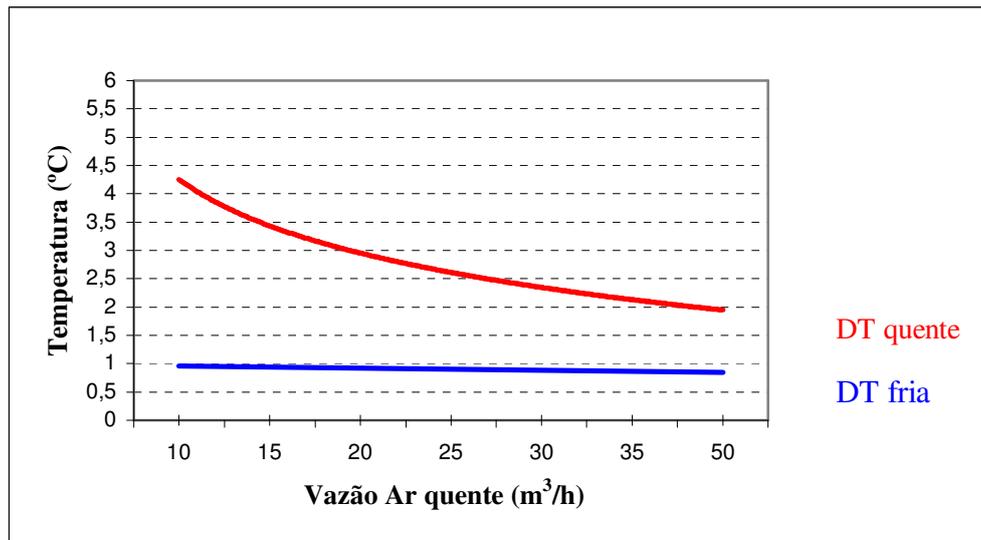


Figura 4.3 – Gráfico com a variação da temperatura ( $\Delta T$ ) do lado quente e do lado frio em função da vazão do ar do lado quente. Vazão média de ar frio  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  (constante)

Nota-se que para baixas vazões do ar do lado quente e mantendo-se a vazão do ar do lado frio praticamente constante, as variações de temperaturas ( $\Delta T_{\text{quente}}$ ) do lado quente como do lado frio ( $\Delta T_{\text{fria}}$ ) são maiores.

### 4.3 REGIME TRANSITÓRIO

Considerando-se para regime transitório o espaço de tempo de 0 a 14 minutos aproximadamente, elaborou-se os cálculos dos principais parâmetros conforme expostos no capítulo 2.

Conforme ensaios de 1 a 7, e dados do módulo termoelétrico:

- |                                      |                                  |                             |               |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------|
| - Figura de Mérito (Z):              | $0,00268 \text{ K}^{-1}$         | - Dimensões c x l x h (mm): | 40 x 40 x 3,6 |
| - Condutância Térmica (K):           | 0,46 W/K                         | - N° de associações (N):    | 127           |
| - Coeficiente de Seebeck:            | 0,0513 W/K                       | - $\gamma = A/L$ (cm):      | 0,121         |
| - Condutividade térmica (k):         | 0,0151 W/K                       | - Resistência total (R):    | 2,12 $\Omega$ |
| - Resistividade elétrica ( $\rho$ ): | 0,00101 $\Omega \cdot \text{cm}$ |                             |               |

Das equações, 2.26, 2.27, 2.28, 2.30.1, 2.69.1 e sendo  $w = (1 + ZT^-)^{\frac{1}{2}}$ , calcula-se:

O coeficiente de desempenho – COP ( $\phi$ ), a taxa de bombeamento de calor ( $q_c$ ), a tensão elétrica no módulo (V), a potência consumida (P), a máxima variação de temperatura ( $\Delta T_{max}$ ) quando  $q_c=0$  e o  $w$ , respectivamente.

Tabela 4.3 - Valores calculados e dados dos ensaios do regime transitório

Medições	I (A)	Tensão (V)	w	V	$q_c$ (W)	P (W)	COP	$\Delta T_{max}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	Th/Tc	Th (°C)	Tc (°C)	Vazão Ar Q
Ensaio 1	2,67	11,17	1,33	6,2	27,87	16,54	1,68	0,56	10,41	1,035	30,871	20,457	23,66
Ensaio 2	2,62	11,21	1,34	6,04	28,09	15,83	1,77	0,67	9,471	1,032	31,857	22,386	15,77
Ensaio 3	2,59	11,20	1,34	6,04	26,96	15,64	1,72	0,55	10,688	1,036	30,963	20,275	39,43
Ensaio 4	2,59	11,16	1,34	5,92	28,27	15,33	1,843	0,652	8,363	1,028	30,425	22,063	48,1
Ensaio 5	2,48	11,30	1,34	6,4	26,10	14,92	1,74	0,47	9,856	1,034	28,667	18,811	19,72
Ensaio 6	2,64	11,20	1,34	6,17	27,31	16,28	1,68	0,58	11,11	1,038	31,889	20,778	12,1
Ensaio 7	2,64	11,22	1,343	6,1	27,89	16,1	1,73	0,57	9,8	1,033	30,389	20,589	23,66

A seguir os gráficos das figuras 4.4 e 4.5 representam o coeficiente de desempenho e a taxa de bombeamento de calor em função do tempo e da vazão do ar do lado quente no regime transitório.

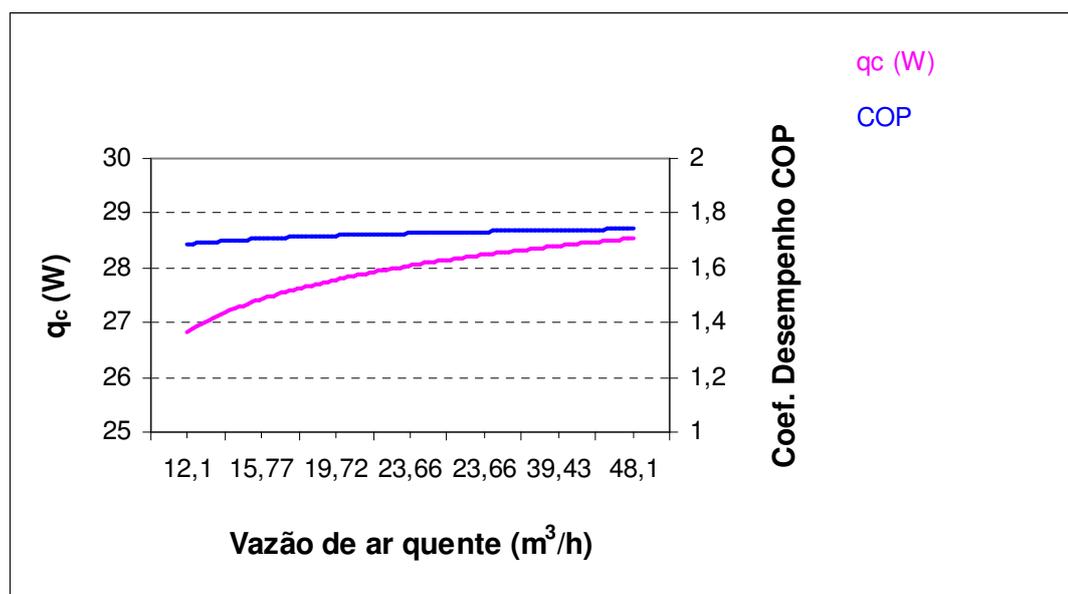


Figura 4.4 - Coeficiente de desempenho e taxa de bombeamento de calor em função do tempo (regime transitório)

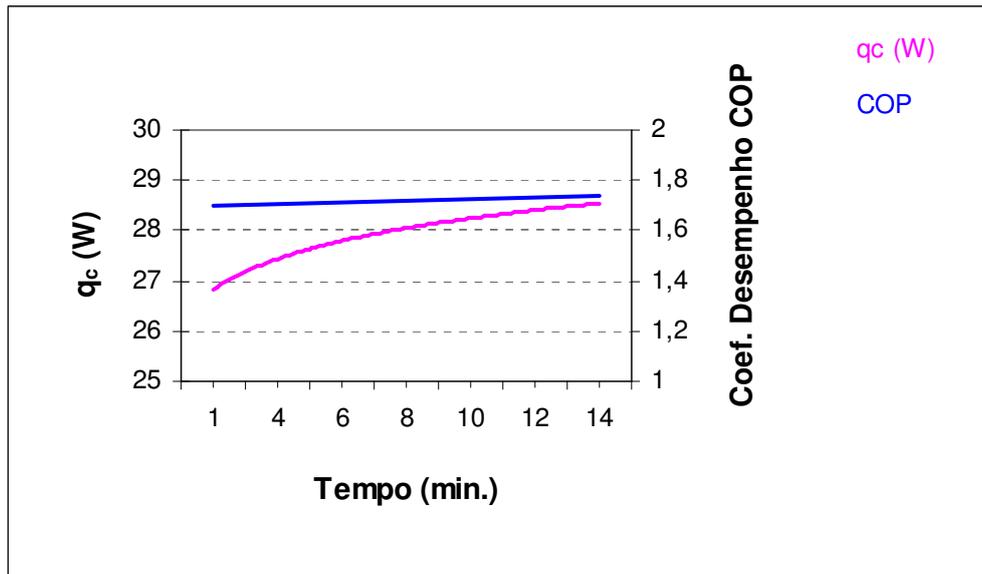


Figura 4.5 - Coeficiente de desempenho e taxa de bombeamento de calor em função da vazão do ar do lado quente (regime transitório)

No gráfico da Figura 4.4 verifica-se que com a variação do tempo o coeficiente de desempenho e a taxa de bombeamento de calor aumentam, tendendo-se a estabilizar no regime permanente com valores médios de  $T_h$  e  $T_c$  e para corrente aplicada praticamente constante. Observa-se o mesmo no gráfico da Figura 4.5 em função da variação da vazão do ar quente.

#### 4.4 REGIME PERMANENTE

Considerando-se para regime permanente o espaço de tempo de 14 a 30 minutos aproximadamente, elaborou-se os cálculos dos principais parâmetros conforme expostos no capítulo 2.

A partir dos dados do módulo termoelétrico apresentado no item 4.2.3, da corrente e tensão elétricas aplicadas e dos dados da tabela da figura 4.3, das equações 2.26, 2.27, 2.28,

2.30.1, 2.69.1 e sendo  $w = \left(1 + Z\bar{T}\right)^{\frac{1}{2}}$ , calcula-se:

O coeficiente de desempenho – COP ( $\phi$ ), a taxa de bombeamento de calor ( $Q_c$ ), a tensão elétrica no módulo ( $V$ ), a potência consumida ( $P$ ), a máxima variação de temperatura ( $\Delta T_{max}$ ) quando  $Q_c=0$  e o  $w$ , respectivamente.

Das equações 2.44, 2.50 e 2.52, calcula-se a corrente ótima  $I_{ot}$ , a tensão elétrica resultante da corrente ótima  $V_{ot}$  e a potência  $P_{ot}$  que maximiza o coeficiente de desempenho (COP) e da equação 2.49 obtém-se o coeficiente de desempenho máximo ( $\phi_{m\acute{a}x}$ ).

Para a máxima taxa de bombeamento de calor, das equações 2.61.1, 2.62 e 2.63.1 calcula-se a corrente elétrica ( $I_{m\acute{a}x}$ ) que maximiza a taxa de bombeamento de calor, a tensão elétrica ( $V_{m\acute{a}x}$ ) para essa condição e a taxa máxima de calor ( $Q_{cm\acute{a}x}$ ).

Os dados para regime permanente e os resultados obtidos são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 4.4 - Dados para regime permanente (14 a 30 minutos)

Medições	I (A)	Tensão (V)	Th (°C)	Tc (°C)	Th/Tc	$\Delta T$ (°C)	Tempo (min)
Ensaio 1	2,67	11,17	31,88	21,878	1,034	10	14-30
Ensaio 2	2,62	11,21	32,14	22,633	1,032	9,511	14-30
Ensaio 3	2,59	11,2	32,49	21,756	1,036	10,733	14-30
Ensaio 4	2,59	11,16	31,68	22,233	1,032	9,444	14-30
Ensaio 5	2,48	11,3	31,63	20,811	1,037	10,822	14-30
Ensaio 6	2,64	11,2	33,82	22,022	1,04	11,8	14-30
Ensaio 7	2,64	11,22	31,69	21,544	1,034	10,144	14-30

Tabela 4.5 - Resultados dos principais parâmetros do sistema no regime permanente

Medições	W	V	q <sub>c</sub> (W)	P (W)	COP (φ)	ΔT <sub>max</sub> (°C)	I <sub>ot</sub> (A)	V <sub>ot</sub> (V)	P <sub>ot</sub> (W)	COP (φ <sub>máx</sub> )	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	Q <sub>c máx</sub>
Ensaio 1	1,34	6,174	28,25	16,484	1,714	0,641	0,705	2,008	1,416	3,894	7,139	15,65	49,421
Ensaio 2	1,34	6,043	28,1	15,832	1,775	0,686	0,669	1,908	1,277	4,134	7,157	15,66	49,923
Ensaio 3	1,34	6,042	27,14	15,648	1,734	0,634	0,755	2,154	1,629	3,6	7,136	15,68	49,04
Ensaio 4	1,34	5,976	27,79	15,477	1,8	0,662	0,666	1,896	1,262	4,155	7,147	15,64	49,807
Ensaio 5	1,34	6,449	26,10	14,92	1,74	0,58	0,763	2,176	1,664	3,545	7,113	15,64	48,653
Ensaio 6	1,34	6,203	27,16	16,375	1,659	0,65	0,83	2,364	1,961	3,246	7,142	15,75	48,646
Ensaio 7	1,34	6,118	27,86	16,151	1,725	0,622	0,716	2,038	1,459	3,825	7,13	15,64	49,232

Os gráficos a seguir representam os resultados

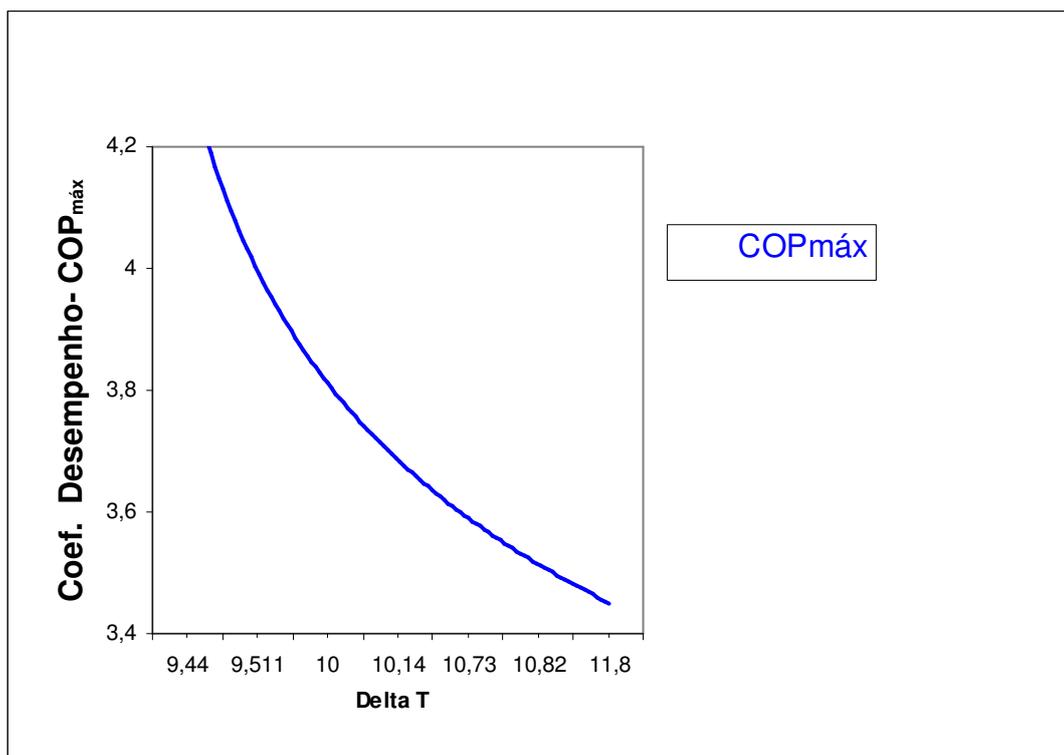


Figura 4.6 - Coeficiente de desempenho em função da variação da temperatura ΔT (T<sub>h</sub>-T<sub>c</sub>)

Nota-se que o coeficiente de desempenho aumenta quando o ΔT diminui. Isto está de acordo com a Figura 2.7 - Desempenho de uma associação termoelétrica em função da diferença de temperatura (HEIKES & URE JR, 1961), quando a diferença de temperatura diminui o coeficiente de desempenho tende a um valor máximo.

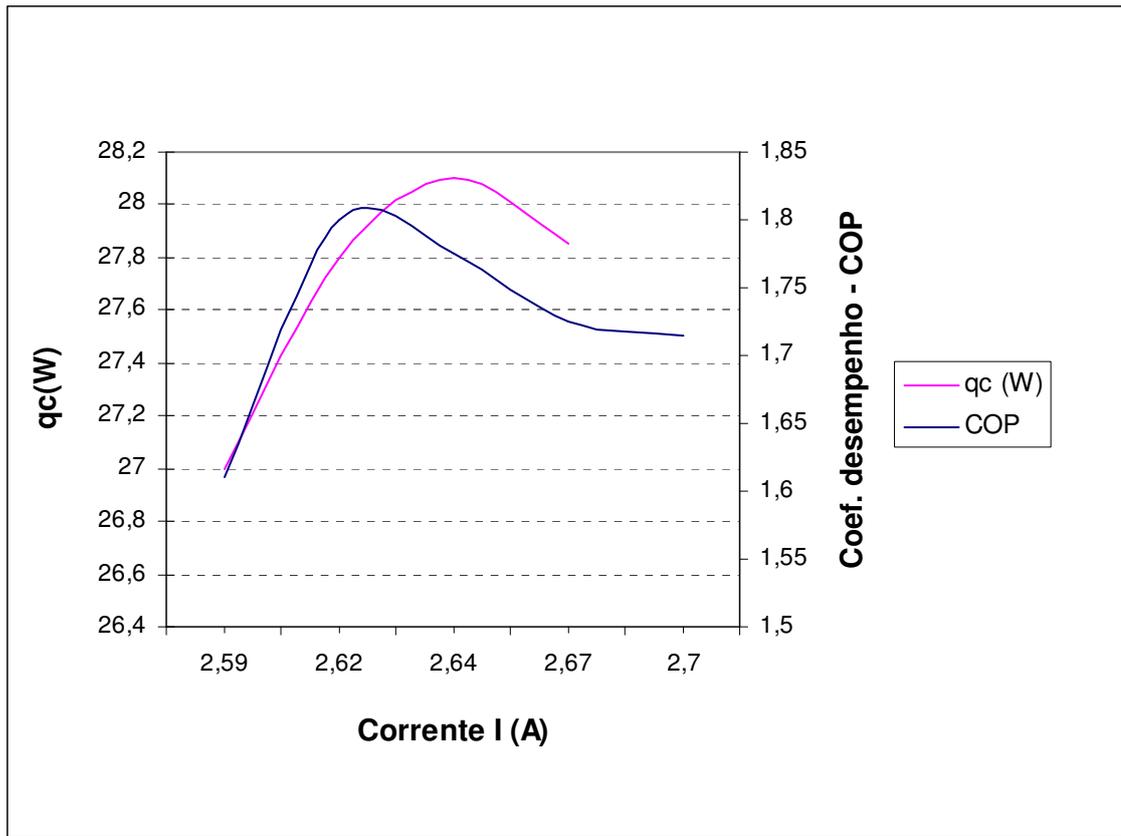


Figura 4.7 - Coeficiente de desempenho e a taxa de bombeamento de calor como função da corrente elétrica.

Nota-se que o coeficiente de desempenho aumenta quando a corrente aumenta, mas diminui com o aumento do valor da taxa de bombeamento de calor e tende a estabilizar-se, o mesmo ocorre com a taxa de bombeamento de calor. Deve-se procurar o ponto de melhor desempenho ajustando-se a corrente e a tensão elétrica aplicadas. Isto está de acordo com a Figura 2.8 - Coeficiente de desempenho e a taxa de bombeamento de calor como função da corrente para diferença de temperatura  $\Delta T$  e área  $\gamma$  constantes (HEIKES & URE JR, 1961).

Na figura acima o comportamento é de um ensaio prático e verifica-se que tanto o coeficiente de desempenho quanto a taxa de bombeamento de calor variam praticamente proporcionais, ficando pouco diferente da Figura 2.8, quando a corrente é baixa, o coeficiente é maior que a taxa de bombeamento. Porém fazendo-se a análise do comportamento do coeficiente e da taxa de bombeamento de calor isolados verifica-se que está de acordo com a Figura 2.8.

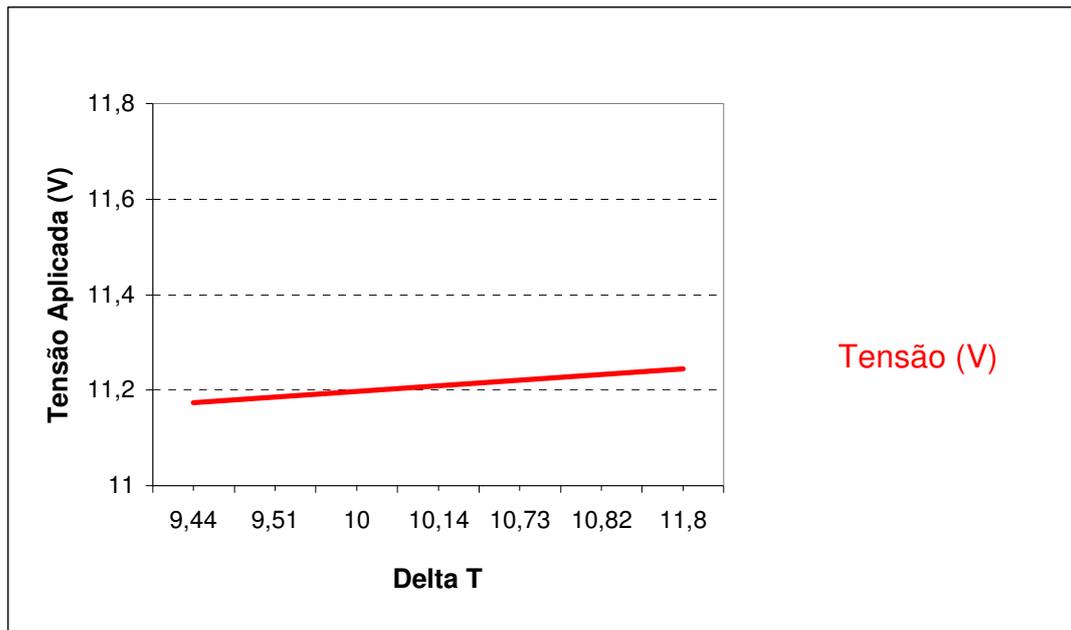


Figura 4.8 - Variação da temperatura  $\Delta T$  ( $T_h - T_c$ ) em função da tensão aplicada

Verifica-se conforme teoria e informação do fabricante que para tensões maiores, maior é a variação da temperatura entre as placas quente e fria do módulo termoelétrico, isto observando-se outros parâmetros como vazão de ar quente.

## 4.5 CONCLUSÕES

Nos ensaios observou-se que os parâmetros mais importantes para a análise do desempenho de um sistema termoelétrico para condicionamento de ar são; a máxima taxa de bombeamento de calor, a máxima diferença de temperatura entre as placas do lado quente e do lado frio do módulo termoelétrico, o máximo coeficiente de desempenho (COP) e a máxima retira de calor do lado quente aplicando uma vazão de ar adequada, e também deve-se ter um sistema de isolamento térmico ótimo entre os lados quente e frio do módulo.

A taxa de bombeamento de calor é função da corrente circulante e a maximização do coeficiente de eficácia para cada diferença de temperatura é feita ajustando-se a tensão e a corrente elétrica aplicadas, a vazão de ar do lado quente ajustando a rotação do motor do ventilador, procurando para essas variáveis o melhor ponto operacional aplicando um sistema de controle automático.

Nos ensaios os dados obtidos estão de acordo com a teoria conforme Heikes e Ure Jr. e também com os dados do módulo termoelétrico fornecidos em catálogo pelo fabricante.

A diferença de temperatura de entrada e saída do lado frio foi pequena e a diferença entre as placas quente e fria do módulo também, talvez devido ao sistema de isolamento térmica e a corrente aplicada ter sido baixa.

Mas melhorando-se a arquitetura de montagem, materiais de isolamento e utilizando-se módulos termoelétricos com maior número de associações, maior diferença de temperatura e maior capacidade de bombeamento de calor, torna-se possível aumentar a diferença de temperatura de entrada e saída do lado frio

O coeficiente de desempenho e a máxima diferença de temperatura do lado quente e do lado frio são extremamente influenciados pela “figura de mérito” do material semicondutor e os valores encontrados ainda são baixos.

O desenvolvimento de novos materiais termoelétricos com valores de figura de mérito maior, tecnologias apropriadas e isolamento eficiente entre os lados quente e frio proporcionarão melhores resultados de aplicações específicas de sistema termoelétrico em condicionamento de ar.

## REFERENCIAS

Astrain, D.; Vián, J. G.; Domínguez, M. – Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation - *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 2183-2200.

Bojic, M; Savanovic, G.; Trifunovic, N.; Radovic, L. Saljic, D. - Thermoelectric cooling of a train carriage by using a coldness-recovery device. - *Energy*, vol.22, No. 5, p.493-500, 1997.

Chen, J.; Zhou, Y.; Wang, H.; Wang, J. T. - Comparison of the optimal performance as single-stage and two-stage thermoelectric refrigeration systems. - *Applied Energy* 73 (2002) 285-298.

Dai, Y. J.; Wang, R. Z.; Ni, L. - Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells. - *Renewable Energy* 28 (2003) 949-959.

Fialho, A. B., *Instrumentação Industrial - 8ª Edição* – Editora Érica - 2002 – São Paulo Brasil, 280 p.

Göktun, S. - Design considerations for a thermoelectric refrigerator. - *Energy Conv. Mgmt*, Vol.36, No.12, p.1197-1200, 1995.

Heikes, R. R., Ure Jr., R. W. - *Thermoelectricity: Science and Engineering* Interscience publisher's - New York 1961, 569 p.

Huang, B. J., Duang, C. L. - System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler. - *International Journal of Refrigeration* 23 (2000) 197-207.

Huang, B. J., Chin C. J. e Duang, C. L. - A Design method of thermoelectric cooler. *International Journal of Refrigeration* 23 (2000) 208-218.

Kurosaki, K., Uneda, H., Muta H. e Yamanaka S. – Thermoelectric properties of thallium antimony telluride – *Journal of Alloys and Compounds* 376 (2004) 43-48.

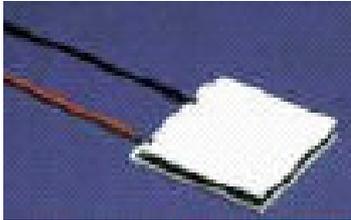
Lindler, K. W. - Use of multi-stage cascades to improve performance of thermoelectric heat pumps. - *Energy Convers. Mgmt*, vol. 39, No.10, p.1009-1014, 1998.

Luo, J.; Chen, L.; Sun, F.; Wu, C. Optimum allocation of heat transfer surface area for cooling load and COP optimization of a thermoelectric refrigerator. *Energy Convers. Mgmt* 44 (2003) 3197-3206.

Sofrata, H. - Heat rejection alternatives for thermoelectric refrigerators. - Energy Conv. Mgmt, vol.37, No.3, p.269-280, 1996.

Zerbini, E. J. e Simões, R. S. E. – Fundamentos da Termodinâmica Clássica - Tradução da 4ª edição americana – Ed. Edgar Blücher Ltda – 1995 – São Paulo – Brasil, 589 p.

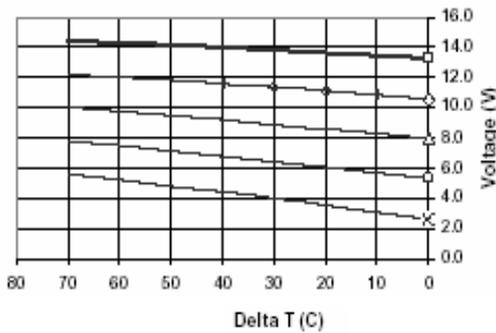
- ANEXO 1 - Módulo Termoeléctrico modelo HT6-12-40



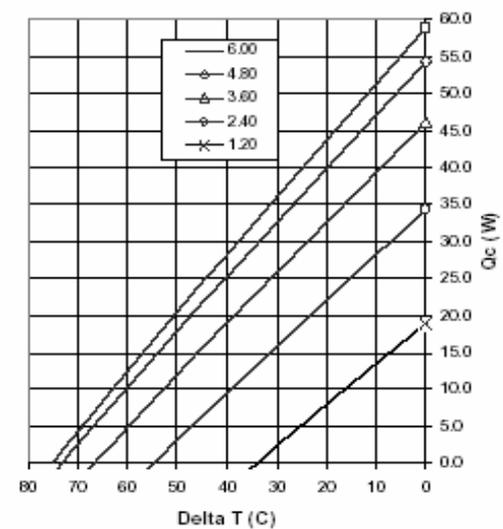
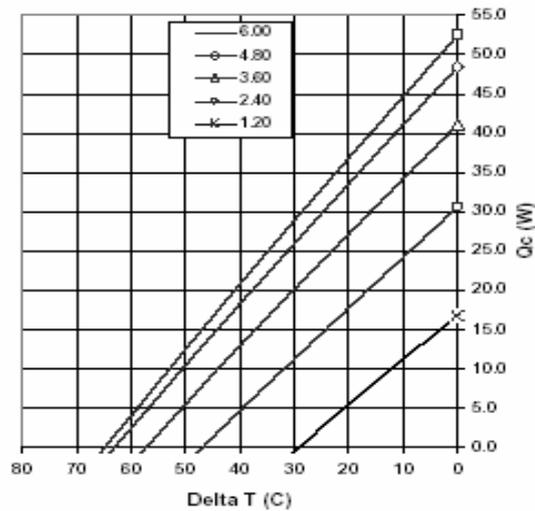
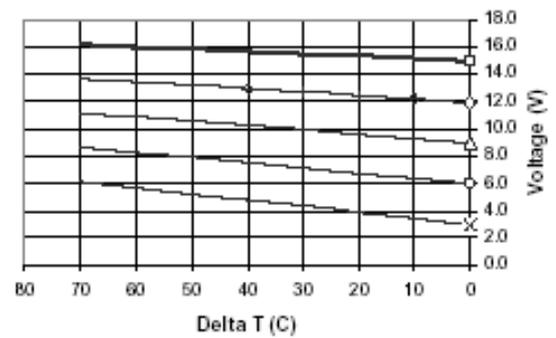
**Performance Specifications**

Hot Side Temperature (°C)	25 °C	50 °C
Qmax (Watts)	52	58
DeltaTmax (°C)	63	73
I <sub>max</sub> (Amps)	6.0	5.98
V <sub>max</sub> (Volts)	14.4	16.1
Module Resistance (Ohms)	2.127	2.379

**Performance Curves – Th = 25°C**



**Performance Curves – Th = 50°C**



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)