

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA  
E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoelétrico**

Rômulo Pierre Batista dos Reis

Campina Grande  
Setembro/2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E**  
**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoelétrico

Rômulo Pierre Batista dos Reis

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Carlos José de Araújo

Agência Financiadora: CNPq (Proc.135901/2008-1)

Campina Grande

Setembro/2010

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

R375d Reis, Rômulo Pierre Batista dos.

Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoelétrico / Rômulo Pierre Batista dos Reis. — Campina Grande, 2010.

58f. : il. col.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientador: Profº. Drº. Carlos José de Araújo.

1. Termometria Elétrica. 2. Memória de Forma - Ligas. 3. Pastilha Termoelétrica. 4. Temperaturas de Transformação. I. Título.

CDU – 536.53(043)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus, o autor da vida que me deu saúde e inteligência, e em segundo lugar a todos os amigos, familiares e professores que de uma forma ou de outra me incentivaram e me capacitaram para que eu pudesse concluir este trabalho. Também dedico este trabalho à minha amada noiva.

## **CURRICULUM VITAE DO CANDIDATO**

- Engenheiro Mecânico pela UFCG (2008).
- Técnico em Telecomunicações pela ETER (1995)

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO  
TÉRMICA DE ATUADORES DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA USANDO  
O EFEITO TERMOELÉTRICO.

**Rômulo Pierre Batista dos Reis**

Dissertação Aprovada em 22/09/2010 pela banca examinadora constituída dos  
seguintes membros:



---

Dr. Carlos José de Araújo

Orientador

UAEM/UFCG



---

Dr. Walman Benício de Castro

Examinador Interno

UAEM/UFCG

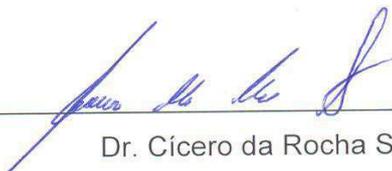


---

Dr. José Sérgio da Rocha Neto

Examinador Externo

UAEE/UFCG



---

Dr. Cícero da Rocha Souto

Examinador Externo

DEE/CT/UFPB

## AGRADECIMENTOS

Foi muito gratificante a experiência de executar este trabalho. Neste instante penso em agradecer a muitas pessoas, porém fico receoso de omitir alguém. Por isso, inicio agradecendo as pessoas que eu conheço e que já estão comigo há um bom tempo. Entretanto, é lógico que eu não poderia deixar de enfatizar alguns agradecimentos especiais.

Começo com minha família, agradecendo a meus pais e irmãos, que me apoiaram em meus objetivos. À minha noiva Ana Paula, que soube compreender as muitas horas “perdidas” na frente do computador e no LaMMEA, os momentos de ausência e de irritação, e mesmo assim continuou me amando. Eu também a amo muito. Ao meu orientador Professor Carlos José de Araújo, que me deu a oportunidade de conhecer e desbravar o mundo da pesquisa científica junto ao LaMMEA, meu segundo lar, e é claro, à Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica e todos os seus professores bem como ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e seus professores, que me capacitaram, gerando o conhecimento necessário para uma obra deste nível.

Destaco ainda os Professores Cícero da Rocha Souto e Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, que me apoiaram de todas as formas possíveis, cada um na sua área, me disponibilizando informações que foram cruciais no sucesso deste trabalho.

Agradeço a Deus que é o principal e mais importante agradecimento.

# DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE ATUADORES DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA USANDO O EFEITO TERMOELÉTRICO

## RESUMO

Nesta dissertação apresenta-se o desenvolvimento de um equipamento de análise térmica cuja técnica termoanalítica utilizada é a termoeletrometria. O equipamento desenvolvido é direcionado a caracterização das temperaturas de transformação de fase e histerese térmica de Ligas com Memória de Forma (LMF). Para tanto, foi projetada e fabricada uma plataforma de teste capaz de submeter uma amostra de LMF a um programa controlado de temperatura, armazenando e apresentando em tempo real as medidas da resistência elétrica e/ou os sinais de tensão elétrica na amostra. Essa plataforma utiliza uma pastilha termoeletrica que funciona segundo o efeito Peltier para produzir o resfriamento e aquecimento da amostra de LMF. O equipamento permite realizar ciclos térmicos sucessivos entre temperaturas mínimas e máximas situadas entre  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com controle de taxa de resfriamento e aquecimento através de um controlador fuzzy. Para validar o sistema desenvolvido foram feitos testes em amostras de LMF da família Ni-Ti, além da determinação da resistividade elétrica do cobre elétrico comercialmente puro. Os resultados obtidos permitiram o levantamento das curvas de caracterização Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) versus Resistência ( $\Omega$ ), as quais apresentaram comportamentos conforme previsto pela literatura. De um ponto de vista prático, o trabalho desenvolvido originou um equipamento de caracterização experimental para o estudo fundamental de atuadores de LMF, o qual será constantemente utilizado nas pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UAEM/CCT/UFCG.

# DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR THERMAL CHARACTERIZATION OF SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS USING THE THERMOELECTRIC EFFECT

## ABSTRACT

This work presents a development of equipment for thermal analysis which used thermoelectrometry technique. The equipment is directed to the characterization of transformation temperatures and thermal hysteresis of shape memory alloys (SMA). Therefore, it was designed and assembled an test platform for submitting a SMA sample to a controlled temperature program, also hold real-time measurements of electrical resistance or voltage signals in the SMA sample. This platform has as main component a thermoelectric tablet that works by Peltier effect to produce cooling and heating of the SMA sample. The device allow make successive thermal cycles between minimum and maximum temperatures in the temperature range from - 50 °C to 150 °C, with controlled rate cooling and heating through the implementation of a fuzzy controller. To validate the developed system some tests were performed using Ni-Ti SMA samples. In addition, the electrical resistivity of commercial copper was also determined with the apparatus. The obtained results of Resistance ( $\Omega$ ) vs. Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) characterization curves are in accord with literature. From a practical standpoint, the work led to experimental characterization equipment for the fundamental study of shape memory alloys, which will be constantly used in the research developed by the Multidisciplinary Laboratory of Active Materials and Structures (LaMMEA) of UAEM / CCT / UFCG.

## **PUBLICAÇÕES**

REIS, R. P. B., DE ARAÚJO, C. J., GOMES, A.A.C., NETO, J. F. C., RODRIGUES, L.F.A., Desenvolvimento de um Sistema de Medição de Temperaturas de Transformação em Ligas Com Memória de Forma Utilizando Pastilha Termoelétrica. In: **18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais (CBECiMat - 2008)**, Porto de Galinhas – P E, Brasil, pp. 1-8, 2008.

REIS, R. P. B., DE ARAÚJO, C. J.; GOMES, A.A.C.; NETO, J.F.C.; RODRIGUES, L.F.A.; Desenvolvimento de um Sistema de Ciclagem Térmica Utilizando o Efeito Termoelétrico: Aplicação a Caracterização de Ligas com Memória de Forma. **V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2008)**, Salvador - BA, Brasil, pp 1-8, 2008.

DA SILVA, N.J.; REIS, R.P.B.; SILVA, J.A.; SIMÕES, J.B.; DE ARAUJO, C.J. Manufacture and electro-thermomechanical characterization of a SMA copper-based cylindrical connector. **Materials Science Forum**, v. 643, 2010. pp. 29-35.

REIS, R. P. B.; DE ARAÚJO, C. J.; MONTEIRO, E. F. **Sistema de Caracterização de Ligas com Memória de Forma Utilizando o Efeito Termoelétrico**. Patente INPI-RE/PB 000120. Depósito em: 09/08/2010. Agosto 2010.

Índice.....	Pag.
<b>RESUMO .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>PUBLICAÇÕES.....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>4</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
<b>4.1. Ligas com Memória de Forma (LMF) e Medidas de Resistência Elétrica .....</b>	<b>6</b>
<b>4.2. Pastilhas Termoelétricas .....</b>	<b>11</b>
<b>4.3. Módulos Termoelétricos versus LMF.....</b>	<b>13</b>
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1. Fluxograma da Metodologia .....</b>	<b>17</b>
<b>5.2. Desenvolvimento do Equipamento .....</b>	<b>19</b>
<b>5.3. Concepção e montagem da estrutura física .....</b>	<b>21</b>
<b>5.4. Elaboração e montagem da parte eletrônica .....</b>	<b>25</b>
<b>5.5. Desenvolvimento do programa de controle e aquisição de dados .....</b>	<b>31</b>
<b>5.6. Projeto e simulação de um controle baseado em lógica FUZZY em ambiente computacional.....</b>	<b>34</b>
<b>5.7. Experimentos de validação do equipamento.....</b>	<b>38</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>6.1. Características de desempenho do sistema de controle .....</b>	<b>42</b>
<b>6.2. Resultados dos experimentos de validação do equipamento .....</b>	<b>48</b>
<b>6.2.1. Determinação da resistividade elétrica do cobre comercial .....</b>	<b>48</b>
<b>6.2.2. Caracterização térmica das LMF.....</b>	<b>50</b>
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
TABELA 5.6-1 – BASE DE REGRAS DO CONTROLADOR FUZZY APLICADO AO MÓDULO PELTIER.....	36
TABELA 5.7-1 - DIMENSÕES DE TODAS AS AMOSTRAS USADAS .....	41
TABELA 6.1-1 – VALORES DAS CARACTERÍSTICAS EM RESPOSTA AO DEGRAU POSITIVO. .....	44
TABELA 6.1-2 – VALORES DAS CARACTERÍSTICAS EM RESPOSTA AO DEGRAU POSITIVO .....	45
TABELA 6.2.2-1 - TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 4.1.1 - PARÂMETROS OBTIDOS ANTES A APÓS 100 CICLAGENS TÉRMICAS ILUSTRANDO A DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS CRÍTICAS ( $M_i$ , $M_f$ , $A_i$ E $A_f$ ) E DA HISTERESE DA TRANSFORMAÇÃO ( $H_T$ ) DURANTE UM CICLO TÉRMICO DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO DE UMA AMOSTRA DE LMF. (REIS <i>ET AL.</i> , 2006) .....	7
FIGURA 4.1.2 - CURVAS OBTIDAS POR DSC ILUSTRANDO A DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS CRÍTICAS ( $M_i$ , $M_f$ , $A_i$ E $A_f$ ) DURANTE UM CICLO TÉRMICO DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO. (NAGAI E OISHI, 2006) .....	8
FIGURA 4.1.3 - PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA EM AMOSTRAS DE LMF (SMRT). FONTE: (REIS <i>ET AL.</i> , 2006).....	9
FIGURA 4.1.4 - CURVAS DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO COMPARATIVAS ENTRE O SMRT-PLUS E O SMRT. FONTE: (REIS <i>ET AL.</i> 2008c).....	10
FIGURA 4.2.1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA PASTILHA TERMOELÉTRICA. (A) REFRIGERADOR TERMOELÉTRICO. (B) GERADOR TERMOELÉTRICO FONTE: (VAN WYLEN, S. E BORGNAKKE, 2003) .....	11
FIGURA 4.2.2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CÉLULA DE PELTIER. FONTE: (LAIRD, 2010) .....	12
FIGURA 4.3.1 - DIAGRAMA DA FREQUÊNCIA DE ATUAÇÃO COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES MATERIAIS ATIVOS QUE APRESENTAM ACOPLAMENTO DIRETO. FONTE: (LAGOUDAS, 2008).....	14
FIGURA 4.3.2 – ESQUEMA DE UMA MONTAGEM EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO FORÇADO PARA LMF. FONTE: (POTAPOV, 1998) .....	15
FIGURA 4.3.3 – FOTOGRAFIA DO ATUADOR LMF COM RESFRIAMENTO FORÇADO EM UM MODELO EM TAMANHO REAL DE UM CORAÇÃO HUMANO FONTE: (YAMBE, MARUYAMA, <i>ET AL.</i> , 2001) .....	16
FIGURA 4.3.4 – MONTAGEM MECÂNICA DE UM ATUADOR LMF (FIO SMA) COM RESFRIAMENTO FORÇADO POR PASTILHA TERMOELÉTRICA. FONTE: (ROMANO E TANNURI, 2008).....	17

FIGURA 5.1.1 - FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DA METODOLOGIA EMPREGADA.....	18
FIGURA 5.2.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS ILUSTRATIVO DO EQUIPAMENTO PROPOSTO...	19
FIGURA 5.2.2 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EQUIPAMENTO PROPOSTO. (1) PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE; (2) MICROCOMPUTADOR; (3) MICROTERMOPAR.....	20
FIGURA 5.3.1- SISTEMA DE DISSIPAÇÃO TÉRMICA OPERANDO COM CIRCULAÇÃO DE ÁGUA. (A) MONTAGEM DO DISSIPADOR NA TAMPA DO RESERVATÓRIO. (B) CONEXÕES INSTALADAS NAS LATERAIS DO RECIPIENTE. (C) DETALHE DO SENTIDO DE FLUXO DO FLUÍDO. FONTE: (REIS, 2008A).....	21
FIGURA 5.3.2 – PROJETO DO EVAPORADOR PARA O MINI-REFRIGERADOR. ....	22
FIGURA 5.3.3 - ESTRUTURA DESENVOLVIDA PARA RECEBER O EVAPORADOR.....	23
FIGURA 5.3.4 - FOTOGRAFIA DA REGIÃO PARA INSTALAÇÃO DA AMOSTRA DE LMF NO EQUIPAMENTO. ....	24
FIGURA 5.3.5 - SEQUENCIA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO EQUIPAMENTO SMRT-PLUS (7).....	25
FIGURA 5.4.1 – CIRCUITO ELÉTRICO DA INTERFACE ELÉTRICA A.....	26
FIGURA 5.4.2 – TELA DA SIMULAÇÃO DA INTERFACE ELÉTRICA A NO PROGRAMA PROTEUS.....	27
FIGURA 5.4.3 – CIRCUITO ELÉTRICO DA INTERFACE ELÉTRICA B.....	28
FIGURA 5.4.4 - TELA DA SIMULAÇÃO DA INTERFACE ELÉTRICA B NO PROGRAMA PROTEUS.....	29
FIGURA 5.4.5 – CONDICIONADOR DE SINAIS PROPOSTO PELA ANALOG DEVICES.....	29
FIGURA 5.4.6 - ESQUEMA DE CONEXÕES ENTRE O CIRCUITOS ELÉTRICOS. ....	30
FIGURA 5.5.1 - ARQUITETURA DE UM CONTROLADOR FUZZY BASEADO EM REGRAS.	32
FIGURA 5.5.2 – PAINEL FRONTAL DO VI .....	33
FIGURA 5.6.1 – DIAGRAMA EM BLOCOS DO CONTROLADOR FUZZY PARA O MÓDULO PELTIER.....	35
FIGURA 5.6.2 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA FUZZY ADOTADAS PARA CADA VARIÁVEL DEFINIDA.....	37
FIGURA 5.6.3 – SUPERFÍCIE DE CONTROLE FUZZY. ....	38
FIGURA 5.7.1 –REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA AMOSTRA DE LÂMINA DELGADA DE COBRE ELÉTRICO.....	39

FIGURA 5.7.2 - MICROSOLDADORA KERNIT SMP 3000 GOLD (A) E FITA DE Ni-Ti COM O MICROTERMOPAR E OS ELETRODOS SOLDADOS (B). .....	40
FIGURA 5.7.3 - AMOSTRA DE LMF NiTiCu COM OS ELETRODOS SOLDADOS. ....	41
FIGURA 6.1.1 - CURVAS T- T E V – T DO MÓDULO PELTIER. ....	42
FIGURA 6.1.2 - RESPOSTA A UMA EXCITAÇÃO EM DEGRAU POSITIVO DE TEMPERATURA. ....	43
FIGURA 6.1.3 - RESPOSTA A UMA EXCITAÇÃO EM DEGRAU NEGATIVO DE TEMPERATURA. ....	44
FIGURA 6.1.4 - RESPOSTA A UM SINAL DE REFERÊNCIA EM FORMA DE DEGRAU VARIÁVEL .....	45
FIGURA 6.1.5 - ERRO ESTIMADO PARA O EQUIPAMENTO EM REGIME ESTACIONÁRIO. .	46
FIGURA 6.1.6 - RESPOSTA DO EQUIPAMENTO A VÁRIOS CICLOS TÉRMICOS DE UM SINAL DE REFERÊNCIA EM FORMA TRIANGULAR. ....	47
FIGURA 6.1.7 - ERRO ENTRE OS SINAIS DE REFERÊNCIA E MEDIDO DURANTE O EXPERIMENTO DA FIGURA 6.1.6. ....	48
FIGURA 6.2.1.1 - CURVA R-T DO COBRE COMERCIAL.....	49
FIGURA 6.2.2.1 - CURVA R-T PARA A AMOSTRA LMF 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% EM PESO).....	50
FIGURA 6.2.2.2 - CURVA DE DSC OBTIDA PARA A AMOSTRA DE LMF Ni-Ti-Cu. ....	51
FIGURA 6.2.2.3 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA A FITA Ni-Ti EQUIATÔMICA.....	52
FIGURA 6.2.2.4 - CURVA DE DSC OBTIDA PARA A FITA DA LIGA Ni-Ti EQUIATÔMICA..	52

## **SÍMBOLOS E ABREVIACÕES**

$\Delta ER_T$ - Taxa de variação da variável erro em temperatura fuzzyficada

**A**- área da seção transversal

**A<sub>f</sub>** - Temperatura de Terminio da Transformação Austenitica;

**A<sub>i</sub>** - Temperatura de Inicio da Transformação Austenitica;

**CC** – Corrente Contínua;

**DC** - Tensão elétrica continua;

**der**- variação da variável erro;

**DMA** - Termomecanometria dinâmica;

**DSC** - Calorimetria Exploratória Diferencial;

**DTA** - Análise Térmica Diferencial;

**dT<sub>máx</sub>**- Máxima diferença de temperatura entre os lados quente e frio do Módulo;

**EMF** – Efeito Memória de Forma;

**EMFD** - Efeito Memória de Forma Duplo;

**EMFS** - Efeito Memória de Forma Simples;

**Er** - variável erro;

**ER<sub>T</sub>**- Variável erro em temperatura fuzzyficada;

**ETER** – Escola Técnica Redentorista

**GPIB**- General Purpose Interface Bus;

**H<sub>t</sub>** - Histerese da Transformação;

**I** - Corrente elétrica;

**Imáx** - Corrente no Módulo Peltier a Q<sub>máx</sub>;

**LMF** - Ligas com efeito de Memória de Forma;

**M<sub>f</sub>** - Temperatura de Terminio da Transformação Martensitica;

**M<sub>i</sub>**- Temperatura de Inicio da Transformação Martensitica;

**NB**- Negativo grande;

**NM** - Negativo médio

**NS** - Negativo pequeno;

**NVB** - negativo muito grande;

**PB** - Positivo grande;

**PC** - Personal Computer;

**PID** - Proporcional Integral Derivativo;

**PM** - Positivo médio;

**POS** - Positivo pequeno;

**PVB**- Positivo muito grande;

**Q<sub>máx</sub>** - Capacidade máxima de transferência de calor do Módulo Peltier;

**R** – Resistência Elétrica;

**R<sub>f</sub>** - Temperatura de Término da Transformação Romboédrica;

**R<sub>i</sub>** - Temperatura de Início da Transformação Romboédrica;

**SMRT** - Sistema de Medição da Resistência elétrica em função da Temperatura;

**SMRT-Plus** - SMRT utilizando o efeito Peltier;

**T** – Temperatura;

**t** – Tempo;

**T<sub>c</sub>**- Temperatura do lado “frio” do módulo de Peltier;

**T<sub>h</sub>**- Temperatura do lado “quente” do módulo de Peltier;

**t<sub>p</sub>** - instante de pico ;

**t<sub>r</sub>** - tempo de subida ;

**T<sub>ref</sub>**- Temperatura de referência;

**t<sub>s</sub>** - tempo de acomodação

**USB** - Universal Serial Bus;

**V** - Tensão elétrica;

**V** - Variável tensão elétrica Fuzzyficada;

**V<sub>máx</sub>** - Tensão elétrica no Módulo Peltier a Q<sub>máx</sub>;

**Z<sup>-1</sup>**- retardo de tempo;

**ZE** – Neutro;

**Ω** – Unidade de resistência elétrica (Ohm).

# 1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) constituem um grupo distinto de materiais metálicos, que demonstram a capacidade de regressar a forma após sofrer uma deformação plástica por meio de um aquecimento subsequente. Essa capacidade de recuperar a forma foi denominada por Efeito Memória de Forma Simples (EMFS). A repetição sucessiva de ciclos termomecânicos de EMFS conduz a um Efeito Memória de Forma de Duplo sentido ou reversível (EMFD), para o qual não se faz necessária a aplicação de carga para a deformação do material. No EMFD a LMF se deforma espontaneamente quando submetido a uma fonte quente (alta temperatura) ou fria (baixa temperatura). Estes fenômenos de memória de forma estão intimamente associados a uma transformação de fase no estado sólido, do tipo martensítica, cristalograficamente reversível (OTSUKA e WAYMAN, 1998), que ocorre internamente na LMF. Percebe-se então que tais fenômenos estão associados diretamente à temperatura em que o material se encontra, como também, que origina importantes alterações em uma série de propriedades físicas e mecânicas do material. Estas temperaturas de transição entre as fases, martensítica para o frio e austenítica para o quente, dependem da composição química da liga, do histórico termomecânico e das condições de carregamento mecânico aplicado ao material. A literatura apresenta tais temperaturas indicando o início ( $M_i$ ) e o final ( $M_f$ ) da transformação martensítica a partir da austenita durante um resfriamento, também conhecida como transformação direta, e o início ( $A_i$ ) e final ( $A_f$ ) da transformação reversa partindo da martensita para a austenita durante um aquecimento (OTSUKA e WAYMAN, 1998). A determinação destas temperaturas de transformação de fase pode ser realizada por técnicas de análise térmica.

A expressão análise térmica refere-se a um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física de uma substância e/ou seus produtos de reação é

medida como função da temperatura ou tempo, enquanto a substância é submetida a um programa controlado de temperatura (ABRATEC, 2007). A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a Análise Térmica Diferencial (DTA) e mais recentemente a termomecanometria dinâmica ou Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) (CHANG e WU, 2008) são as técnicas termoanalíticas mais difundidas e empregadas para a determinação das temperaturas de transformação martensítica direta (resfriamento) e reversa (aquecimento) das LMF. Existem no mercado equipamentos disponíveis de diversos fabricantes de países industrializados (Estados Unidos, Japão, Alemanha e outros) que se utilizam destas técnicas. No entanto, estes equipamentos possuem valores relativamente altos, podendo custar de \$15.000,00 a \$50.000,00 dólares para os modelos mais simples de DTA e até mais de \$100.000,00 para os modelos mais sensíveis de DSC (ERICKSON, 1999). Além disso, esses equipamentos necessitam o uso de consumíveis como gás de arrasto, no caso do DSC, e fluidos para refrigeração, como nitrogênio líquido para o DMA. No desenvolvimento de aplicações de LMF como, por exemplo, micro atuadores com memória de forma, a aquisição e aplicação destes equipamentos comerciais, apenas para a determinação das temperaturas de transformação de fase, se tornam onerosas além de subutilizar tais equipamentos.

Neste contexto, é importante procurar alternativas não comerciais para se obter respostas ou informações convenientes para a determinação das temperaturas de transformação de fase em atuadores de LMF, tanto do ponto de vista qualitativo quanto quantitativo, dentro do menor tempo e custo possíveis. Neste sentido entre 2005 e 2006 foi desenvolvida no LaMMEA/UFMG uma primeira plataforma experimental de teste capaz de realizar a medição da resistência elétrica em função da temperatura em amostras de LMF, na faixa de -10 a 200 °C, denominada SMRT (REIS *et al.*, 2006). Entretanto, tal sistema possuía baixas taxas de aquecimento e resfriamento pelo fato de utilizar como sistema de refrigeração e aquecimento um banho termoregulável contendo óleo de silicone, no qual, para amostras

com temperaturas de transformação abaixo de 0 °C (zero graus Celsius), o experimento se tornava relativamente lento, podendo durar mais de 2 horas. Visando melhorar esse desempenho, foi proposto em 2007 um novo sistema de variação da temperatura que faz uso de uma pastilha termoelétrica como dispositivo de aquecimento e refrigeração, denominado SMRT-Plus (REIS, 2008 a; REIS *et al.*, 2008b; REIS *et al.*, 2008 c) que deu origem a este trabalho de dissertação.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um equipamento de análise térmica cuja técnica termoanalítica utilizada é a termoeletrometria. Na seqüência é apresentado o projeto e a construção de uma estrutura física para o condicionamento do módulo Peltier, contendo um espaço destinado a amostra de LMF a ser ciclada termicamente. Em seguida apresenta-se uma interface elétrica responsável pelo acionamento do módulo Peltier, a qual utiliza uma placa da National Instruments, modelo NI USB-6216 16-Bit, 400 kS/s Isolated M Series MIO DAQ, Bus-Powered e como ferramenta de software o LABVIEW. Por último é apresentado um sistema de controle, aplicado ao equipamento, baseado em lógica FUZZY. Os testes demonstraram que o equipamento atendeu as expectativas iniciais de controle e reprodutibilidade dos ensaios comprovando a eficiência do novo sistema de medição, denominado SMRT-Plus, na caracterização das temperaturas de transformação de fase de amostras LMF.

## 2. JUSTIFICATIVA

No projeto de atuadores de LMF, independente do campo de aplicação, se faz necessário determinar, previamente, qual a faixa de temperatura em que o material deverá exercer atuação mecânica em resposta a uma ativação térmica, além de outros parâmetros como a forma, o tamanho e as condições de carregamento mecânico. Quanto a estas temperaturas de atuação, denominadas na literatura como temperaturas de transformação de fase direta (resfriamento) e reversa (aquecimento), pode se afirmar que o projeto de um atuador termomecânico baseado em LMF é *tailor-made* (feito sob medida). Levando em consideração a composição química, a história termomecânica e o carregamento mecânico externo, teoricamente é possível fabricar uma LMF para qualquer faixa de temperatura de atuação situada entre  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  e com uma variedade de formas geométricas. Portanto, se faz necessário, após o processo de fabricação da LMF, a realização da sua caracterização térmica imediata com o intuito de se obter as temperaturas de transformação e histerese térmica para uma posterior comparação com os valores previamente projetados.

Assim, a justificativa para este trabalho baseia-se no fato de que existe a necessidade de se determinar o comportamento das LMF em função da temperatura e do número de ciclos térmicos, principalmente para definição de modificações no seu projeto e fabricação. Então, como mencionado anteriormente, equipamentos comercialmente disponíveis para esse fim são relativamente caros e possuem recursos variados que não são necessários para essa aplicação. Além disso, por não serem específicos para a caracterização de LMF, são limitados no que se refere a velocidade da taxa de aquecimento e resfriamento.

### 3. OBJETIVOS

Neste trabalho tem-se por objetivo geral desenvolver um equipamento para a caracterização térmica rápida e precisa da transformação de fase de LMF através de medidas da variação de sua resistência elétrica sob ciclagem térmica produzida por pastilhas termoelétricas (módulos de Peltier).

Em termos específicos, objetiva-se:

1. Projetar e construir uma estrutura física para o sistema de medição da resistência elétrica em função da temperatura (SMRT-Plus);
2. Projetar um sistema de controle fuzzy para taxa de aquecimento e resfriamento bem como para realização de patamares em temperatura no equipamento SMRT-Plus;
3. Determinar a resistividade elétrica do cobre comercialmente puro como etapa inicial de validação do equipamento;
4. Realizar experimentos de ciclagem térmica em amostras de LMF na faixa de - 50 a 150 °C para validação final do equipamento.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Ligas com Memória de Forma (LMF) e Medidas de Resistência Elétrica

As ligas com memória de forma (do inglês *Shape Memory Alloys* – *SMA*), são materiais metálicos que, mesmo deformados plasticamente, são capazes de recuperar a geometria original (ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação) através da imposição de um campo de temperatura, devido a transformações de fase induzidas no material. Atualmente existe uma variedade muito grande de materiais que apresentam o Efeito Memória de Forma (EMF), porém, os que despertam interesse comercial são aqueles que apresentam recuperação de forma significativa (entre 3 e 6 %), ou que oferecerem considerável força de restituição ao se restringir à recuperação de sua forma originada após a imposição de temperatura. Ultimamente, os materiais que se encaixam nestes aspectos são as ligas metálicas do sistema Ni-Ti e algumas ligas de cobre dos sistemas Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni.

A caracterização física da transformação martensítica termoelástica consiste basicamente em determinar os parâmetros que tem relação direta com o fenômeno, como o deslocamento ou deformação correspondente ao EMF, alterações na resistência elétrica do material, a absorção ou liberação de energia térmica, alterações de rigidez (módulo de elasticidade), dentre outros. A partir destas características é possível determinar as temperaturas críticas de transformação de fase e histerese em temperatura de uma LMF. As transformações martensíticas em LMF podem ser estudadas a partir das curvas do comportamento de variações de algumas propriedades físicas como resistividade elétrica, dimensões e calor específico em função da temperatura. Comumente são usadas técnicas de análise térmica, como calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise térmica diferencial (DTA), análise termomecânica (TMA) e mais recentemente a termomecanometria dinâmica

(DMA) (CHANG e WU, 2008). As técnicas de análise térmica DSC e DTA detectam tanto a transformação martensítica direta, que é exotérmica (acompanhada por liberação de calor), quanto à transformação reversa, que é endotérmica (acompanhada por absorção de calor). As temperaturas críticas da transformação são:

$M_i$  → Temperatura de início de transformação martensítica direta (inglês  $M_s$ );

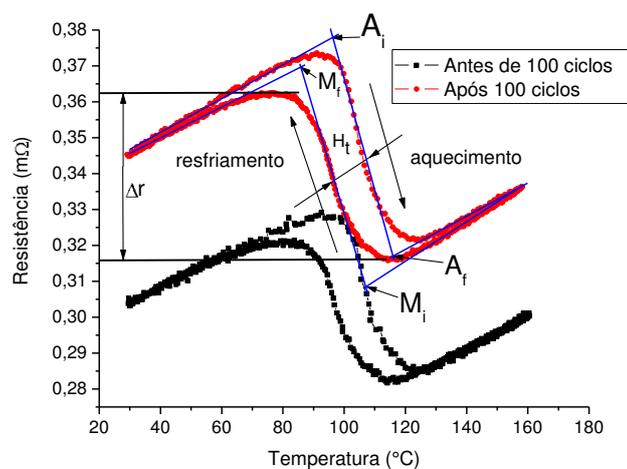
$M_f$  → Temperatura de final da transformação martensítica direta;

$A_i$  → Temperatura de início da transformação martensítica reversa (inglês  $A_s$ );

$A_f$  → Temperatura de final da transformação martensítica reversa;

$H_t$  → Histerese da transformação.

Na Figura 4.1.1 apresenta-se uma curva típica de variação da resistência elétrica em função da temperatura para uma amostra de LMF obtida com uma montagem laboratorial (REIS *et al.*, 2006). Esse comportamento também exibe uma histerese em temperatura, que é medida a 50% da transformação, conforme se apresenta na Figura 4.1.1. Em geral, a histerese em temperatura das transformações martensíticas termoelásticas variam entre 5°C e 50°C dependendo do tipo de LMF e do seu processamento termomecânico.



**Figura 4.1.1 - Parâmetros obtidos antes a após 100 ciclagens térmicas ilustrando a determinação das temperaturas críticas ( $M_i$ ,  $M_f$ ,  $A_i$  e  $A_f$ ) e da histerese da transformação ( $H_t$ ) durante um ciclo térmico de resfriamento e aquecimento de uma amostra de LMF. (REIS *et al.*, 2006)**

Na Figura 4.1.2 apresenta-se uma curva típica de calorimetria diferencial de varredura (DSC) utilizada na determinação das temperaturas de transformação de fase e histerese térmica em LMF. A técnica de DSC é bastante difundida e aplicada na caracterização térmica de LMF (NAGAI e OISHI, 2006; CHANG e WU, 2008; SUN, HUANG e CHEAH, 2010). Durante o resfriamento se verifica um pico exotérmico característico da transformação martensítica direta, onde é possível se determinar os valores de temperatura inicial  $M_i$  (do inglês  $M_s$ ) e final  $M_f$  da transformação martensítica. Já durante o aquecimento observa-se um pico endotérmico característico da transformação reversa, a partir do qual se obtém os valores das temperaturas de início  $A_i$  (do inglês  $A_s$ ) e final  $A_f$  da transformação austenítica.

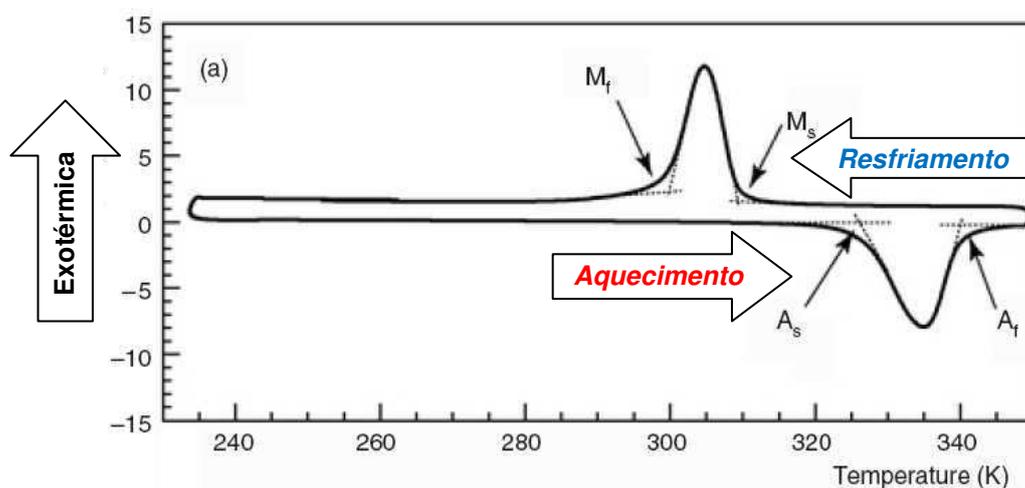


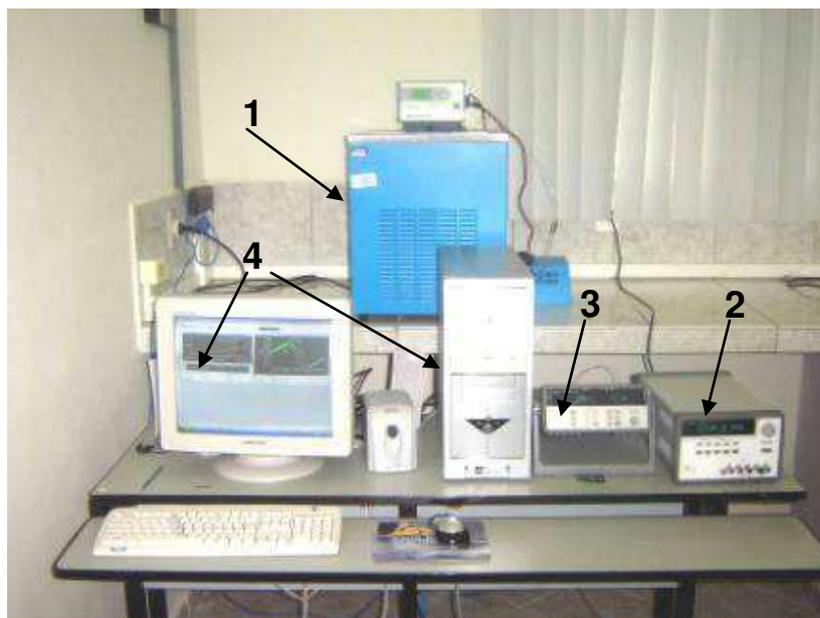
Figura 4.1.2 - Curvas obtidas por DSC ilustrando a determinação das temperaturas críticas ( $M_i$ ,  $M_f$ ,  $A_i$  e  $A_f$ ) durante um ciclo térmico de resfriamento e aquecimento. (NAGAI e OISHI, 2006)

As temperaturas de transformação e a histerese térmica  $H_t$  na curva **resistência elétrica versus temperatura** ( $R - T$ ), definidas nas Figura 4.1.1 e Figura 4.1.2 são determinadas através da técnica do cruzamento das tangentes, que é uma técnica recomendada pela Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria (ABRATEC, 2007).

Visando a caracterização térmica de LMF, REIS *et al.* (2006) iniciaram o desenvolvimento de uma plataforma experimental de teste capaz de realizar a

medição da resistência elétrica em função da temperatura em amostras desses materiais, na faixa de -10 a 200 °C, denominada Sistema de Medição de Resistência elétrica em função da Temperatura (SMRT). Na Figura 4.1.3 se apresenta uma fotografia da plataforma composta por um banho térmico regulável (1), uma fonte de potência CC (2), um sistema de aquisição de dados com placa de interface GPIB (3) e um computador com programa de visualização dos dados coletados (4).

O banho termoregulável (1) é da marca Cole-Parmer, modelo 12101-56 CE, e permite trabalhar na faixa de -20 a 200 °C, com um reservatório de 13 litros onde fica alojado o fluido que receberá a amostra a ser testada. O fluido onde a amostra fica completamente imersa é o óleo de silicone Rhodorsil 47V 50 da Rhodia Silicones. A fonte de alimentação CC (2) é da marca Agilent, modelo E3633A. O sistema de aquisição de dados (3) também é da marca Agilent, modelo 34970A, equipado com um módulo multiplexador de 20 canais com precisão de leitura de até 6 ½ dígitos. Esse sistema de aquisição permite fazer a medição da resistência elétrica da amostra de forma direta e indireta através do método de dois ou quatro fios.



**Figura 4.1.3 - Plataforma experimental de medição da resistência elétrica em função da temperatura em amostras de LMF (SMRT). Fonte: (REIS *et al.*, 2006)**

Apesar desta solução encontrada por REIS *et al.* (2006) apresentar resultados em perfeita concordância com a literatura, obtendo curvas R-T satisfatórias para a determinação das temperaturas críticas de transformação martensítica e reversa, o arranjo experimental mostrou-se pouco eficiente quanto ao tempo de operação, ou seja, foi eficaz, porém pouco eficiente. Esse SMRT possuía baixas taxas de aquecimento e resfriamento pelo fato de utilizar como estação de refrigeração e aquecimento um banho termoregulável, no qual, para amostras com temperaturas de transformação abaixo de 0 °C (zero graus Celsius), o experimento se tornava relativamente lento, podendo durar mais de 2 horas. Por isso, foi proposto em 2007 um novo sistema de variação da temperatura que faz uso de uma pastilha termoelétrica, baseada no efeito Peltier (ROWE, 2005), como dispositivo de aquecimento e resfriamento, denominado SMRT-Plus (REIS, 2008a; REIS *et al.*, 2008b; REIS *et al.*, 2008c).

Na Figura 4.1.4 visualiza-se um comparativo de tempo de operação entre o SMRT e o SMRT-Plus. Vale ressaltar que um ciclo completo com o SMRT entre -10 °C e 30 °C dura aproximadamente 1 hora enquanto no SMRT-Plus essa mesma ciclagem pode ser feita em apenas 5 minutos.

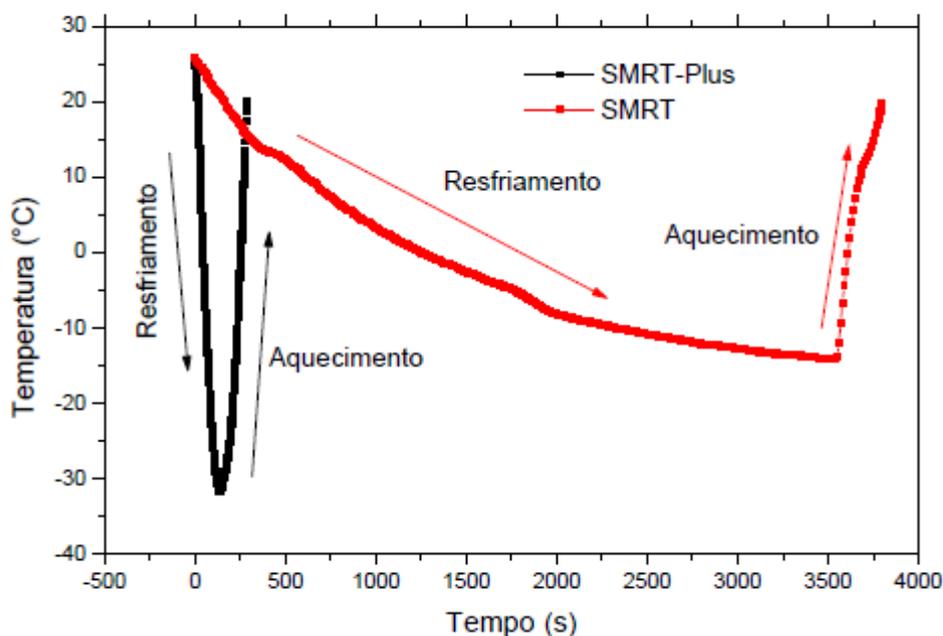
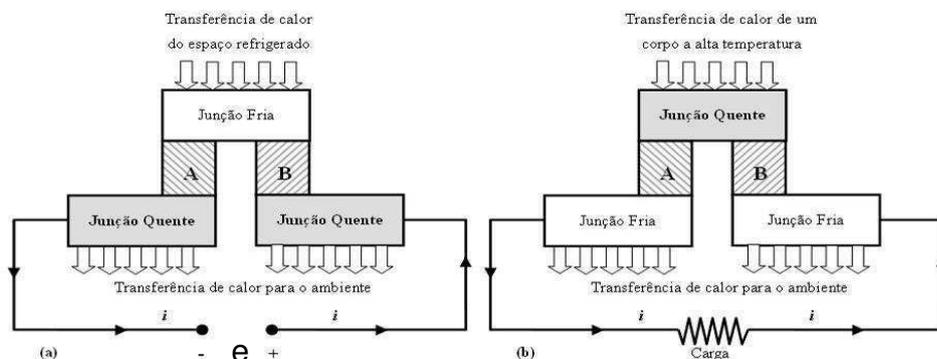


Figura 4.1.4 - Curvas da temperatura em função do tempo comparativas entre o SMRT-Plus e o SMRT. Fonte: (REIS *et al.* 2008c)

## 4.2. Pastilhas Termoelétricas

Segundo Van Wylen *et al* (2003), uma Pastilha Termoelétrica é um refrigerador termoelétrico no qual é possível utilizar diretamente a energia elétrica para promover a refrigeração, evitando os custos com o compressor, condensador, evaporador e tubulações, que são componentes necessários em um refrigerador que funciona por compressão de vapor. Além de refrigerador, essa pastilha pode funcionar como um gerador termoelétrico. Na Figura 4.2.1 ilustra-se o funcionamento das pastilhas termoelétricas baseadas no efeito Peltier. O esquema apresentado na Figura 4.2.1 (a) representa um refrigerador termoelétrico que utiliza dois materiais metálicos diferentes (A e B) de maneira similar aos pares termoelétricos convencionais. Existem duas junções entre estes materiais, uma junção fria localizada no espaço refrigerado e outra junção quente no meio ambiente. Quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada aos terminais (+ e -), a temperatura da junção localizada no espaço refrigerado diminui (junta fria  $T_c$ ) e a temperatura da outra junção (junta quente  $T_h$ ) aumenta. Desta forma o calor é transferido do espaço refrigerado para a junção fria e da junção quente para o meio ambiente. Já o sistema mostrado na Figura 4.2.1 (b), representa uma pastilha termoelétrica utilizada como um gerador de potência, onde o espaço refrigerado foi trocado por um corpo de temperatura elevada e nos terminais (+ e -) foi colocada uma carga. Dessa forma, a partir de uma diferença de temperatura pode ser gerada uma quantidade de energia elétrica diretamente sobre a carga.



**Figura 4.2.1 - Princípio de funcionamento de uma pastilha termoelétrica. (a) Refrigerador termoelétrico. (b) Gerador termoelétrico** Fonte: (VAN WYLEN, S. e BORGNAKKE, 2003)

Um conversor termoelétrico, também conhecido por Módulo Termoelétrico ou ainda Célula de Peltier, consiste em um conjunto de pares de semicondutores do tipo  $n$  e tipo  $p$  denominados termoelementos. Esses elementos  $n$  e  $p$  são conectados eletricamente em série através de um metal, e termicamente em paralelo, soldados entre dois materiais que isolam eletricamente, porém, que conduzem termicamente formando um sanduíche. Estes materiais isolantes elétricos são constituídos por placas cerâmicas que também servem para dar forma ao módulo, conforme se mostra na Figura 4.2.2.

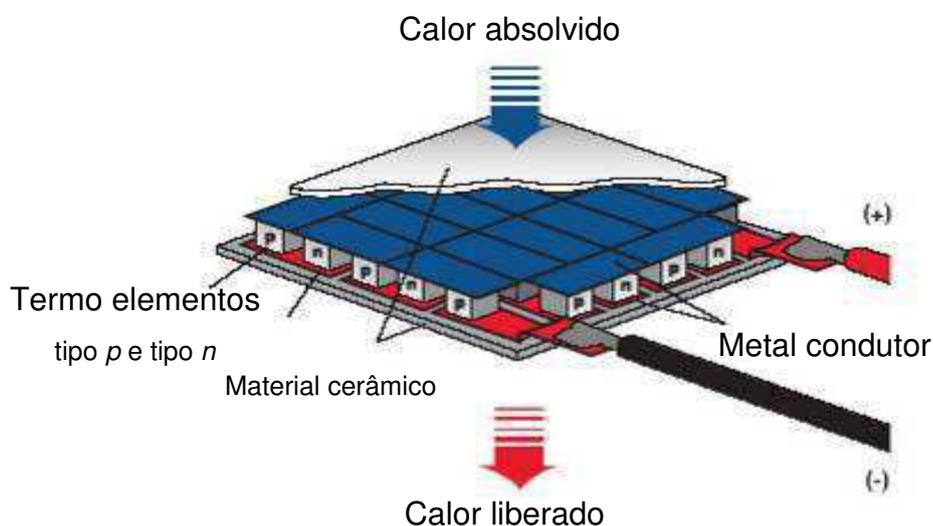


Figura 4.2.2 - Representação esquemática de uma Célula de Peltier. Fonte: (LAIRD, 2010)

Módulos Peltier são indicados para algumas aplicações e não recomendados para outras. Dependendo da aplicação, uma pastilha pode ser infinitamente superior a um compressor, por exemplo, para resfriar um microprocessador ou até inferior como no caso de um ar condicionado. Pastilhas termoelétricas são muito pequenas, leves e não produzem nenhum ruído, podendo ser extremamente precisas no controle de temperatura uma vez que não possuem peças móveis. Podem ser operadas também em vácuo ou ambiente sem gravidade, e em qualquer orientação física. Contudo, o efeito Peltier tende a perder sua vantagem competitiva para transferências de calor

acima de 200 W. Não obstante, em certas aplicações militares ou científicas, o efeito pode ser utilizado para transferir dezenas de kilowatts (ROWE, 2005).

Todo material é passível de gerar calor cada vez que uma corrente elétrica passa em seu interior. Um material termoelétrico não foge a esta regra, reagindo da mesma maneira. Há um ponto onde o calor gerado internamente cancela a capacidade do módulo de transferir calor. Cada pastilha tem seu próprio limite de quanto calor pode transferir que é conhecido como ***Qmax***. A corrente elétrica associada ao ***Qmax*** é conhecida como ***I<sub>max</sub>*** e a voltagem correspondente como ***V<sub>max</sub>***. Se um módulo for completamente isolado de seu ambiente e estiver trabalhando a ***I<sub>max</sub>***, produzirá a diferença máxima de temperatura entre os lados quente e frio, conhecida como ***dT<sub>max</sub>***.

O limite prático de comprimento e largura de um módulo como o da Figura 4.2.2 é de aproximadamente 60 mm, devido às diferenças de temperatura entre os lados do módulo. O lado frio da pastilha contrairá enquanto o lado quente expandirá, causando tensões mecânicas nos elementos e nos pontos de solda. Quanto maior for a pastilha, maior será a tensão mecânica nos elementos de seu perímetro causada pelos efeitos diferenciais de dilatação térmica entre as faces do módulo. Em casos onde a transferência de calor excede o que pode ser suprido por uma só pastilha, módulos adicionais podem ser utilizados lado a lado ou empilhados.

### **4.3. Módulos Termoelétricos versus LMF**

As LMF possuem a capacidade de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação ou apreciáveis deslocamentos caso não se restrinja a sua recuperação. Em outras palavras possuem a habilidade de gerar forças e movimentos abrindo margem para se construir atuadores leves e silenciosos. Entretanto, sabe-se que o tempo de resposta destes atuadores de LMF é bastante lento com frequência de resposta não superior a

10 Hz como pode ser observado no diagrama comparativo da resposta em frequência para diferentes materiais ativos da Figura 4.3.1 (LAGOUDAS, 2008).

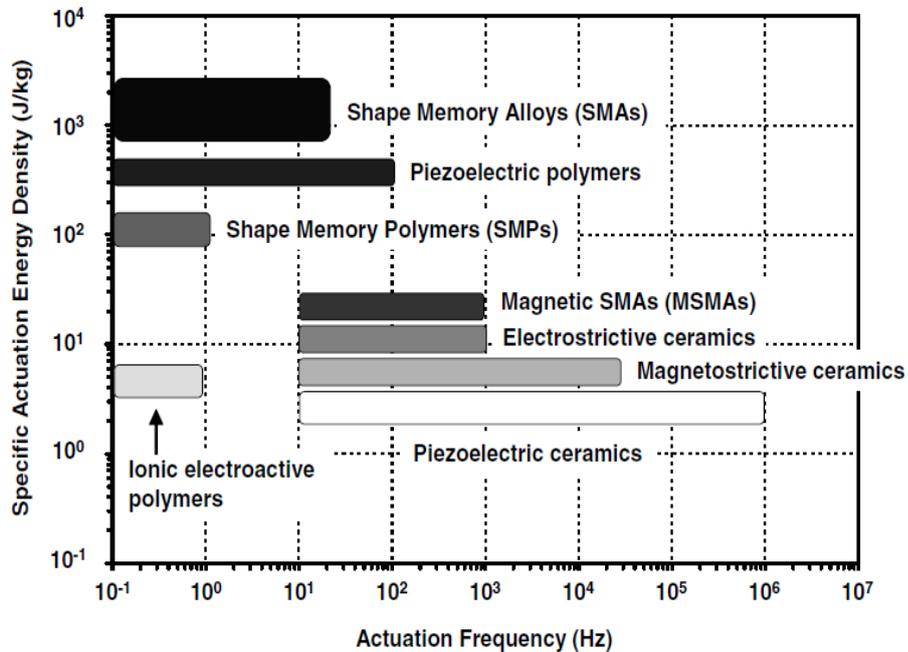


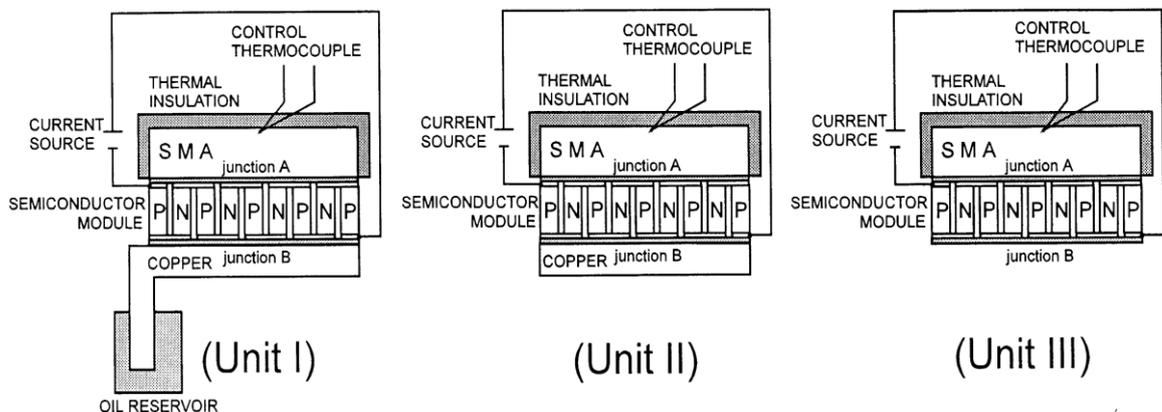
Figura 4.3.1 - Diagrama da frequência de Atuação comparativo entre diferentes materiais ativos que apresentam acoplamento direto. Fonte: (LAGOUDAS, 2008)

Desde 1998, diversas pesquisas têm sido realizadas objetivando melhorar a resposta dinâmica de atuadores com LMF. O aproveitamento dos módulos termoelétricos em associação com a tecnologia de LMF encontra-se na aplicação destes dispositivos como sistema de refrigeração forçada nos atuadores com memória de forma. POTAPOV (1998) mostrou que atuadores de LMF resfriados por pastilhas termoelétricas quando comparados com outros métodos de ativação, tiveram o tempo de resposta bastante melhorado. Na **Figura 4.3.2** apresenta-se um esquema da montagem experimental realizada por POTAPOV (1998) para o resfriamento forçado de atuadores de LMF (inglês SMA). A amostra de LMF (SMA) foi montada em contato térmico com a junção A do módulo termoelétrico e isolada termicamente do ambiente. Foram testadas três montagens diferentes de dissipação de calor para a junção B do módulo termoelétrico, definidas por: unidade I; unidade II e unidade III. Na unidade I foi utilizado como dissipador térmico da junção B uma placa de cobre

conectada a um reservatório de óleo. Esse conjunto placa de cobre – reservatório de óleo, funciona como um tipo de sumidouro mantendo a junção B em condição quase-isotermica.

Na unidade II, apenas a placa de cobre, com dimensão  $8 \times 8 \times 1 \text{ mm}^3$ , foi utilizada como dissipador de calor da junção B, porém, sua capacidade térmica é relativamente pequena em comparação com o dissipador utilizado na unidade I. Na unidade III não foi utilizado nenhum tipo de dissipação de calor na junção B.

O resultado menos eficiente entre as três montagens foi alcançado com a unidade III, porém, ainda se obteve melhor resultado em tempo de resposta ao resfriamento que quando comparado com o resfriamento por convecção livre.



**Figura 4.3.2 – Esquema de uma montagem experimental de um sistema de refrigeração forçada para LMF. Fonte: (POTAPOV, 1998)**

YAMBE *et al.* (2001) desenvolveram um coração artificial que empregava atuadores LMF com resfriamento forçado por elementos termoelétricos. Na Figura 4.3.3 apresenta-se uma fotografia do modelo de coração humano em tamanho real no qual foi montado o atuador LMF com resfriamento forçado por pastilhas termoelétricas.



**Figura 4.3.3 – Fotografia do atuador LMF com resfriamento forçado em um modelo em tamanho real de um coração humano Fonte: (YAMBE, MARUYAMA, *et al.*, 2001)**

Em uma outra pesquisa, SELDEN, CHO e ASADA (2004) apresentaram uma nova abordagem para o projeto de atuadores com memória de forma, em que fios de LMF são divididos em vários segmentos e seus estados térmicos são controlados individualmente de forma binária por meio de módulos termoelétricos. Outro sistema de resfriamento forçado, proporcionado por pastilha termoelétrica, foi utilizado por ROMANO e TANNURI (2008) no projeto de um atuador baseado em LMF aplicado a um controle de posição, fundamentado em algoritmo PID. Um esquema da montagem mecânica utilizado por Romano é apresentado na Figura 4.3.4. Nesta montagem, o fio de LMF é colocado em contato físico com o módulo termoelétrico provendo assim a refrigeração forçada. O fio de LMF teve uma de suas extremidades fixada diretamente na polia de raio menor e a outra fixada em um conector elétrico ( $C_1$ ) por onde passa a corrente elétrica de ativação do fio, e um potenciômetro foi utilizado como sensor de deslocamento angular. A carga está acoplada a polia de raio maior por meio de um fio comum. A relação entre as polias amplifica o movimento da carga por um fator de 10 em relação ao movimento de contração do fio de LMF.

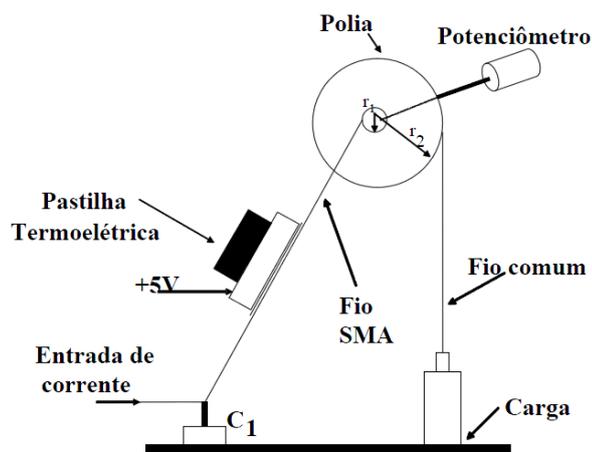


Figura 4.3.4 – Montagem mecânica de um atuador LMF (Fio SMA) com resfriamento forçado por pastilha termoelétrica. Fonte: (ROMANO e TANNURI, 2008)

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho de caráter teórico-experimental foi integralmente realizado no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) com apoio da infra-estrutura do Laboratório de Usinagem da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) do CCT/UFCG. O trabalho consistiu na elaboração, construção e validação de um equipamento para análise térmica cuja técnica termoanalítica utilizada é a termoeletrometria direcionada a caracterização das temperaturas de transformação e histerese térmica de ligas com memória de forma (LMF) que trabalhem na faixa de -50 a 150 °C. Para tanto o trabalho foi dividido em três partes. Inicialmente foi elaborada a documentação técnica da estrutura física do equipamento em ambiente computacional. Em seqüência foi desenvolvido um interface elétrica para ativação e controle do Módulo Peltier. Por ultimo foi criado um programa com a interface para usuário e com o controlador fuzzy

### 5.1. Fluxograma da Metodologia

A metodologia utilizada está resumida no fluxograma mostrado na Figura 5.1.1, o qual descreve as seqüências das etapas realizadas durante a execução desse trabalho.

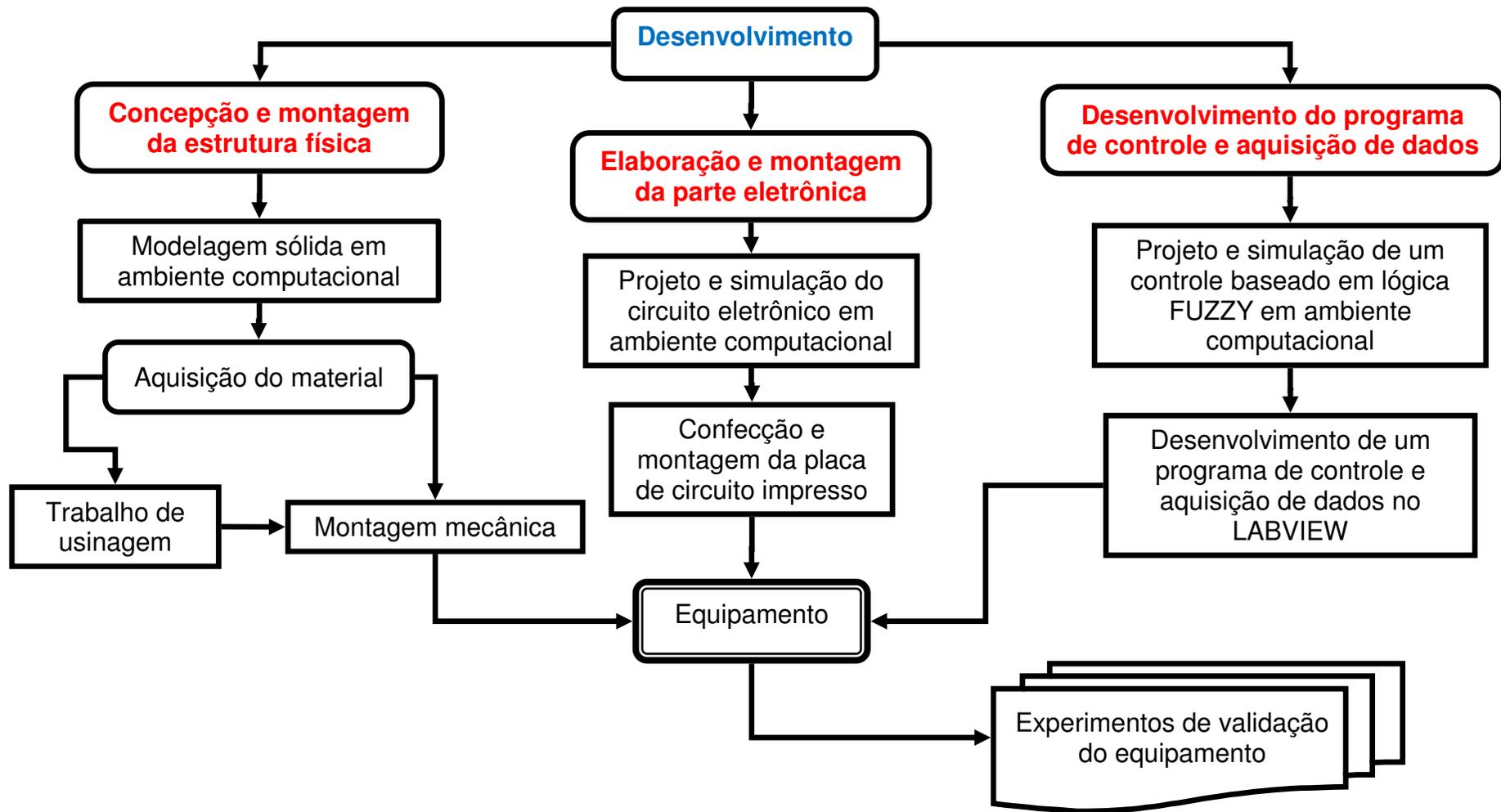


Figura 5.1.1 - Fluxograma representativo da metodologia empregada

## 5.2. Desenvolvimento do Equipamento

Para se obter a curva experimental de **Resistência Elétrica versus Temperatura ( $R - T$ )** é necessário variar de forma controlada a temperatura da amostra de LMF e monitorar simultaneamente a temperatura e a resistência elétrica dessa amostra. A resistência elétrica da amostra é determinada a partir da lei de ohm. Com a passagem de uma corrente elétrica na amostra é provocada uma queda de tensão que pode ser mensurada. Então para se obter o valor da resistência elétrica basta dividir o valor de tensão medida pelo valor da corrente elétrica que é conhecida e constante. Na Figura 5.2.1 mostra-se um diagrama de blocos para o equipamento proposto, apresentando a necessidade de um aparato para fazer variar a temperatura da amostra, uma fonte de corrente contínua (CC) estabilizada aplicada para alimentação da amostra de LMF, um sensor de temperatura e um sistema de aquisição de dados conectado a um computador (PC). Os parâmetros envolvidos na medição são a corrente elétrica constante ( $I$ ) passando através da amostra, a tensão elétrica ( $+V-$ ) e a temperatura do meio ( $T$ ). Estes parâmetros devem ser monitorados no tempo ( $t$ ) e armazenados em computador para análise posterior.

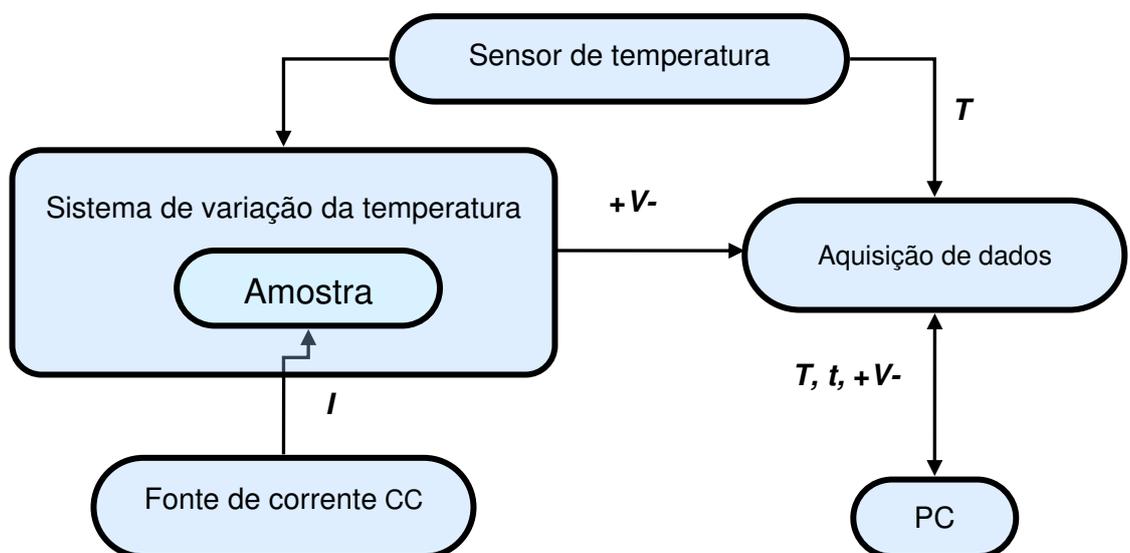
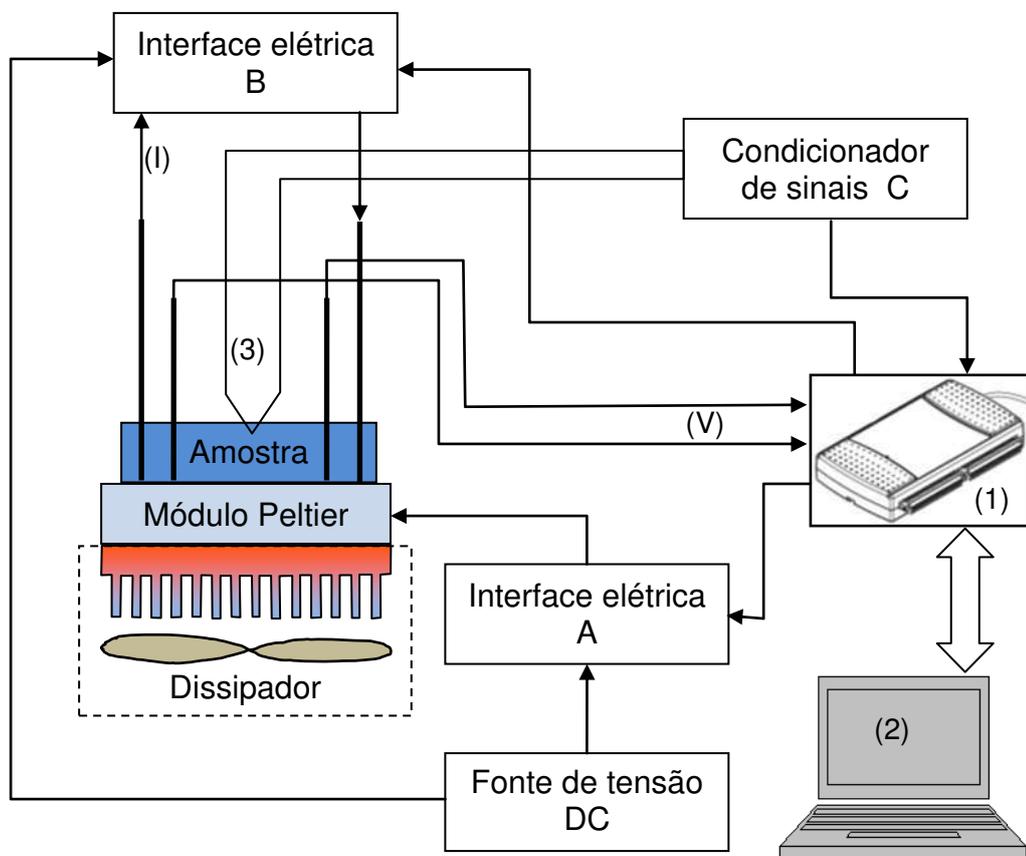


Figura 5.2.1 - Diagrama de blocos ilustrativo do equipamento proposto.

É apresentada na Figura 5.2.2 uma ilustração esquemática do equipamento fundamentada no diagrama em blocos da Figura 5.2.1. A idéia básica é utilizar uma pastilha termoelétrica como sistema de variação da temperatura da amostra de LMF. Para isso, é necessário colocar em contato térmico a amostra com o módulo Peltier e fazer variar a temperatura do módulo, monitorando a temperatura com um microtermopar instalado na amostra.



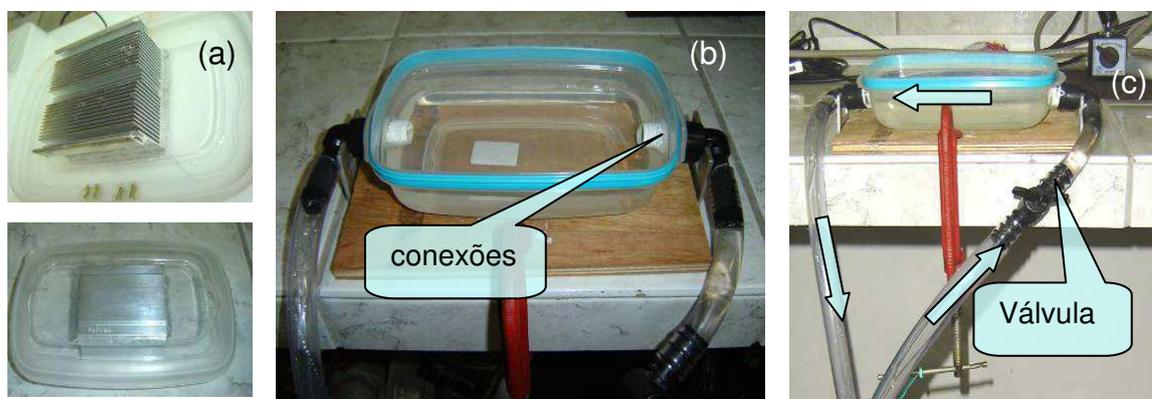
**Figura 5.2.2 - Ilustração esquemática do equipamento proposto. (1) placa de aquisição de dados e controle; (2) Microcomputador; (3) Microtermopar.**

A interface elétrica A, alimentada por uma fonte de tensão DC, possibilita controlar a tensão elétrica aplicada ao módulo Peltier por meio de uma placa de aquisição de dados e controle (1) conectada ao computador (2) através de uma porta USB. Um circuito condicionador de sinais (C) é utilizado para linearizar e amplificar o sinal do termopar (3) para a placa de aquisição de dados e controle

(1). A interface elétrica B, também alimentada pela mesma fonte de tensão da interface elétrica A, permite controlar a corrente ( $I$ ) que passa através da amostra, via a placa de aquisição de dados e controle (1), regulando um valor constante para essa corrente. A placa de aquisição de dados e controle (1) também permite fazer a medição da queda de tensão elétrica ( $V$ ) na amostra de LMF. Um sistema de dissipação de calor é utilizado como uma espécie de fonte térmica (sumidouro), para manter a temperatura da superfície inferior da pastilha termoelétrica o mais constante possível, visando absorver todo o calor liberado pelo módulo durante o processo de variação de temperatura.

### 5.3. Concepção e montagem da estrutura física

Em um trabalho anterior, REIS (2008a) desenvolveu um protótipo de sistema de dissipação de calor para o equipamento SMRT com base no projeto conceitual da ilustração da Figura 5.2.2. O trabalho de REIS (2008a) envolveu o estudo de várias concepções de sistema de dissipação de calor. Após diversos experimentos foi selecionada a configuração apresentada no conjunto de fotos da Figura 5.3.1. Nesta configuração, o sistema de dissipação utiliza um recipiente (b) capaz de alojar uma superfície aletada (a) e ao mesmo tempo permitir o escoamento de um fluido (água) por entre as aletas como indicam as setas da Figura 5.3.1 (c).



**Figura 5.3.1- Sistema de dissipação térmica operando com circulação de água. (a) Montagem do dissipador na tampa do reservatório. (b) Conexões instaladas nas laterais do recipiente. (c) Detalhe do sentido de fluxo do fluido. Fonte: (REIS, 2008a)**

Para o trabalho atual está sendo proposta uma nova montagem para o dissipador térmico. Nessa nova montagem optou-se por alterar o fluido operante de água para o fluido refrigerante R134a visando atingir temperaturas ainda mais negativas quando comparadas ao estudo inicial de REIS (2008a). Para esta configuração foi necessário desenvolver uma espécie de mini-refrigerador a ser utilizado como sistema de dissipação térmica do lado quente do módulo Peltier ( $T_h$ ). Na Figura 5.3.2 apresenta-se o projeto realizado com o auxílio da ferramenta computacional CAD/CAE CATIA V5 (versão demo) para o evaporador do mini-refrigerador. O módulo Peltier (1) fica fixado entre uma placa de cobre (3) e duas travas de alumínio (2). O lado quente do Peltier  $T_h$  fica em contato térmico com a placa de cobre que é refrigerada pela expansão do fluido R134a no interior da serpentina de cobre (4). As travas de alumínio (2) são isoladas por uma fita de silicone (5). A amostra de LMF (6) é instalada na superfície fria do módulo Peltier  $T_c$ . A fixação se dá por uma terceira trava contendo parafusos que pressionam a amostra contra a superfície do módulo por meio das molas (7).

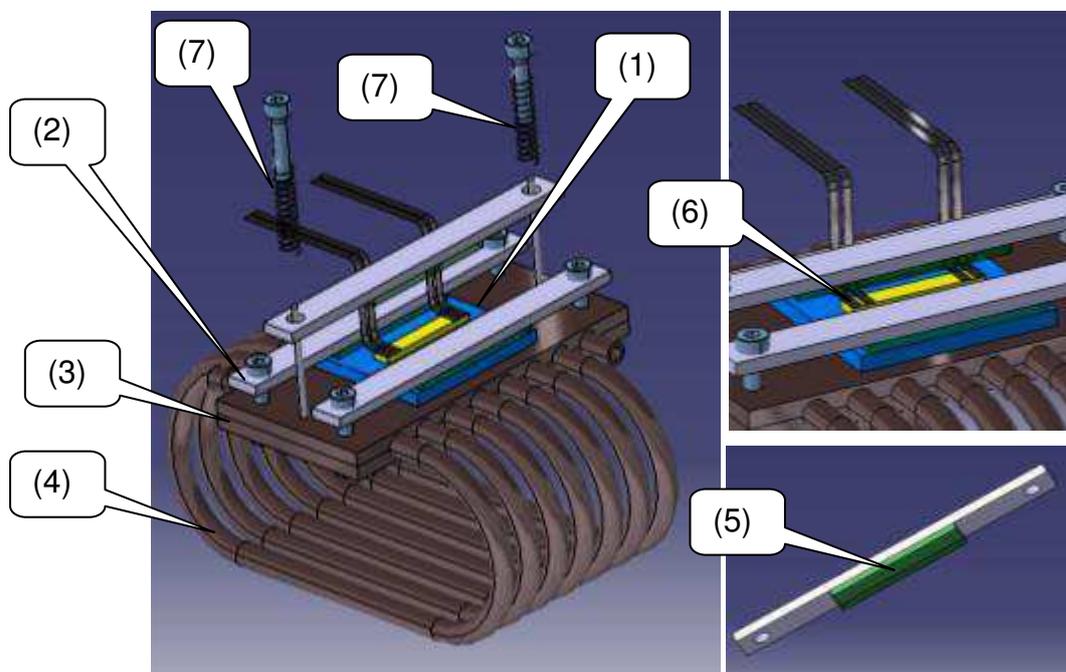
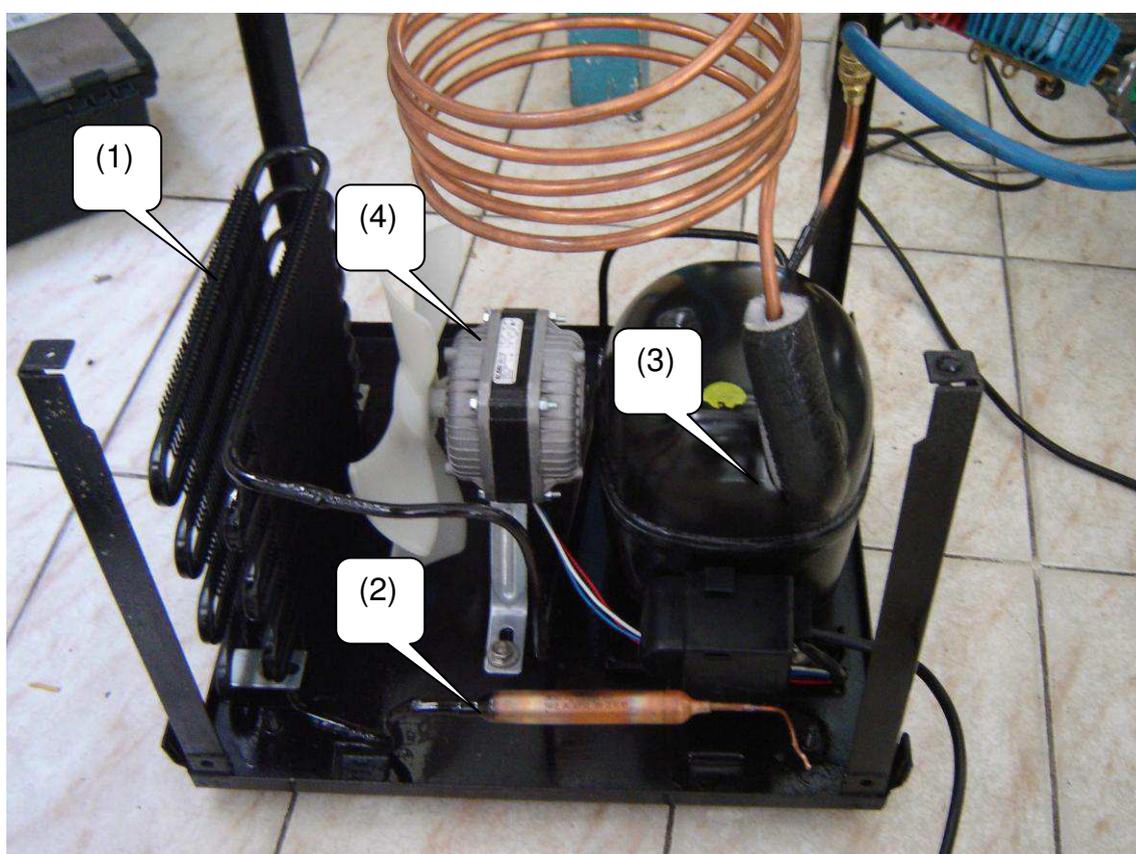


Figura 5.3.2 – Projeto do evaporador para o mini-refrigerador.

A estrutura física utilizada para a fabricação do mini-refrigerador foi fabricada com o apoio técnico do Laboratório de Usinagem da UAEM/UFCG, no qual foi realizado trabalhos de soldagem, corte, conformação mecânica e carga de gás refrigerante.

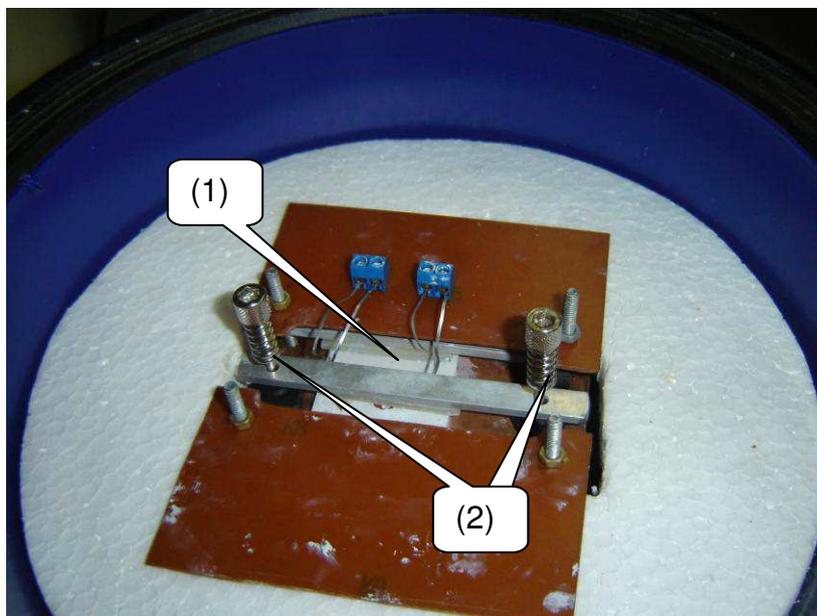
Na Figura 5.3.3 é apresentada uma fotografia da estrutura pronta para receber o evaporador ilustrado na Figura 5.3.2. Os componentes que fazem parte da estrutura são: condensador (1), válvula de expansão (2), compressor (3) e motor com ventilador (4).



**Figura 5.3.3 - Estrutura desenvolvida para receber o evaporador.**

Na Figura 5.3.4 mostra-se uma fotografia detalhando a fixação de uma amostra de LMF no equipamento. A superfície superior (1) do módulo Peltier fica em contato térmico com a amostra (não mostrada). Uma trava, fabricada

em alumínio, fica encaixada em dois pinos com rosca (2) que recebem um parafuso com mola.



**Figura 5.3.4 - Fotografia da região para instalação da amostra de LMF no equipamento.**

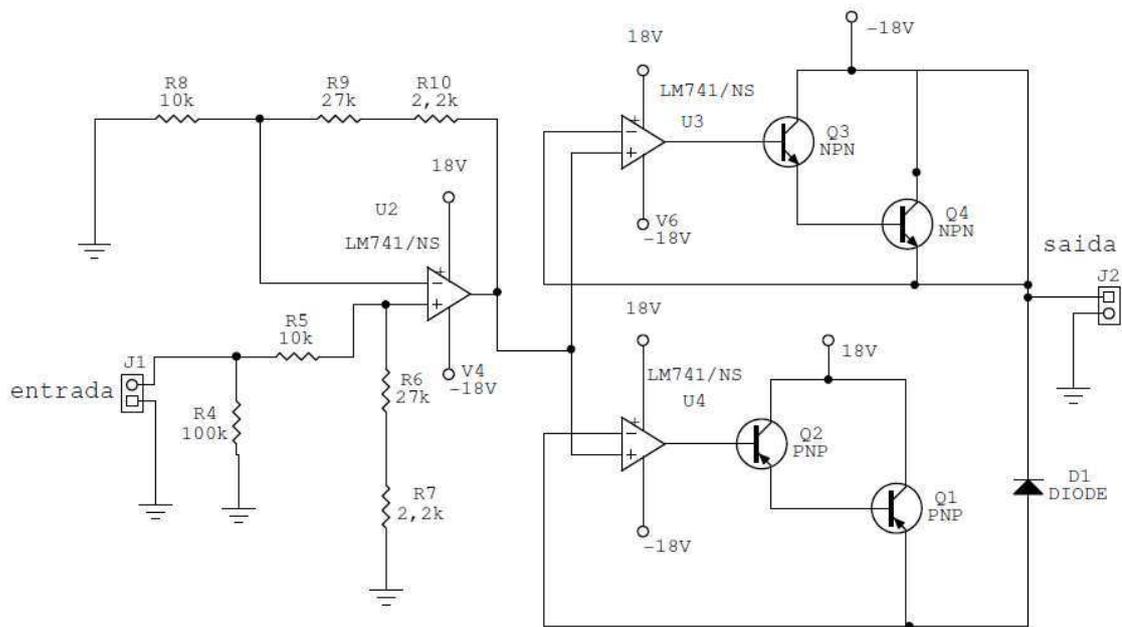
A seqüência completa de fabricação e montagem do equipamento é apresentada no conjunto de fotos da Figura 5.3.5. As placas de cobre foram usinadas em uma fresadora (1); a serpentina foi fabricada a partir de tubos de cobre com 6,35 mm de diâmetro externo, o qual foi dobrado, estanhado e soldado nas placas de cobre (também pré-estanhadas) (2); os componentes do mini-refrigerador, como o compressor, ventilador, válvula de expansão, tubo capilar e condensador, foram parafusados em uma plataforma metálica (3); o sistema recebeu uma carga de gás R134a (4); foi parafusada uma tampa em madeira coberta com uma camada de fórmica branca e com um orifício no centro (5); o módulo Peltier foi instalado na superfície da placa de cobre (6) no interior de uma cúpula plástica para possibilitar ensaio sob vácuo e por fim uma vista geral do equipamento denominado SMRT-Plus (7).



Figura 5.3.5 - Sequencia de fabricação e montagem do equipamento SMRT-Plus (7).

#### 5.4. Elaboração e montagem da parte eletrônica

O diagrama elétrico mostrado na Figura 5.4.1, que compõe a interface elétrica A ilustrada na Figura 5.2.2, é responsável pelo acionamento do módulo Peltier. Um canal de saída analógica da placa de aquisição e controle é ligado à entrada e o módulo Peltier é conectado na saída. O circuito realiza uma conversão do sinal elétrico de baixa potência (5mw), originário da placa de aquisição de dados e controle (1), em um sinal de maior potência (145 w) permitindo um controle da tensão elétrica de alimentação do módulo Peltier. O circuito foi desenvolvido com componentes discretos e alguns amplificadores operacionais.



**Figura 5.4.1 – Circuito elétrico da interface elétrica A.**

Com a finalidade de testar a funcionalidade do circuito apresentado no diagrama elétrico da Figura 5.4.1 foi realizada uma simulação em ambiente computacional Proteus 7.2 (versão demo) antes de fabricar a placa de circuito impresso. Na Figura 5.4.2 é apresentado à tela da simulação no programa Proteus. Na simulação foi aplicado um sinal de entrada senoidal com 5 V de amplitude, freqüência de 50 Hz e 0 V de tensão de offset (A). Utilizou-se a ferramenta osciloscópio (1) do modo de instrumentos virtuais para visualizar os sinais nos pontos de entrada (A), na saída da primeira etapa (B) e na saída da segunda etapa (C). A primeira etapa é um circuito subtrator com ganho, ou seja, realiza uma operação de subtração entre os terminais “+” e “-” do amplificador operacional e multiplica o resultado por um ganho. O ganho foi calculado para 2,92 com a finalidade de fornecer uma saída de 14,6 V com 5 V de entrada e - 14,6 V para - 5 V de entrada. A segunda etapa é um amplificador de potência que irá alimentar o módulo Peltier. Esse amplificador é constituído por dois caminhos de amplificação. Um caminho amplifica o ciclo positivo do sinal de entrada e o outro o ciclo negativo. Durante a polarização direta (ciclo positivo do sinal) o módulo Peltier ira resfriar a superfície superior e durante a

inversão de polaridade (ciclo negativo) o módulo Peltier era aquecer a superfície superior.

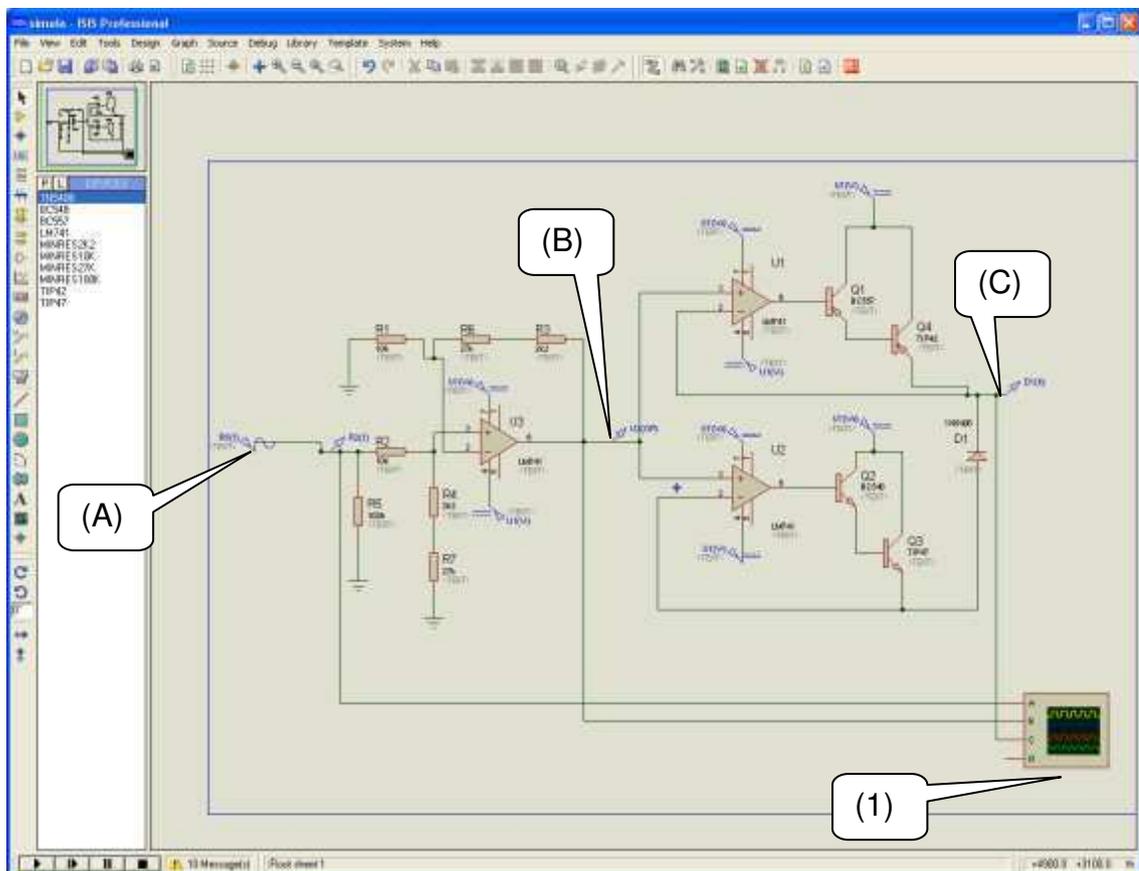
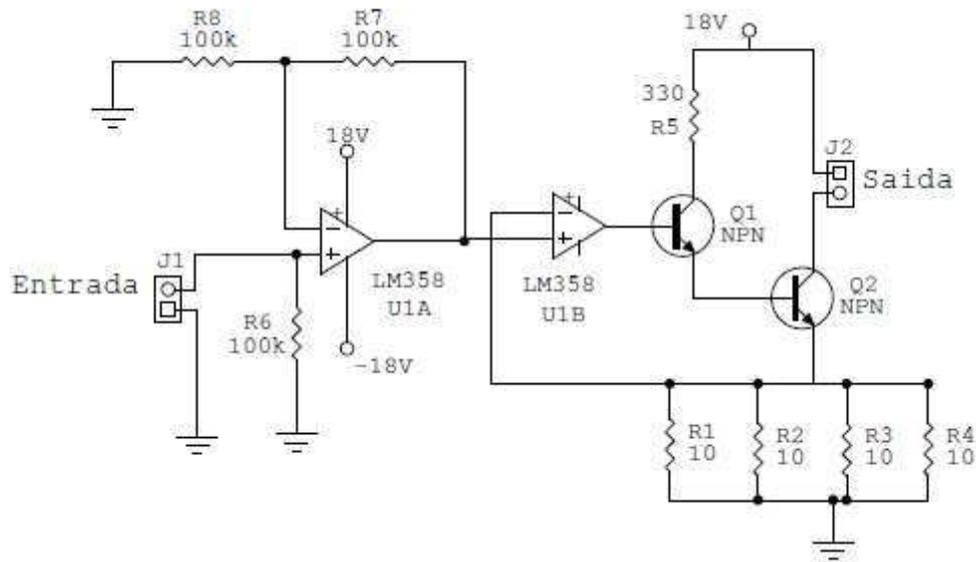


Figura 5.4.2 – Tela da simulação da interface elétrica A no programa Proteus.

Na Figura 5.4.3 apresenta-se o diagrama elétrico da interface elétrica B, que foi definida no diagrama esquemático da Figura 5.2.2. Este circuito foi desenvolvido para controlar o valor da corrente, aplicada na amostra de LMF. A idéia é fazer uma fonte de corrente controlada por tensão, para regular uma diferença de potencial elétrico na entrada do circuito e dessa forma controlar o valor da corrente de alimentação da amostra de LMF. O valor numérico da corrente elétrica de saída é proporcional ao valor da tensão elétrica de entrada. A entrada do circuito é ligada a uma saída analógica da placa de aquisição e controle. O circuito admite uma carga ligada na saída (amostra de LMF), com resistência elétrica que pode variar de 0 a 3 ohms e possui a capacidade de regular uma corrente elétrica de até 2 A aplicada à carga.



**Figura 5.4.3 – Circuito elétrico da interface elétrica B.**

A simulação do circuito da interface elétrica B foi realizada no ambiente computacional Proteus 7.2 (versão demo). Na Figura 5.4.4 mostra-se à tela do programa Proteus com o esquema elétrico da interface elétrica B. Na simulação foi verificado se o circuito iria atender as especificações de projeto. Neste sentido, aplicou-se um potenciômetro linear (RV1), como divisor de tensão, na entrada. Este potenciômetro ajusta um valor de tensão passível de ser alterado durante a simulação. A tensão elétrica de entrada foi monitorada pela ferramenta voltímetro (1) do módulo de instrumentos virtuais. A saída de corrente foi monitorada por uma ferramenta virtual amperímetro (2). A carga justaposta (amostra de LMF), representada por um potenciômetro linear de 3 ohms (RV2), também permite ser alterado o seu valor de resistência durante a simulação. O valor do potenciômetro RV2 é alterado excursionando a sua resistência de 0 a 3 ohms, ao mesmo tempo em que se observa a ocorrência ou não de alterações no valor da corrente elétrica, medida no amperímetro. Repete-se este procedimento para uma faixa de valores de corrente de 0,1 a 2 A com intervalos de 0,1 A, buscando desta forma avaliar se o amplificador de corrente irá fornecer uma corrente constante independentemente da variação da resistência elétrica da amostra de LMF.

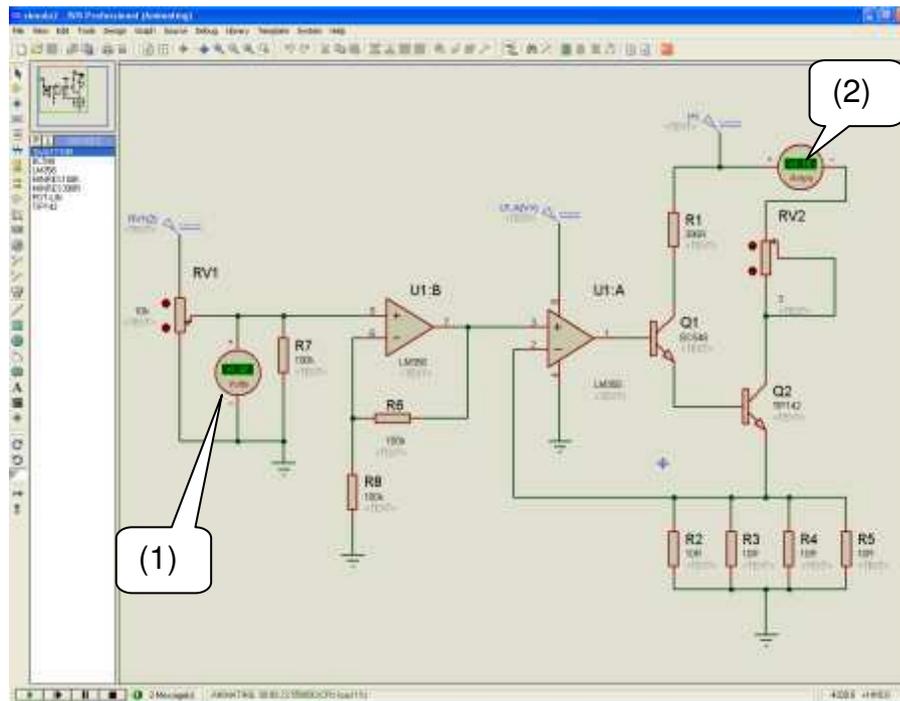


Figura 5.4.4 - Tela da simulação da interface elétrica B no programa Proteus.

O condicionador de sinais, apresentado no diagrama em blocos da Figura 5.2.2, é composto pelo circuito integrado AD595 da Analog Devices. O AD595 é um amplificador para instrumentação que possui um circuito de compensação para a junção fria do microtermopar. O condicionador combina um ponto de referência de gelo pré-calibrado (*ice point* eletrônico) com um amplificador para produzir um alto nível de saída ( $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ) a partir de um termopar. Na Figura 5.4.5 mostra-se o circuito elétrico sugerido pelo fabricante para possibilitar a medição de temperaturas acima e abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ .

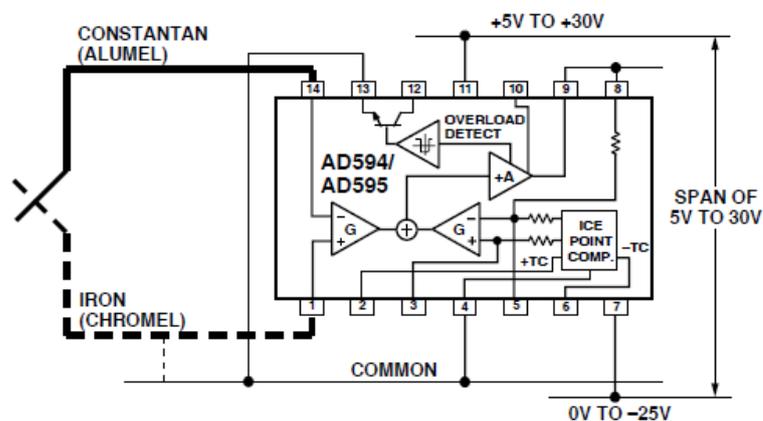


Figura 5.4.5 – Condicionador de sinais proposto pela Analog Devices.

Os resultados das simulações apontaram para o perfeito funcionamento dos circuitos atendendo as especificações iniciais de projeto. Após as simulações, foram fabricadas as placas de circuito impresso para cada interface e o condicionador de sinais. Baseado no diagrama da Figura 5.2.2 é apresentado na Figura 5.4.6 um esquema das interligações elétricas entre as placas de circuito impresso por meio de fotografias. A amostra de LMF fica condicionada no interior do equipamento (1), a interface B (2) alimenta, com uma corrente constante, a amostra de LMF. O sinal dos termopares, (temperatura da amostra e temperatura do módulo Peltier) são amplificados pelos condicionadores (3). O módulo Peltier é alimentado com tensão elétrica contínua por meio da interface A (4). Todos os circuitos são alimentados por uma fonte de tensão contínua simétrica de  $\pm 18$  V de 360 W (não mostrada) e são conectados a placa de aquisição de dados e controle da National Instruments (5) que se comunica com um computador (não mostrado) por porta USB.

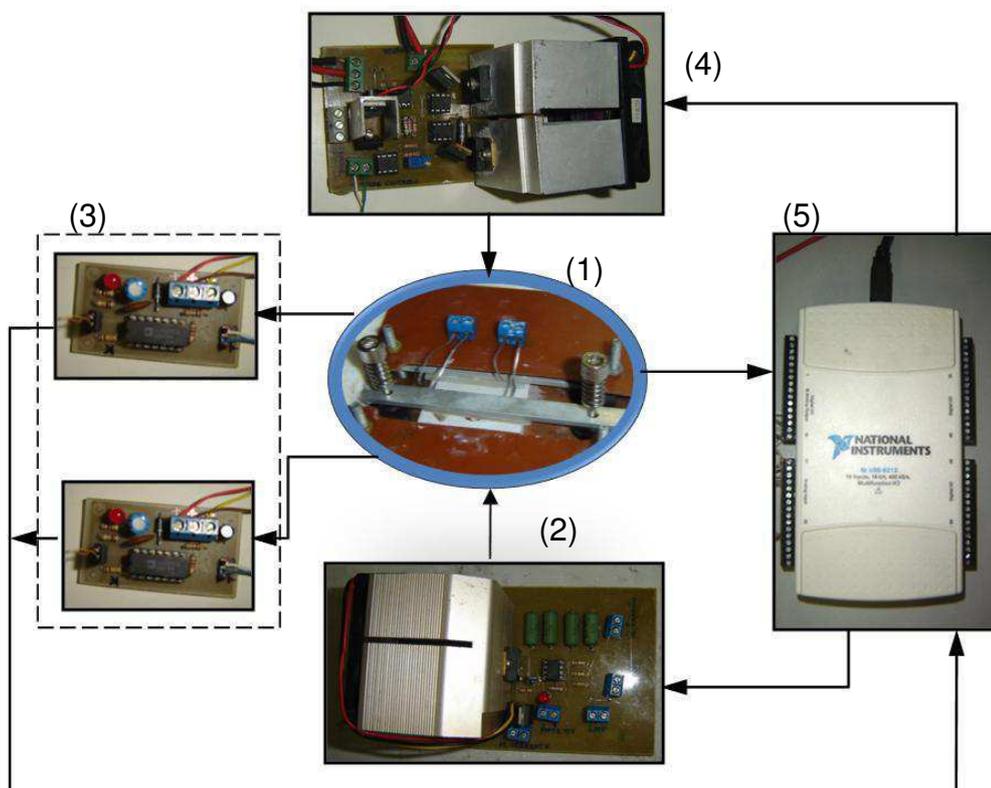
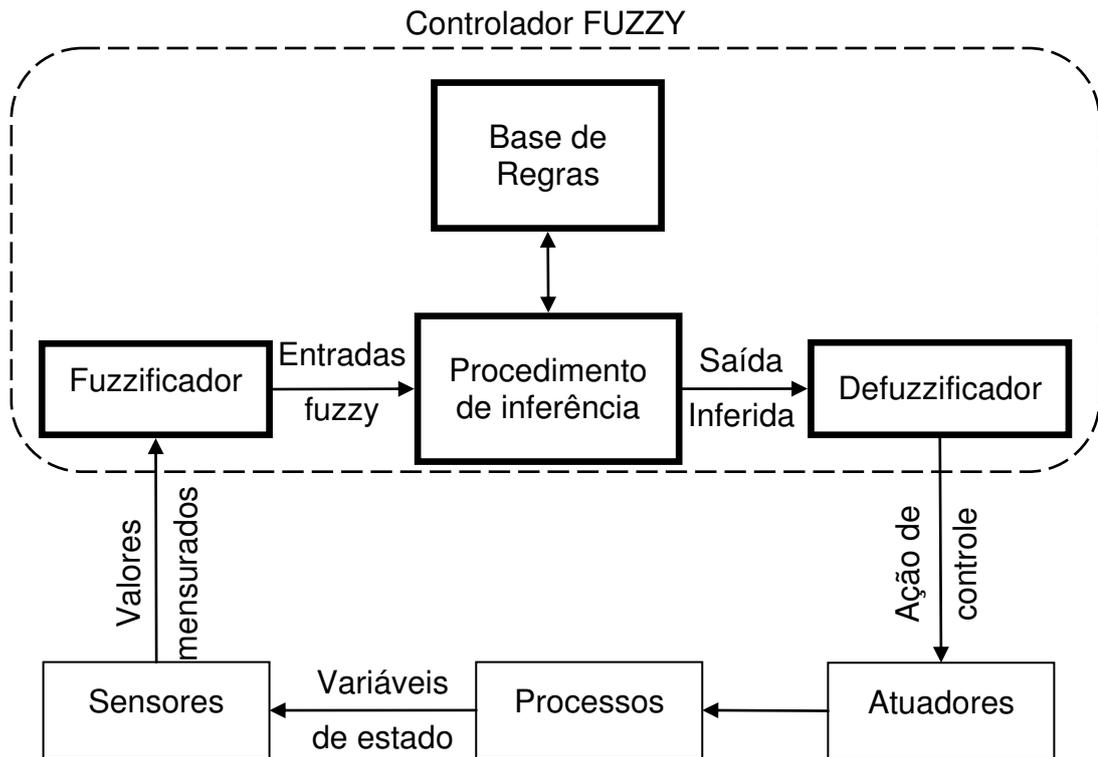


Figura 5.4.6 - Esquema de conexões entre o circuitos elétricos.

## 5.5. Desenvolvimento do programa de controle e aquisição de dados

O controle aplicado à pastilha termoelétrica do equipamento foi fundamentado na teoria de controladores FUZZY. Esse método não convencional de controle tem proporcionado avanços no tratamento de sistemas complexos, não lineares e com parâmetros imprecisos e ambíguos (KOVACIC e BOGDAN, 2005). A lógica fuzzy foi concebida como um meio para proporcionar um algoritmo de processamento das informações que fosse mais leve e que permitisse trabalhar com dados vagos e ambíguos. Isto possibilitou a representação de sistemas de controle pela emulação do conhecimento humano com base no sistema físico, assim como também permitiu admitir variáveis como sendo elementos parciais de um conjunto particular e ainda o uso de operadores booleanos convencionais para manipulação das informações (PASSINO e YURKOVICH, 1998).

A arquitetura de um controlador fuzzy baseado em regras é apresentada na Figura 5.5.1. Essa estrutura de controlador representa a transformação que ocorre do domínio do mundo real por meio do fuzzificador, que usa números reais (valores mensurados nos sensores), para o domínio fuzzy (entradas fuzzy), que usa números fuzzy. Após essa transformação um conjunto de inferências fuzzy é utilizado para as tomadas de decisões, e por fim há uma transformação inversa do domínio fuzzy para o domínio do mundo real via defuzzificador, para que ocorra o acoplamento entre a saída do algoritmo fuzzy e as variáveis de atuação (ação de controle). A base de regras caracteriza os objetivos de controle e a estratégia de controle utilizada por especialistas na área, por meio de um conjunto de regras de controle em geral lingüísticas do tipo **SE** <condições> **ENTÃO**<conclusão> ou do tipo **SE** <antecedente> **ENTÃO**<consequente>.



**Figura 5.5.1 - Arquitetura de um controlador FUZZY baseado em regras.**

O mérito despertado por essa técnica, para a sua utilização neste projeto do equipamento, é decorrente de algumas características básicas desta tecnologia: (i) sua formulação é natural e intuitiva, por tentar imitar o comportamento consciente ou a estratégia de controle de um operador humano (IBRAHIM, 2003); (ii) não prescinde do conhecimento detalhado dos modelos dos elementos do processo a ser controlado (planta, sensores, atuadores, etc.); (iii) aplica-se a sistemas lineares e não lineares; (iv) é de fácil implementação e de baixo custo, além de apresentar características de robustez às incertezas ou variações paramétricas (SIMÕES e SHAW, 2007).

O programa de aquisição de dados e controle para o equipamento foi desenvolvido usando o software Labview. Os programas criados no Labview, são denominados Instrumentos Virtuais (VI's) e são compostos por duas partes. A primeira parte é denominada painel frontal e a segunda parte diagrama de blocos. Na Figura 5.5.2 mostra-se uma tela do Labview com o

painel frontal desenvolvido para esta aplicação. No campo “parâmetros do experimento” (1) o usuário entra com os valores correspondentes as temperaturas de inicio e fim de cada ciclo térmico em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), informa o número de ciclos desejados, a taxa de aquecimento e resfriamento em graus Celsius por minutos ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) e por ultimo o valor da corrente de excitação passando através da amostra de LMF em Ampère (A). O VI foi projetado para que durante o experimento seja possível alterar qualquer um destes parâmetros sem comprometer o resultado final. Os indicadores gráficos monitoram a temperatura (2) e a resistência elétrica da amostra (3) em tempo real.

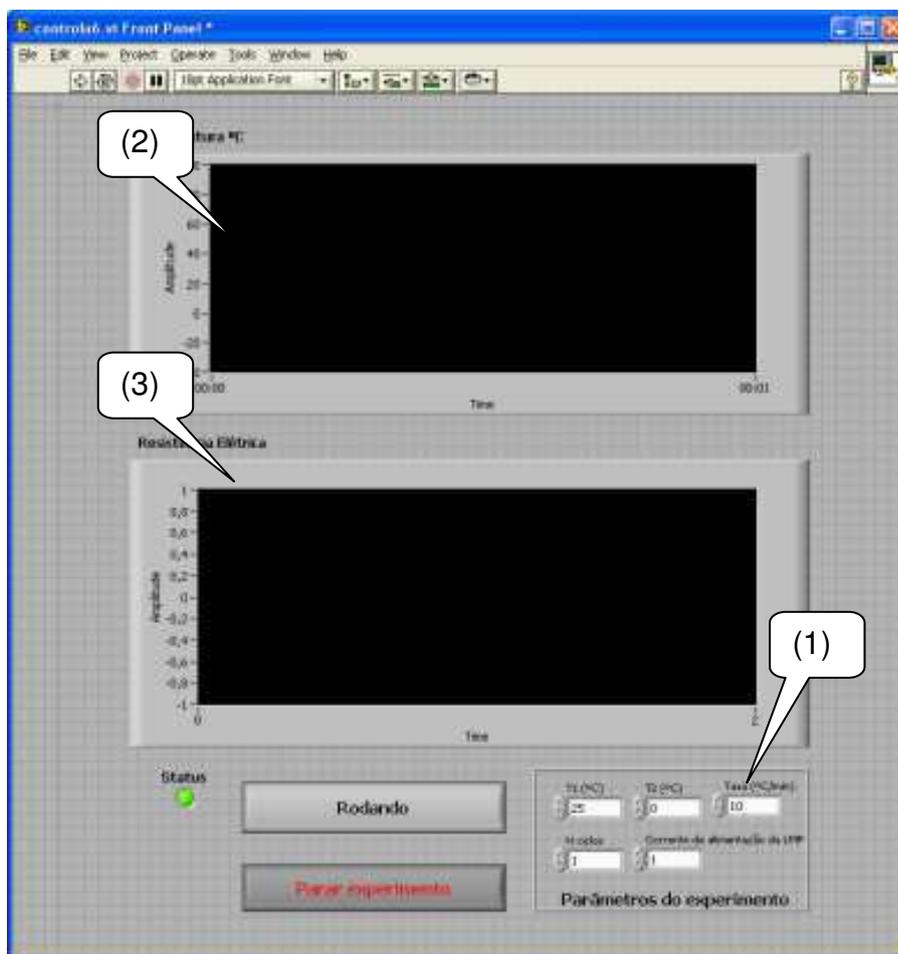


Figura 5.5.2 – Painel frontal do VI

## 5.6. Projeto e simulação de um controle baseado em lógica FUZZY em ambiente computacional

A ferramenta computacional utilizada para o projeto do controlador FUZZY foi o Matlab, que é bastante aplicado em Engenharia para realizar cálculos matemáticos, desenvolver algoritmos, modelagem e simulação. O Matlab está dotado de um sistema interativo e uma linguagem de programação. Além das bibliotecas para cálculos aritméticos básicos, o Matlab ainda oferece um grande número de ferramentas especializadas, conhecidas como **toolboxes**, utilizadas para a resolução de problemas em áreas específicas, tais como estatística, programação linear, sistemas de controle, processamento de sinais, simulação dinâmica. Uma biblioteca muito importante que está disponível no Matlab é o **Fuzzy Logic Toolbox** que contém uma interface gráfica que permite a construção de sistemas fuzzy com efetiva implementação no Matlab e utilização de simulação no SIMULINK (MATSUMOTO, 2008).

O diagrama em blocos para o controlador fuzzy aplicado ao módulo Peltier deste trabalho é apresentado na Figura 5.6.1. O diagrama compara a referência de temperatura ( $T_{ref}$ ) com a temperatura medida no módulo Peltier ( $T$ ), gerando ambos um sinal de erro ( $ER_T$ ) e a variação do erro ( $\Delta ER_T$ ) obtida através do retardo de um tempo de amostragem ( $Z^{-1}$ ). Os blocos de retardo atrasam o sinal neste sistema em  $100 \mu s$  conseqüentemente o passo de simulação deve ser menor que esse valor. Na saída, o controlador fornece uma variação da tensão de alimentação para o módulo Peltier. Posteriormente é estabelecida a tensão de alimentação para a pastilha termoelétrica ( $V$ ) por meio da integração discreta (somatória) da variação de tensão.

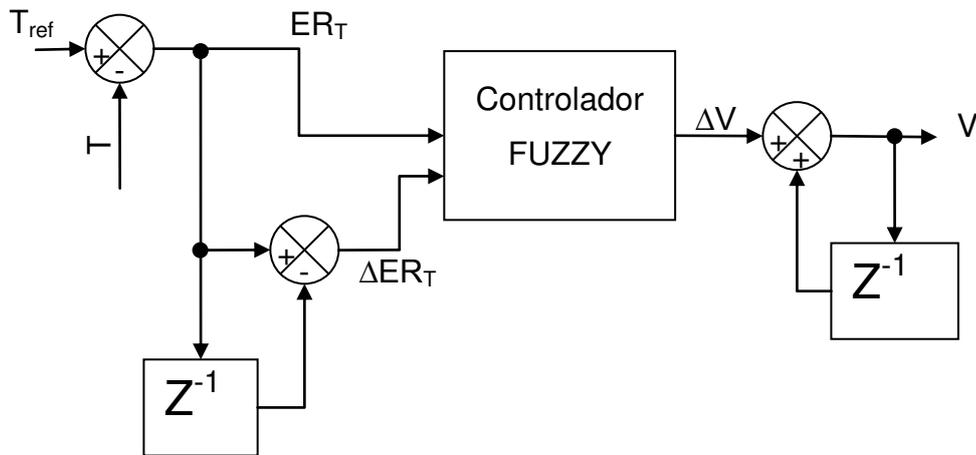


Figura 5.6.1 – Diagrama em blocos do controlador fuzzy para o módulo Peltier

Para o projeto do controlador fuzzy se tomou como variáveis de entrada do sistema o erro, **er**, e a taxa de variação do erro **der**. Como variável de saída foi adotado a tensão de alimentação **v**. Além disso, se assumiu para que os conjuntos fuzzy para estas variáveis **V**, **ER**, e **ΔER** são representados por sete qualificadores lingüísticos NB – negativo grande, NM – negativo médio, NS – negativo, ZE - neutro, PS - positivo, PM – positivo médio e PB – positivo grande. Na Tabela 5.6-1 são apresentados os qualificadores lingüísticos com suas respectivas funções de pertinências, representadas por nove qualificadores lingüísticos NVB - negativo muito grande, NB – negativo grande, NM – negativo médio, NS – negativo, ZE - neutro, PS - positivo, PM – positivo médio, PB – positivo grande e PVB - positivo muito grande, totalizando quarenta e nove possíveis combinações. Tais combinações são denominadas por antecedentes, gerando quarenta e nove regras da seguinte forma geral (PASSINO e YURKOVICH, 1998):

(5-1)

Onde  $n = 1, 2, \dots, N =$  número de regras,  $r = 7$ .

**Tabela 5.6-1 – Base de regras do controlador fuzzy aplicado ao módulo Peltier.**

		ERRO						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
VARIACÃO DO ERRO	NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NVB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	OS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

As funções de pertinência fuzzy representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas fuzzy. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência fuzzy para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso (KOVACIC e BOGDAN, 2005). É necessário se definir os formatos das funções de pertinência para cada variável do sistema, buscando a melhor cobertura dos respectivos universos de discurso. Neste caso, foram assumidas para as variáveis de entrada cinco funções de pertinência triangulares e duas trapezoidais e para a variável de saída foram sete triangulares e duas trapezoidais como podem ser observadas na Figura 5.6.2.

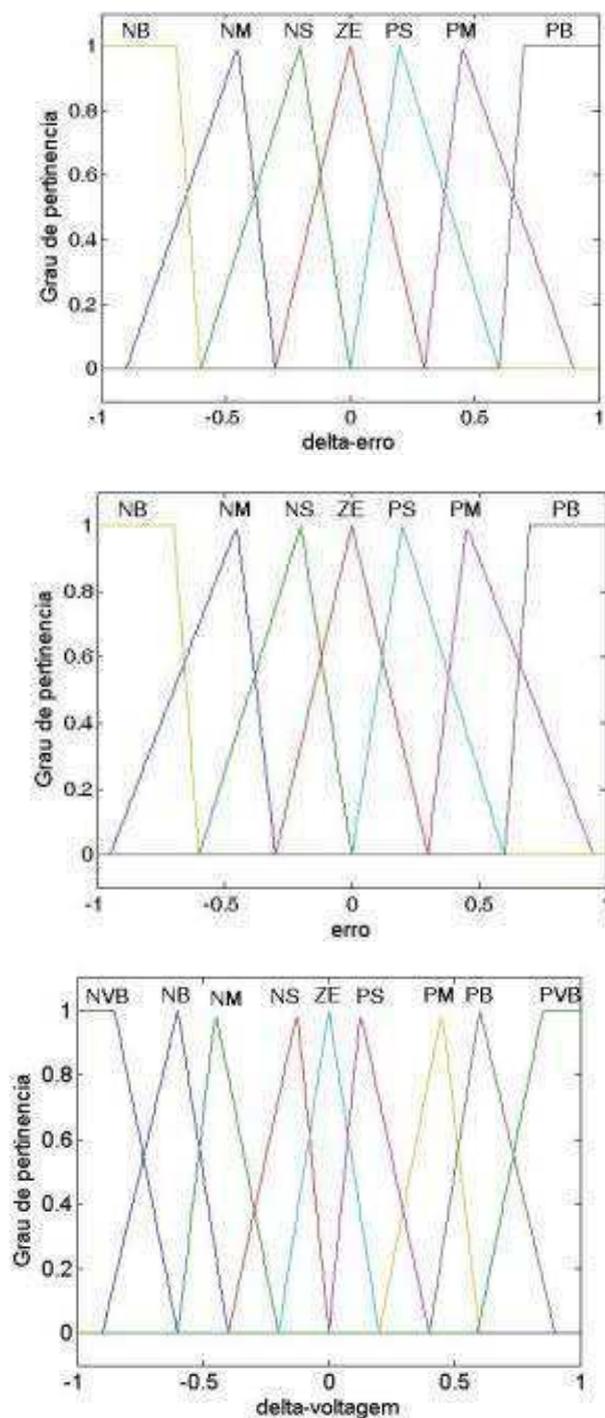


Figura 5.6.2 - Funções de pertinência fuzzy adotadas para cada variável definida.

O mapa de regras da Tabela 5.6-1 é uma implicação fuzzy matricial, também conhecida como matriz fuzzy associativa, onde as entradas implicam em uma determinada saída, ou de maneira similar saídas estão associadas com determinadas entradas. Essa matriz pode ser entendida como uma

superfície de controle, tridimensional, observada na Figura 5.6.3. O eixo vertical é a variável de saída (V) enquanto que em cada eixo horizontal estão às variáveis de entrada (ER e  $\Delta ER$ ).

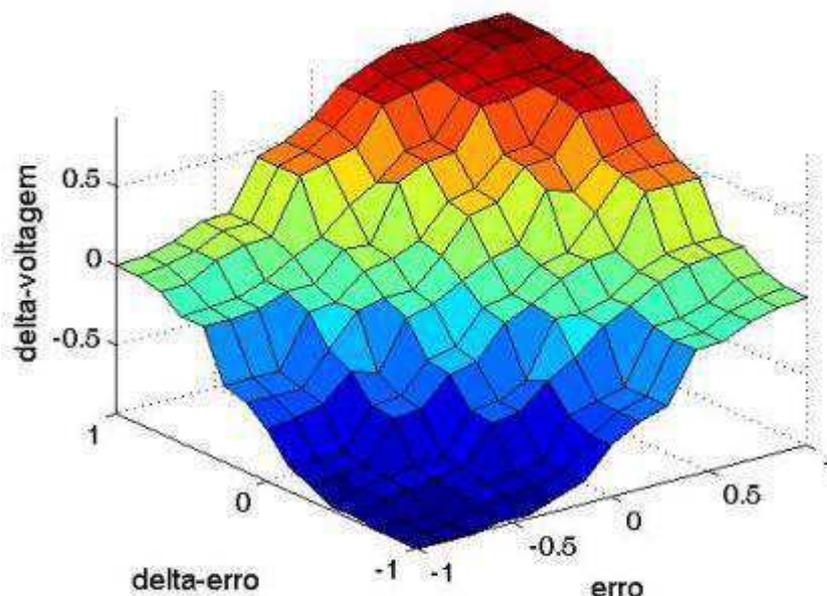


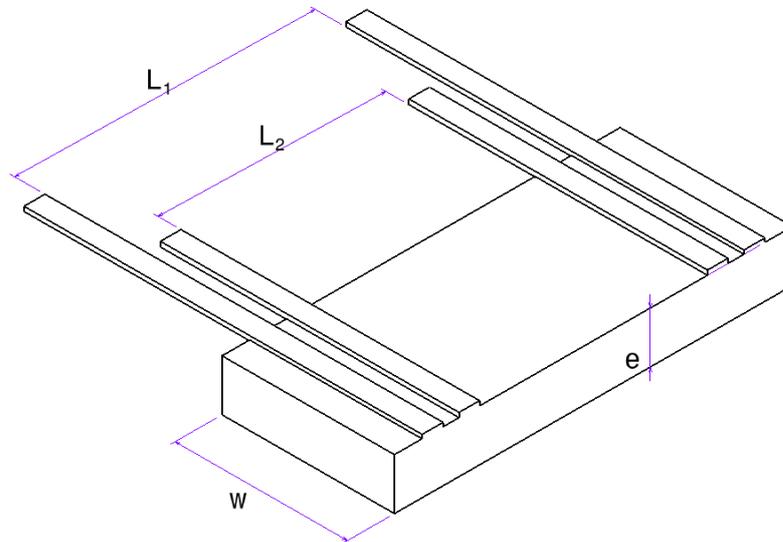
Figura 5.6.3 – Superfície de controle fuzzy.

Após realizar a sintonia do controlador fuzzy, utilizando o sistema de desenvolvimento para algoritmos **Fuzzy Logic Toolbox** do Matlab, foram efetuadas diversas simulações no aplicativo Simulink, também do Matlab, para analisar o comportamento do controlador para vários tipos de sinais de entrada, tais como senoide, dente de serra, degrau, rampa.

## 5.7. Experimentos de validação do equipamento

O método utilizado para testar a capacidade de medição do equipamento consistiu da determinação da curva de resistência elétrica em função da temperatura de uma amostra de cobre comercial e comparar o valor experimental com aquele apresentado na literatura (CALLISTER JR., 2000). Para isso, uma amostra do tipo lâmina delgada foi produzida por laminação a partir de um fio de cobre elétrico com diâmetro de 1,5 mm e 90 mm de

comprimento. Essa amostra, com os quatro fios de contato soldados, é esquematizada na Figura 5.7.1.



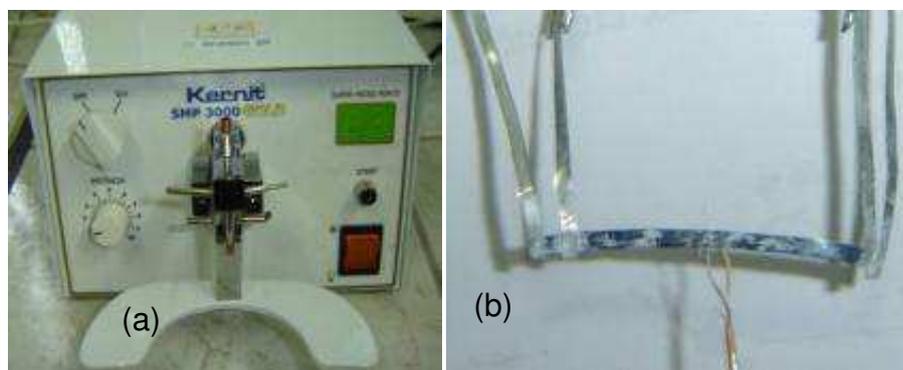
**Figura 5.7.1 –Representação esquemática da amostra de lâmina delgada de cobre elétrico.**

Os fios externos são ligados na interface elétrica B da Figura 5.4.6 (2) que funciona como uma fonte de corrente constante. Os fios internos são conectados em um dos canais da ferramenta de hardware (5) previamente programado como voltímetro. Após estas conexões elétricas, a amostra foi condicionada no interior do equipamento (1). Um termopar tipo K é instalado em cima da amostra e por ultimo a trava de compressão é fixada para reduzir a resistência térmica de contato entre a amostra e a superfície do módulo Peltier, como detalhado na Figura 5.3.2. A ciclagem térmica dessa amostra foi realizada entre 0 °C e 90 °C.

Para testar o desempenho do equipamento na caracterização térmica das LMF foram ensaiadas duas amostras. Uma amostra da liga 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% peso) fabricada no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UAEM/CCT/UFMG e outra obtida a partir da laminação a frio de um fio da LMF Ni-Ti (equiatômica) de diâmetro 0,45 mm adquirido junto a empresa Alemã Memory-Metalle, no estado bruto de conformação a frio. A metodologia utilizada fez também uso de um

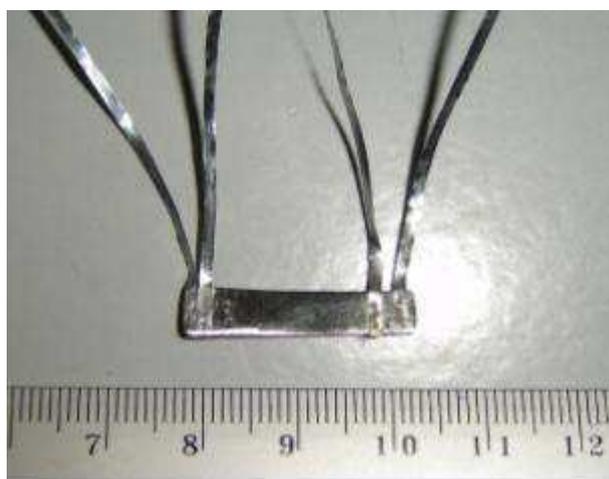
equipamento DSC da TA Instruments (modelo Q80) para caracterização destas mesmas amostras com a mesma taxa de aquecimento e resfriamento, para efeito comparativo.

A amostra da LMF Ni-Ti equiatômica apresenta um efeito evolutivo em suas temperaturas de transformação quando submetida a ciclos térmicos sucessivos (OTSUKA e WAYMAN, 1998). Neste caso, para se obter a uma amostra estável, após o processo de laminação foi realizado um tratamento térmico seguido de treinamento. O tratamento térmico consistiu de um recozimento por 15 minutos a 450 °C em um forno elétrico, seguido de resfriamento ao ar ambiente. Esse tratamento reduz o encruamento do processo de laminação e libera a transformação martensítica reversível responsável pelo aparecimento do fenômeno de memória de forma na amostra de LMF Ni-Ti. O processo de treinamento após o tratamento térmico consistiu em submeter à amostra de fitas Ni-Ti a uma carga mecânica constante (peso) equivalente a 200 MPa e 1000 ciclos de aquecimento e resfriamento por efeito Joule, através de corrente elétrica suficiente para promover a transformação do material, fazendo com que a lamina fosse deformada e em seguida contraída e expandida repetidamente sob carga. Após o processo de treinamento foi cortada uma lamina com aproximadamente 30 mm de comprimento para instalação de eletrodos com o uso de uma microsoldadora, conforme se mostra na Figura 5.7.2.



**Figura 5.7.2 - Microsoldadora Kernit SMP 3000 GOLD (a) e fita de Ni-Ti com o microtermopar e os eletrodos soldados (b).**

A amostra da liga LMF Ni-Ti-Cu não apresenta este efeito evolutivo das temperaturas de transformação de fase (DE ARAÚJO *et al.*, 2009) e conseqüentemente não é necessário o treinamento ou ciclagem térmica para garantir a estabilidade do material. A soldagem dos eletrodos de contato é realizada com a mesma microsoldadora por descarga capacitiva mostrada na Figura 5.7.2(a). Apresenta-se na Figura 5.7.3 uma fotografia da amostra de LMF Ni-Ti-Cu com os eletrodos soldados.



**Figura 5.7.3 - Amostra de LMF NiTiCu com os eletrodos soldados.**

Apresenta-se na Tabela 5.7-1 as dimensões das amostras que foram utilizadas nos experimentos de validação do equipamento.

**Tabela 5.7-1 - Dimensões das três amostras usadas para validar o equipamento desenvolvido.**

<b>Amostra</b>	<b>e (mm)</b>	<b>W (mm)</b>	<b>L2 (mm)</b>	<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>
Cobre	0,21	3,50	29,20	0,735
NiTiCu	1,70	4,10	16,20	6,97
NiTi	0,08	1,70	24,50	0,136

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Características de desempenho do sistema de controle

As características de desempenho do sistema de controle foram verificadas em termos de grandezas no domínio do tempo. Para a determinação do limite inferior em temperatura para o qual seria possível trabalhar com o equipamento, foram realizados testes experimentais de resfriamento. Nestes experimentos se verificou o comportamento da máxima temperatura negativa da superfície superior do módulo ( $T_c$ ). Na Figura 6.1.1 apresenta-se um gráfico com a comparação entre o sinal de alimentação do módulo Peltier (entrada) com a sua resposta em temperatura  $T_c$  (saída). Em uma análise do comportamento destas curvas mostradas na Figura 6.1.1 é possível verificar uma resposta em temperatura tendendo a curva de alimentação. Também foi possível atingir uma temperatura próxima de  $-60^\circ\text{C}$ , o que possibilita um resfriamento até uma temperatura de  $-50^\circ\text{C}$  (como limite inferior).

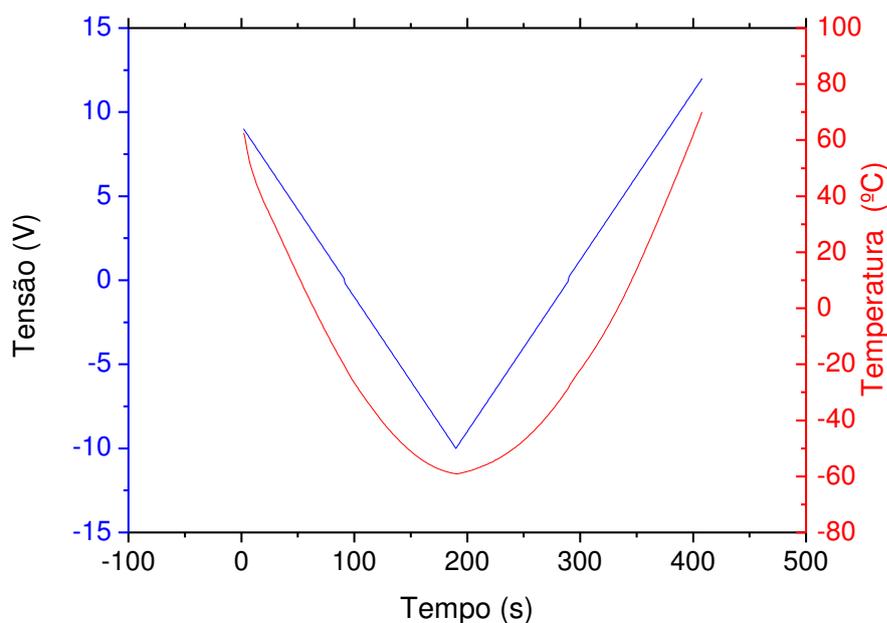
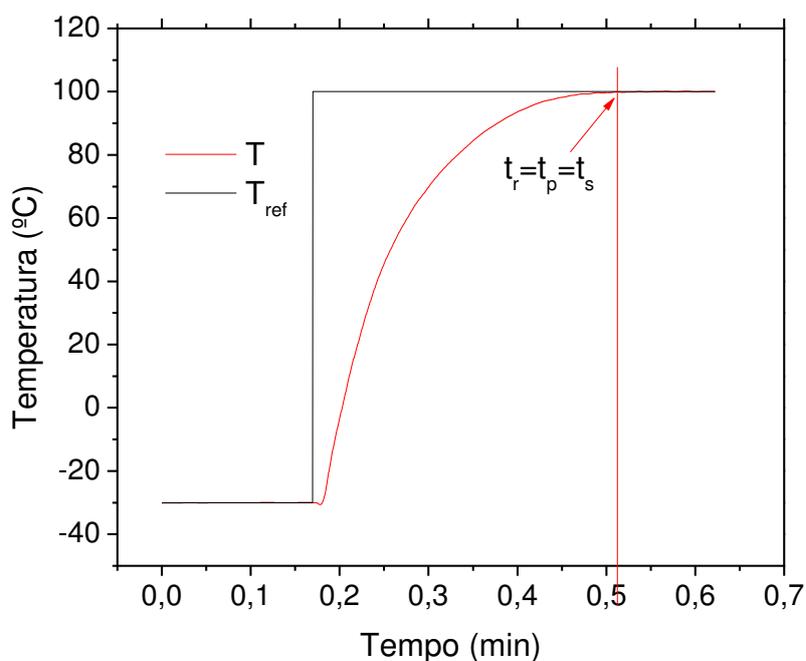


Figura 6.1.1 - Curvas T- t e V – t do módulo Peltier.

Freqüentemente, as características de desempenho de um sistema de controle são especificadas em termos da resposta transitória a uma excitação em forma de degrau (OGATA, 1998). Neste sentido, para verificar de forma experimental estas características de regime transitório, foram aplicadas a entrada do sistema de controle fuzzy, desenvolvido para o equipamento da Figura 5.4.6, dois sinais de excitação em forma de degrau de temperatura, um positivo (100°C) e outro negativo (-30°C). A resposta a um degrau positivo de temperatura  $T_{ref}$  é apresentada na Figura 6.1.2. Verifica-se que o instante de pico ( $t_p$ ), o tempo de subida ( $t_r$ ) e o tempo de acomodação ( $t_s$ ) são praticamente os mesmos, como também que não houve sobre-sinal.



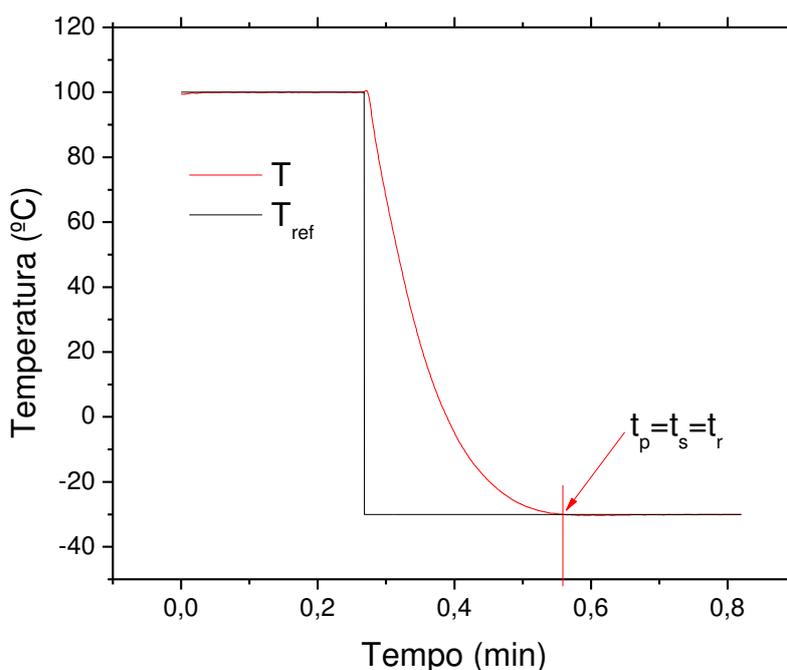
**Figura 6.1.2 - Resposta a uma excitação em degrau positivo de temperatura.**

Na Tabela 6.1-1 apresenta-se os valores de  $t_r$ ,  $t_p$ ,  $t_s$ , temperatura inferior, temperatura superior e taxa de aquecimento para o resposta em forma de degrau positivo da Figura 6.1.2. Estes valores foram extraídos da curva de resposta levando em conta a teoria de controle moderno apresentada na literatura (OGATA, 1998).

**Tabela 6.1-1 – Valores das características em resposta ao degrau positivo.**

$t_r$ (min)	$t_s$ (min)	$t_p$ (min)	$T_{\text{superior}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{inferior}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Taxa ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )
0,366	0,366	0,366	100	-30	355

Na Figura 6.1.3 observa-se a resposta a uma excitação em forma de degrau negativo. Da mesma maneira que a resposta a excitação em forma de degrau positivo, o instante de pico ( $t_p$ ), o tempo de subida ( $t_r$ ) e o tempo de acomodação ( $t_s$ ), coincidiram e não houve sobre sinal negativo. Porém, se observou uma taxa de resfriamento maior que a taxa de aquecimento comparando os valores da taxa nas tabelas 6.1-1 e 6.1-2.



**Figura 6.1.3 - Resposta a uma excitação em degrau negativo de temperatura.**

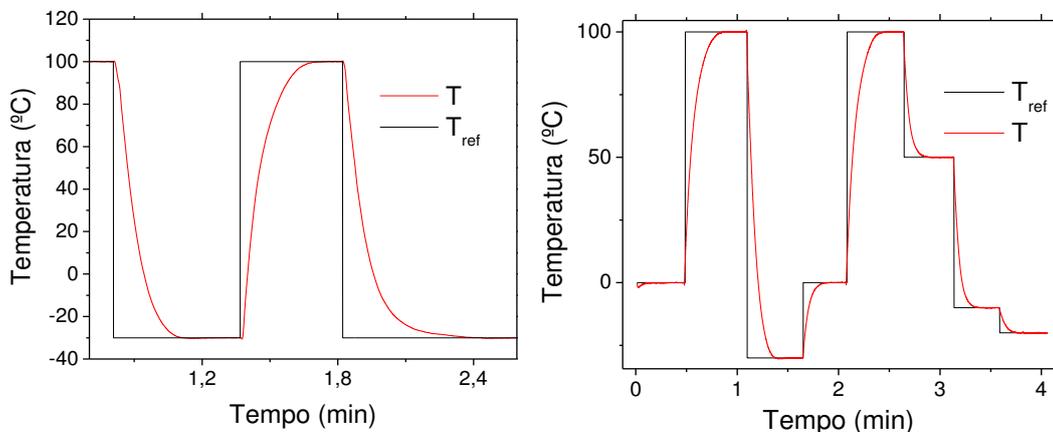
Na Tabela 6.1-2 apresenta-se os valores de  $t_r$ ,  $t_p$ ,  $t_s$ , temperatura inferior, temperatura superior e taxa de resfriamento para o resposta em forma de degrau negativo do gráfico da Figura 6.1.3. Nas curvas das Figura 6.1.2 e Figura 6.1.3 não se observaram oscilações amortecidas antes de se alcançar o estado ou regime permanente. Isto implica em uma resposta amortecida, porém relativamente lenta. Por outro lado, isso não é um problema para esta

aplicação em particular, levando em consideração que se trata de um problema de transferência de calor do módulo Peltier para uma amostra de LMF além de que, a máxima taxa de transferência de calor recomendada pelo fabricante do módulo Peltier está situada em torno de 200°C/min (LAIRD, 2010).

**Tabela 6.1-2 – Valores das características em resposta ao degrau negativo**

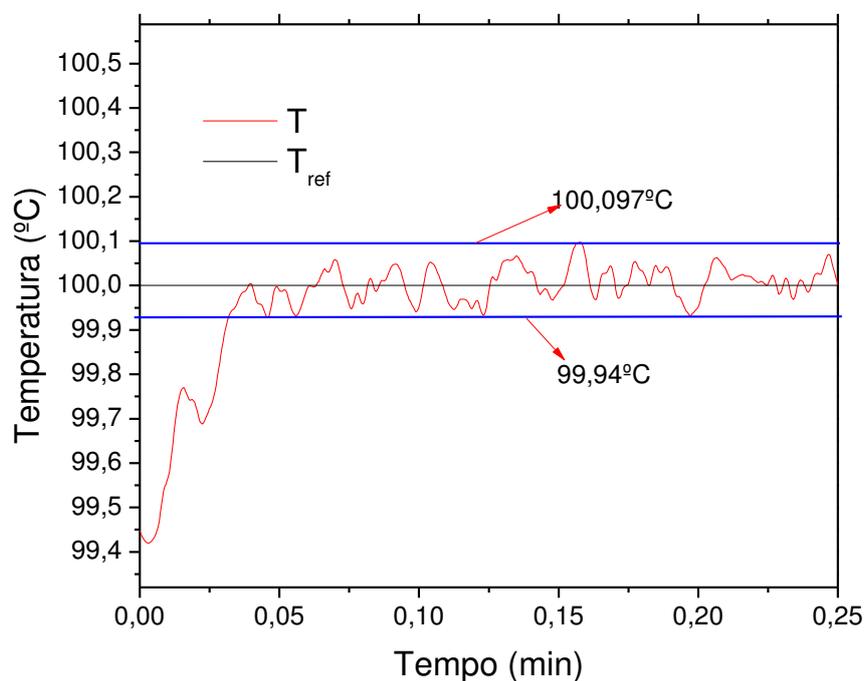
$t_r$ (min)	$t_s$ (min)	$t_p$ (min)	$T_{superior}$ (°C)	$T_{inferior}$ (°C)	Taxa (°C/min)
0,2908	0,2908	0,2908	100	-30	447

Como é possível observar nos gráficos apresentados na Figura 6.1.4, o sinal de saída  $T$  acompanhou de maneira aceitável, para o equipamento projetado, o sinal de referência  $T_{ref}$  em forma de degrau variável, caracterizando uma resposta transitória suficientemente rápida para o uso na caracterização das LMF's.



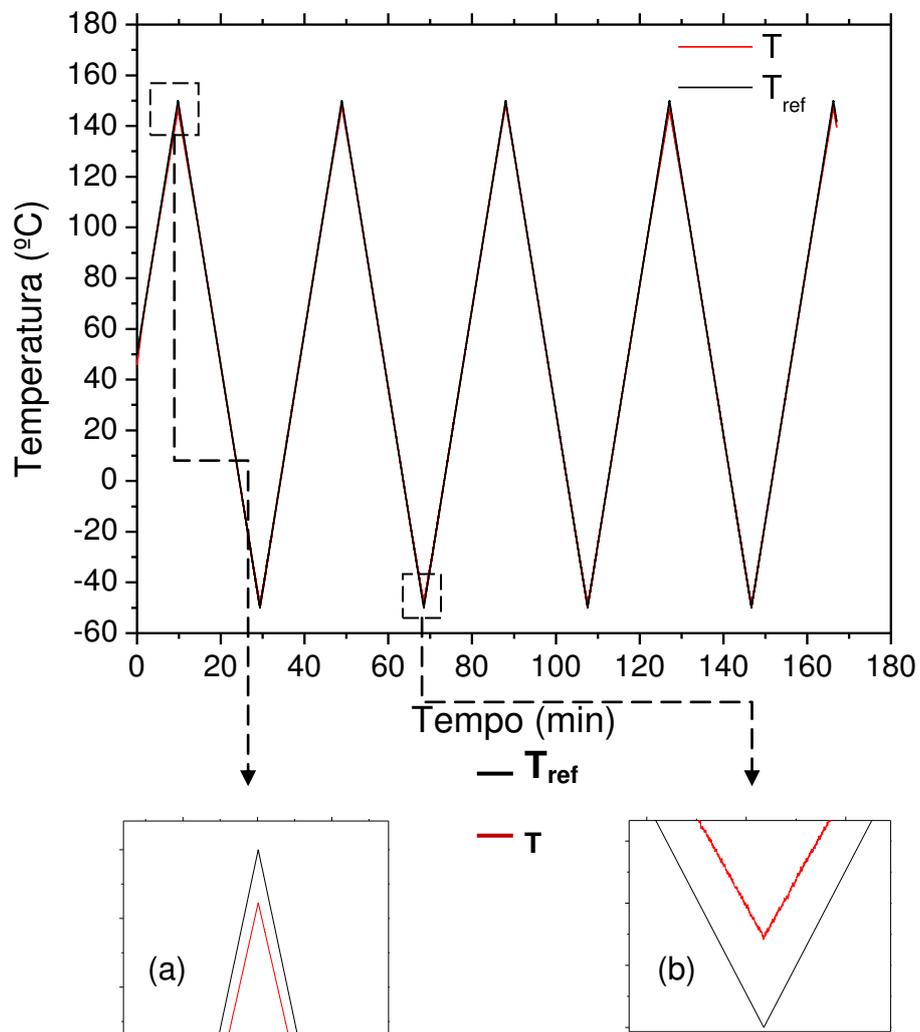
**Figura 6.1.4 - Resposta a um sinal de referência em forma de degrau variável**

Apresenta-se Na Figura 6.1.5 um detalhamento em zoom do gráfico mostrado na Figura 6.1.3 na região entre 0 e 0,25 min, onde é possível observar que o erro em regime permanente entre a temperatura de referência  $T_{ref}$  e a temperatura medida  $T$  se manteve abaixo de 0,16 %. Esse erro está bem abaixo do considerado normalmente pela literatura, que é um erro situado entre 2 % e 5 % (OGATA, 1998).



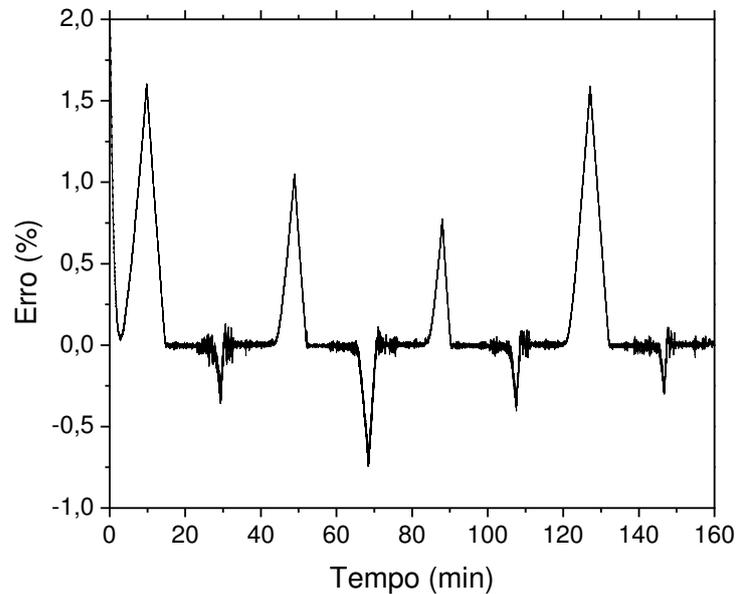
**Figura 6.1.5 - Erro estimado para o equipamento em regime estacionário.**

Apresenta-se na Figura 6.1.6 a resposta  $T$  a um sinal de referência  $T_{ref}$  em forma de uma função triangular, cuja inclinação corresponde à taxa de aquecimento e resfriamento desejada. Para esse teste foi gerada uma rampa em temperatura com os seguintes parâmetros: temperatura superior igual a  $150^{\circ}\text{C}$ , temperatura inferior de  $-50^{\circ}\text{C}$  e taxa de aquecimento e resfriamento de  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Na seqüência se aplicou esta rampa em temperatura na entrada do sistema de controle. Detalhes da resposta na inversão de sentido (pico e vale) são apresentados na Figura 6.1.6 (a) e (b). Verifica-se que a resposta experimental reproduz de maneira bastante aceitável o sinal de referência, gerado em rampa triangular. Em regime permanente o erro de acompanhamento observado foi inferior a 2 % que é menor que o erro considerado aceitável na literatura (OGATA, 1998).



**Figura 6.1.6 - Resposta do equipamento a vários ciclos térmicos de um sinal de referência em forma triangular.**

Um gráfico do comportamento do erro entre os sinais de referência ( $T_{ref}$ ) e medido ( $T$ ) da Figura 6.1.6 é apresentado na Figura 6.1.7 no qual se pode observar um erro máximo inferior a 2% ao longo de todo o experimento.



**Figura 6.1.7 - Erro entre os sinais de referência e medido durante o experimento da Figura 6.1.6.**

## **6.2. Resultados dos experimentos de validação do equipamento**

### **6.2.1. Determinação da resistividade elétrica do cobre comercial**

Mostra-se na Figura 6.2.1.1 o comportamento da resistência elétrica em função da temperatura obtida com o SMRT-Plus da Figura 5.3.5 para a amostra de cobre comercial esquematizada na Figura 5.7.1. Conforme esperado, observa-se claramente o comportamento linear da resistência elétrica com a temperatura, o qual é regido pela equação 6-1 obtida diretamente da Figura 6.2.1.1.

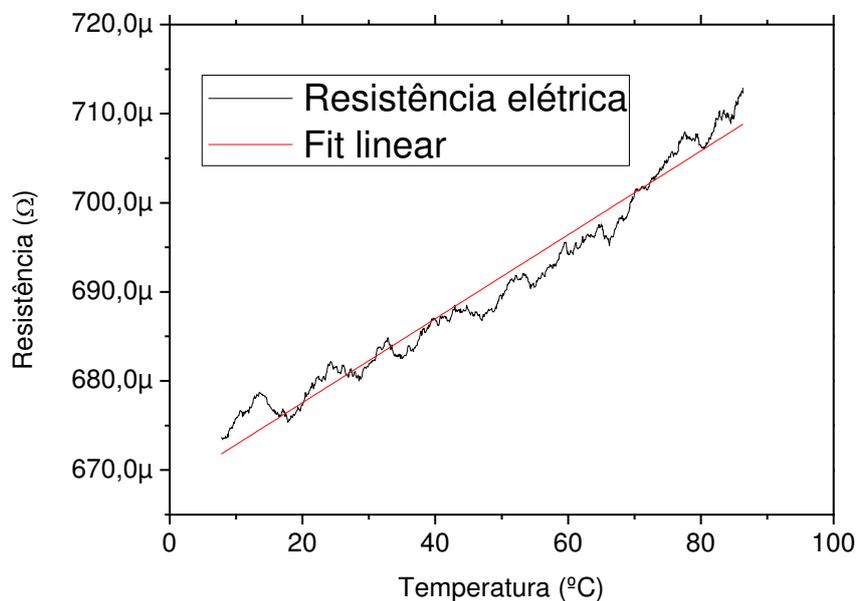
$$R(T) = 668,2 \times 10^{-6} + 470,9 \times 10^{-9} \cdot T \quad (6-1)$$

em que  $R$  é a resistência elétrica e  $T$  a temperatura da amostra.

A resistência elétrica em função da resistividade e da geometria da amostra é dada pela equação 6-2.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (6-2)$$

em que  $\rho$  é a resistividade elétrica do material,  $L$  é o comprimento e  $A$  é a área da seção transversal da amostra.



**Figura 6.2.1.1 - Curva R-T do cobre comercial**

Obtendo a resistência elétrica a 20°C a partir da equação 6-1 e aplicando juntamente com os valores numéricos da geometria da amostra (Tabela 5.7-1) na equação 6-2 obtém-se o valor da resistividade elétrica  $\rho(20^{\circ}\text{C}) = 1,706 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . Segundo CALLISTER Jr. (2000), a resistividade elétrica do cobre a 20°C é  $\rho(20^{\circ}\text{C}) = 1,720 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . Assim, é possível afirmar que o erro experimental verificado na determinação da resistividade elétrica do cobre com o SMRT-Plus da Figura 5.3.5 é da ordem de 0,84%, indicando que o sistema de medição desenvolvido tem excelente capacidade de ser aplicado para caracterização da transformação de fase das LMF.

## 6.2.2. Caracterização térmica das LMF

Observa-se na Figura 6.2.2.1 o comportamento das curvas R-T para a amostra de Ni-Ti-Cu. Este é o comportamento típico da maioria das LMF, semelhantemente aquele já apresentado na Figura 4.1.1. Os parâmetros do ensaio foram: temperatura superior igual a 80°C, temperatura inferior igual a -10°C e taxa de aquecimento e resfriamento de 5 °C/min. A partir desta curva foram obtidas as temperaturas de transformação de fase para a amostra de Ni-Ti-Cu pelo método das tangentes como demonstrado na Figura 6.2.2.1.

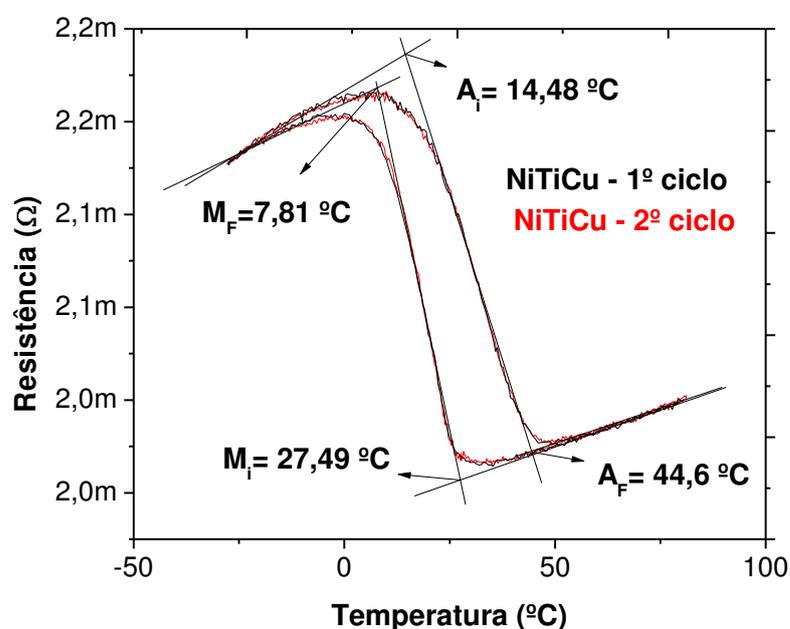


Figura 6.2.2.1 - Curva R-T para a amostra LMF 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso).

Para a caracterização desta amostra de LMF pela técnica DSC, foi cortada uma pequena porção (aproximadamente 19 mg) da mesma amostra empregada no ensaio correspondente a Figura 6.2.2.1. Essa amostra foi cortada em uma cortadeira de precisão que utiliza como ferramenta de corte um disco diamantado trabalhando em baixa velocidade de corte. Dessa forma foi possível evitar que fossem introduzidas deformações excessivas na amostra, que poderiam influenciar o resultado. Após o corte da amostra, fez-se

a limpeza submergindo-a por 10 segundos em uma solução ácida (3%HF+15%HNO<sub>3</sub>+82%H<sub>2</sub>O, em volume) para retirar eventuais camadas de oxido que possam ter se formado, além de gorduras impregnadas em sua superfície. O ensaio foi realizado fazendo-se variar a temperatura de -40 °C até 80 °C. Apresenta-se na Figura 6.2.2.2 o resultado obtido por DSC.

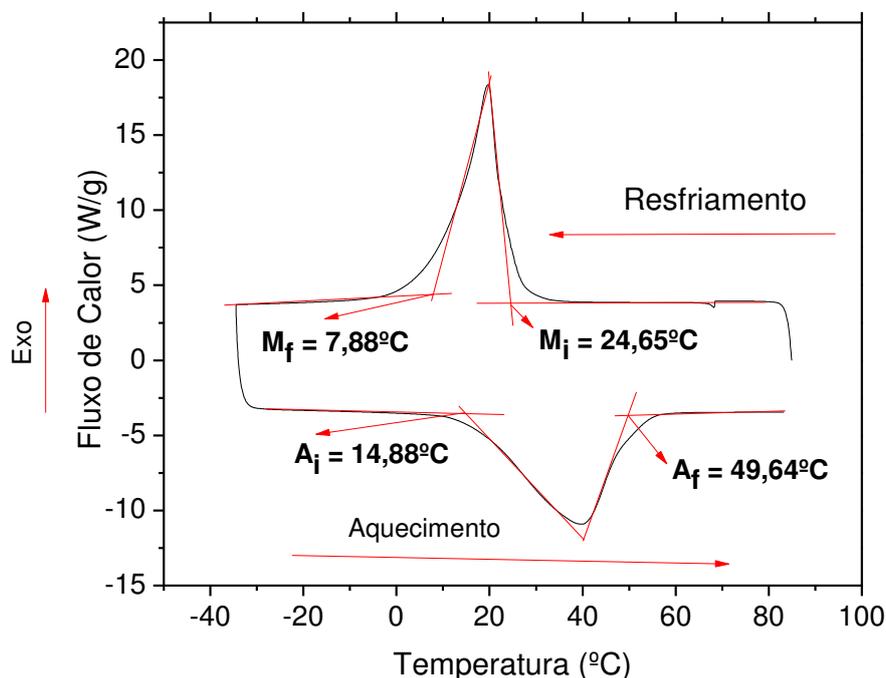
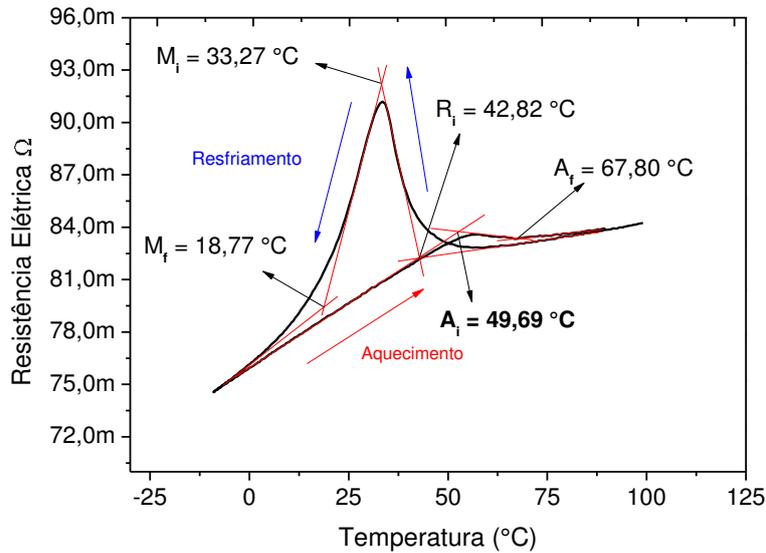


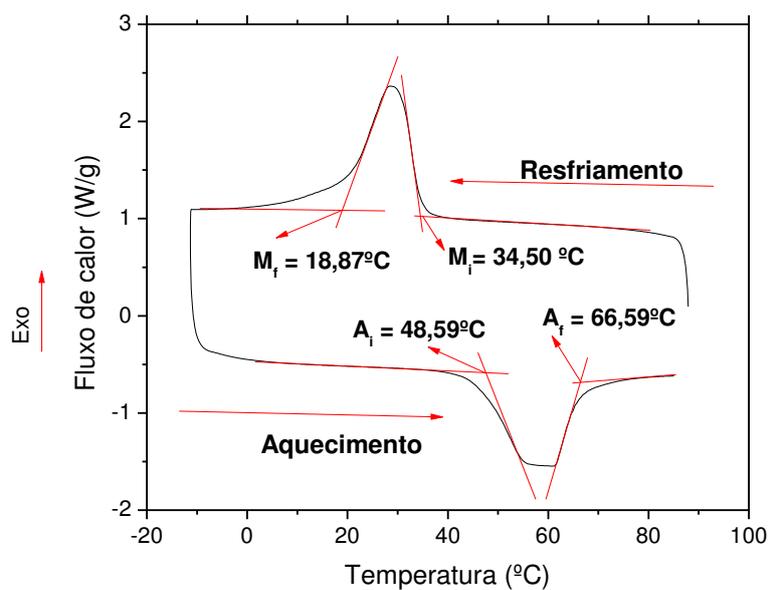
Figura 6.2.2.2 - Curva de DSC obtida para a amostra de LMF Ni-Ti-Cu.

A curva de resistência elétrica em função da temperatura para a amostra da liga Ni-Ti equiatômica em forma de fita é apresentada na Figura 6.2.2.3. Neste ensaio foram utilizados os mesmos parâmetros aplicados na amostra de LMF Ni-Ti-Cu. Pelo método das tangentes, da mesma forma utilizada anteriormente, foram determinadas as temperaturas de transformação de fase.



**Figura 6.2.2.3 - Resistência elétrica em função da temperatura para a fita Ni-Ti equiatômica**

Foi realizado o experimento de caracterização térmica para a amostra de LMF Ni-Ti equiatômica na forma de fita também por meio do DSC. Utilizou-se a mesma metodologia empregada na preparação da amostra de Ni-Ti-Cu, descrita anteriormente, para o ensaio de DSC. Na Figura 6.2.2.4 é possível observar o resultado obtido neste experimento.



**Figura 6.2.2.4 - Curva de DSC obtida para a fita da Liga Ni-Ti equiatômica.**

Na Tabela 6.2.2-1 são apresentadas as temperaturas de transformação das amostras de LMF determinadas a partir das Figuras 6.2.2.1, 6.2.2.2, 6.2.2.3 e 6.2.2.4 facilitando a comparação entre os valores encontrados usando as duas técnicas. Comparando os resultados das temperaturas de transformação para as duas técnicas empregadas, observa-se que para uma mesma amostra os resultados foram praticamente invariáveis, validando dessa forma o equipamento de medição desenvolvido quanto à aplicação proposta de obtenção das temperaturas de transformação de fase em LMF.

**Tabela 6.2.2-1 - Temperaturas de transformação de fase das amostras estudadas.**

	LMF Ni-Ti			LMF Ni-Ti-Cu		
	DSC	SMTR-Plus	Erro relativo	DSC	SMTR-Plus	Erro relativo
	° C	° C	%	° C	° C	%
A <sub>i</sub>	48,59	49,69	2,26	14,88	14,80	0,53
A <sub>f</sub>	66,59	67,80	1,82	49,64	44,60	10,15
M <sub>i</sub>	34,50	33,27	3,56	24,65	27,49	11,52
M <sub>f</sub>	18,87	18,77	0,52	7,88	7,81	0,88

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com este trabalho permitem concluir que o módulo Peltier é perfeitamente aplicável na caracterização térmica de ligas com memória de forma (LMF). O projeto e implementação da plataforma experimental concebida originou o depósito de uma patente em nível nacional.

Com o equipamento desenvolvido, denominado SMRT-Plus, é possível determinar as curvas características do comportamento da resistência elétrica em função da temperatura de LMF, usando taxas de resfriamento e/ou aquecimento variadas e controladas, podendo realizar ciclagens térmicas entre - 50 °C e 150 °C. O fato de possuir controle de taxas de resfriamento e aquecimento viabiliza o estudo futuro do comportamento fundamental das LMF para diferentes taxas.

O SMRT-Plus será de especial utilidade para a verificação e quantificação das temperaturas de transformação de fase nas LMF produzidas no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UAEM/CCT/UFCG.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRATEC. **Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria**, 2007. Disponível em: <[http://abratec1.tempsite.ws/abratec/download/anal\\_termica.zip](http://abratec1.tempsite.ws/abratec/download/anal_termica.zip)>. Acesso em: 22 jun. 2010.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência de Engenharia de Materiais: uma Introdução**. LTC, 2000. 589 p. ISBN 8521612885.

CHANG, S. H.; WU, S. K. Effect of cooling rate on transformation temperature measurements of Ti50Ni50 alloy by differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis. **Materials Characterization**, v. 59, 2008. 987-990.

DE ARAÚJO, C.J; GOMES, A.A.C.; SILVA, J.A.; CAVALCANTI, A.J.T.; REIS, R.P.B.; GONZALEZ, C.H. Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push–pull process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, 2009. 3657–3664.

ERICKSON, B. E. The many faces of thermal analysis. **Analytical Chemistry News & Features**, 1999. 689A-692A.

IBRAHIM, A. **Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications**. Newnes Press, 2003. 312 p. ISBN 978-0-7506-7605-2.

KOVACIC, Z.; BOGDAN, S. **Fuzzy Controller Design: Theory and Applications**. 1<sup>o</sup> Edição. CRC Press, 2005. 416 p. ISBN 13: 978-0849337475/10: 084933747X.

LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications**. Springer Science+Business Media, LLC, 2008. 446 p. ISBN 978-0-387-47684-1.

LAIRD, T. Thermoelectric Modules. **Laird Technologies**, p. 19, 2010. Disponível em: <<http://www.lairdtech.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=5016>>. Acesso em: 02 jul. 2010.

MATSUMOTO, É. Y. **SIMULINK 7.2 Guia Prático**. 1<sup>o</sup> Edição. ed. São Paulo: Érica, 2008. ISBN 978-85-365-0215-1.

NAGAI, H.; OISHI, R. Shape memory alloys as strain sensors in composites. **Smart Materials and Structures**, v.15, 2006. 493–498.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3<sup>o</sup> Edição. Prentice-hall do Brasil LTDA, 1998. 813 p. ISBN 85-7054-074-4.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**. New York: Cambridge University Press, 1998. ISBN 0-521-44487-x.

PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S. **Fuzzy control.**, 1998. 522 p. ISBN 020118074 / 978-0201180749.

POTAPOV, P. L. Thermoelectric triggering of phase transformations in Ni–Ti shape memory alloy. **Materials Science and Engineering A**, v. B52, 1998. 195–201.

REIS, R. P. B. Desenvolvimento de um sistema de ciclagem térmica utilizando o efeito termoelétrico: aplicação a caracterização de ligas com memória de forma. **Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)**, Campina Grande, 2008 a. 33p.

REIS, R.P.B.; DE ARAUJO, C.J.; SILVA, L.A.R.; QUEIROGA, S.L.M. Desenvolvimento de um sistema de medição de resistência elétrica em função da temperatura: aplicação a caracterização de ligas com memória de forma. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2006)**, Recife, 2006. 1-10.

REIS, R.P.B.; GOMES, A.A.C.; NETO, J.F.C.; RODRIGUES, L.F.A.; DE ARAÚJO, C.J. Desenvolvimento de um Sistema de Ciclagem Térmica Utilizando o Efeito Termoelétrico: Aplicação a Caracterização de Ligas com Memória de Forma. **V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2008)**, Salvador. 2008 c. 1-8.

REIS, R.P.B.; DE ARAUJO, C.J.; GOMES, A.A.C.; NETO, J.F.C.; RODRIGUES, L.F.A. Desenvolvimento de um sistema de medição de temperaturas de transformação em ligas com memória de forma utilizando Pastilha Termoelétrica. **18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos materiais (CBECiMat 2008)**, Porto de Galinhas, 2008b. 1-8.

ROMANO, R.; TANNURI, E. A. Modelagem e Validação Experimental de um Atuador Baseado em Liga de Memória de Forma **Revista Controle & Automação**, v. 19, 2008. p. 30-42.

ROWE, D. M. **CRC Handbook of thermoelectrics**. CRC Press, 2005. ISBN 13: 9780849301469.

SELDEN, B.; CHO, K.-J.; ASADA, H. H. Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect. **international Conference on Robotics & Automation**, New Orleans, 2004. 4931-4936.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2º Edição. ed. São Paulo: Blucher, 2007. ISBN 978-85-212-0416-9.

SUN, L.; HUANG, W. M.; CHEAH, J. Y. The temperature memory effect and the influence of thermo-mechanical cycling in shape memory alloys. **Smart Materials and Structures**, v.19, 2010. 8pp.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6º Edição. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2003. 577 p. ISBN 8521203276.

YAMBE, T.; MARUYAMA, S.; TAKAGI, H.; TANAKA, A.; OHI, R.; TAKEDA, H.;  
NITTA, S. Application of a shape memory alloy for internal artificial organs. **The  
Japanese Society for Artificial Organs**, v.4, 2001.p. 88-91.