

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MAXSUEL FERREIRA CUNHA

DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO
DE FASES EM MATERIAIS DE LIGAS COM MEMÓRIA
DE FORMA UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO

JOÃO PESSOA

2017

MAXSUEL FERREIRA CUNHA

DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO
DE FASES EM MATERIAIS DE LIGAS COM MEMÓRIA
DE FORMA UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

JOÃO PESSOA

2017

Cunha, Maxsuel Ferreira

Determinação das temperaturas de transformação de fases em materiais de ligas com memória de forma utilizando material piezoelétrico./ Maxsuel Ferreira Cunha. – João Pessoa, 2017.

56f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

MAXSUEL FERREIRA CUNHA

DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO
DE FASES EM MATERIAIS DE LIGAS COM MEMÓRIA
DE FORMA UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Prof. Dr. Alexsandro José Virgínio dos Santos
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Prof. Dr. Ramon Alves Torquato
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por seu amor incondicional.

À minha mãe pelo esforço constante, e ter sido a minha fonte inspiradora em todos os momentos.

Ao meu irmão e ao meu pai pelos conselhos e ajuda, embora distantes, sempre me apoiaram.

Ao professor e orientador Cícero pelo apoio, incentivo e confiança. Além de contribuir diariamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao professor Alexsandro por estar sempre disponível ajudando com discussões construtivas.

Sou muito grato ao meu amigo José Marques pela amizade, conselhos, motivação e ajuda nas pesquisas.

Ao meu amigo Bruno Vasconcelos pelo companheirismo, conselhos e motivação.

Aos colegas do Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA), Alan, Angelo e Renato, pela atenção e disposição de sempre.

Assim como à infraestrutura oferecida pelo LaSEA, onde este e outros trabalhos foram desenvolvidos.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio, em especial ao meu amigo Victor de Medeiros.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho, e fizeram parte desta etapa de minha vida.

“What you get by achieving your goals is not as important as what you become by achieving your goals”

Thoreau, 2015.

RESUMO

O estudo das ligas com memória de forma (LMF) tem sido bastante difundido em centros de pesquisas, com potenciais aplicações em diversos setores da indústria, biomedicina, automotiva e aeroespacial. Suas características peculiares as tornam atraentes para o uso como atuador. Para utilizá-las de maneira adequada é necessário conhecer as propriedades envolvidas no processo de transformação de fase, onde este mecanismo é responsável por proporcionar a sua funcionalidade. Neste contexto, este trabalho propõe um método para determinar as temperaturas envolvidas nessa transformação de fase. No qual é utilizado a técnica de impedância eletromecânica (EMI) em uma heteroestrutura PZT/LMF (NiTi), com o piezoelétrico como elemento sensor. É apresentada uma caracterização térmica e elétrica desses materiais. Para isto, uma máquina térmica foi devidamente elaborada para fornecer calor as amostras de PZT/LMF. Este equipamento é formado por células termoelétricas com um sistema de controle de temperatura e uma instrumentação eletrônica funcional dentro dos requisitos. Além disso, as medições de impedância elétrica foram efetuadas com um analisador de impedância comercial de alta precisão. Uma interface gráfica em ambiente LabVIEW™ também é apresentada, a qual foi desenvolvida para manipulação dos dados e facilitar o manuseio dos experimentos. Resultados das transformações de fases com a heteroestrutura são apresentados, com diferenças entre 33% e 5%, sendo comparados com outro método consolidado para este tipo de ensaio, o DSC (*Differential Scanning Calorimetry*). Além disso, são apresentadas as respostas de atuação do controlador na máquina térmica utilizada para esse trabalho.

Palavras-Chave: Impedância Eletromecânica, Heteroestrutura, Materiais Piezoelétricos, Ligas com Memória de Forma.

ABSTRACT

The study of Shape Memory Alloys (SMA) has been widespread in several research centers, and they have potential applications in areas of industry, biomedical, automotive and aerospace. Their singular characteristics become them attractive for the use as actuator. It is required to know the properties involved in the phase transformation process, where this mechanism is responsible for their functionality. In this context, the present work shows a method to determine the phase transformation temperatures present in this process. In which the electromechanical impedance technique (EMI) is used with a PZT/NiTi heterostructure, and a piezoelectric as sensor element. It is presented a thermal and electrical characterization of these materials. For this, a thermal machine was developed to provide heat to the PZT/LMF specimens. This equipment contains thermoelectric cells with temperature control system and an electronic instrumentation, functional within the requirements. Besides that, a commercial impedance analyzer with high accuracy has been used to measure the electrical impedance. A graphical interface at a LabVIEW™ environment is also shown, which was developed to manipulate the data and produce an easy experimental handling. Resultados das transformações de fases com a heteroestrutura são apresentados, com diferenças entre 33% e 5%, sendo comparados com outro método consolidado para este tipo de ensaio, o DSC (*Differential Scanning Calorimetry*). Results of temperatures phase transformation with the heterostructure are present, there are differences between 33% and 5%, when compared with another consolidated method, the DSC (Differential Scanning Calorimetry). Moreover, actuation responses of the thermal machine controller used in this work are shown.

Keywords: Electromechanical Impedance, Heterostructure, Piezoelectric Materials, Shape Memory Alloys.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comportamento de tensão versus deformação em diferentes condições térmicas .	13
Figura 2 – Comportamento da estrutura cristalina na transformação e deformação	14
Figura 3 – Curva típica de um ensaio de DSC para uma amostra de NiTi.....	15
Figura 4 – Ensaio de resistividade de uma amostra de NiTiCu.....	15
Figura 5 – Ferramenta cirúrgica com LMF	16
Figura 6 – Mão robótica acionada por LMF.....	16
Figura 7 – Protótipo de asa adaptativa acionado por LMF.....	17
Figura 8 – Motor termoelétrico acionado por molas de LMF	17
Figura 9 – Estrutura cristalina de uma cerâmica piezoelétrica tradicional abaixo da temperatura de Curie	19
Figura 10 – Relação entre deformação e tensão elétrica de acordo com a polarização do material	19
Figura 11 – Esquemático de um sensor (PZT) colado a uma estrutura para monitoramento estrutural	21
Figura 12 – Fluxograma simplificado do procedimento experimental.....	25
Figura 13 – Amostras confeccionadas para ensaio.....	26
Figura 14 – Esquemático da máquina térmica	27
Figura 15 – Módulo Peltier comercial	28
Figura 16 – Esquemático do circuito de acionamento das células Peltier.....	30
Figura 17 – Diagrama em blocos do sistema térmico	31
Figura 18 – Diagrama em blocos do PID implementado no ambiente LabVIEW™	32
Figura 19 – Interface gráfica no LabVIEW™ para aplicação do método de sintonia	34
Figura 20 – Visão frontal do analisador de impedância Agilent 4294A	35
Figura 21 – Ponta de prova utilizada no analisador.....	35
Figura 22 – Esquemático simplificado da estrutura montada para ensaios.....	37
Figura 23 – Interface para ensaio de impedância	38
Figura 24 - Bancada experimental.....	38
Figura 25 – DSC da amostra bruta	39
Figura 26 – Resposta de temperatura da máquina térmica para uma entrada em rampa	41
Figura 27 – Amostra de NiTi com frequência de (a) 40 Hz, (b) 1 kHz e (c) 50 kHz.....	41
Figura 28 – Análise de impedância da amostra de Aço	42
Figura 29 – Análise de impedância da amostra de Cobre	43

Figura 30 – Análise de impedância da amostra de Latão	43
Figura 31 – Resposta da fase da amostra de NiTi com uma frequência de 1 kHz	44
Figura 32 – Resposta da temperatura em função do tempo na amostra de NiTi à 1kHz	44
Figura 33 – DSC da amostra de NiTi após ciclagem e tratamento térmico	45
Figura 34 – Resposta de impedância da amostra de NiTi com frequência de 1 kHz e retas tangentes	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do módulo TEC1-12706	29
Tabela 2 – Cálculo dos parâmetros do controlador pelo método de sintonia Ziegler-Nichols	32
Tabela 3 – Comandos utilizados para configuração dos parâmetros do analisador 4294A	36
Tabela 4 – Parâmetros dos controladores obtidos pela sintonia	40
Tabela 5 – Parâmetros dos controladores após ajustes	40
Tabela 6 – Comparação das temperaturas de transformação pelo método proposto (EMI) e pelo DSC	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1.	LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.....	12
1.2.	MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	18
1.3.	ACOPLAMENTO ESTRUTURAL	20
1.4.	OBJETIVO GERAL	23
1.4.1	Objetivos específicos.....	23
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
2.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	25
2.2	MÁQUINA TÉRMICA	27
2.2.1	Células de efeito Peltier	28
2.2.2	Circuito para acionamento	29
2.2.3	Controle de temperatura.....	30
2.3	ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA	34
2.4	INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	37
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	APÊNDICE A – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ROTINA IMPLEMENTADA EM LabVIEW™ PARA SINTONIA PELO MÉTODO DA CURVA DE REAÇÃO.....	51
	APÊNDICE B – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ROTINA IMPLEMENTADA EM LabVIEW™ PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE IMPEDÂNCIA.....	52
	APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ROTINA IMPLEMENTADA EM LabVIEW™ PARA CONFIGURAÇÃO DO ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA VIA GPIB	53

1 INTRODUÇÃO

A competitividade nos setores industrial, médico, militar, aeroespacial, automotivo e comercial tem proporcionado buscas por novas tecnologias, afim de atender as necessidades encontradas. Os materiais são considerados como elementos essenciais para suprir esse tipo de demanda. Dentre as classes existentes, os materiais inteligentes têm sido alvo de pesquisas por possuírem características peculiares. Quando integrados em estruturas mecânicas para desenvolver funcionalidades estruturais, dão origem à sistemas inteligentes, com capacidades de alterar o seu estado e a sua característica, como posição e rigidez (SUN, 2015).

Esse grupo de materiais é caracterizado por acoplar diretamente dois domínios físicos distintos com um grau mais elevado que os convencionais. Eles são geralmente muito atraentes em aplicações de atuação e sensoriamento, com o intuito de executar uma função de maneira predeterminada com um estímulo do ambiente. Essas interações podem ser de natureza térmica, elétrica, química, mecânica, ótica ou magnética (SUN, 2015; LEO, 2007). Os sistemas inteligentes buscam compactar esses materiais a um circuito de controle em uma única unidade, possibilitando a realização de sistemas autônomos. O escopo de atuação desses dispositivos estende-se à problemas de engenharia, que em certas circunstâncias não são solucionáveis com materiais comuns.

No campo do monitoramento estrutural, os materiais inteligentes são utilizados para aumentar a eficiência do sistema através da redução da vibração mecânica, como em equipamentos de ar condicionado, satélites, aeronaves, ou máquinas industriais. Alguns deles ainda podem ser utilizados na biomédica, para substituição de músculos artificiais, na ortodontia, para auxiliar nos tratamentos ortodônticos, ou até na substituição de ferramentas para procedimentos cirúrgicos. Na área militar eles podem ajudar a identificar o alvo de maneira eficiente, com a redução do volume, que facilita o transporte. Em indústrias nucleares seu uso pode oferecer oportunidades para melhoria da segurança, com a redução da exposição humana nos ambientes de radiação (AHER et al., 2015).

Um dos principais materiais utilizados em aplicações de sistemas inteligentes são as ligas com memória de forma e as cerâmicas piezoelétricas, os quais possuem capacidades de interação termomecânica e eletromecânica, respectivamente. Em engenharia civil destaca-se o uso de piezoelétricos como sensores em sistemas embarcados para medição de integridade estrutural, e das ligas com memória de forma para substituição de ligas usuais, buscando otimizar as propriedades mecânicas da edificação (SINGH e SINGH, 2015). Diante da relevância desses materiais no atual cenário tecnológico e as constantes pesquisas no que diz

respeito a novas formas de utilizá-los eficientemente, o presente trabalho apresenta uma caracterização de parâmetros térmicos através de medição de impedância elétrica, contribuindo nesse campo de pesquisa.

1.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma (LMF) são materiais que apresentam características não encontradas em ligas metálicas comuns, o que implica na possibilidade de utilização em diversas aplicações. O comportamento tensão-deformação dessas ligas é não linear, em certas condições, com dois efeitos distintos: pseudoelasticidade e memória de forma. O efeito memória de forma (EMF) é caracterizado pela capacidade de recuperar grandes deformações (até 8%), que são aparentemente plásticas, através de aquecimento. Já na pseudoelasticidade ocorre a recuperação completa de grandes deformações, sem a necessidade de aplicação de calor ao material. No EMF a transformação de fase é induzida por temperatura, e na pseudoelasticidade por tensão mecânica (LAGOUDAS, 2008).

Os materiais com memória de forma mais utilizados são as ligas formadas por Níquel e Titânio (NiTi), como consequência de maiores deformações e maior estabilidade serem atingidas com esta composição. Eles foram inicialmente observados no *Naval Ordnance Laboratory* (NOL), o que levou a serem denominados de Nitinol (LAGOUDAS, 2008). Apesar da popularidade dessas ligas, em algumas aplicações é inserido um terceiro elemento (como o cobre na liga de Ti-45Ni-5Cu) para obter uma relação entre resistência elétrica e temperatura mais linear, isto decorre da eliminação da fase intermediária (fase R) (LIU et al., 1997).

A habilidade da liga de NiTi recuperar completamente deformações deve-se a mudança de fase, que pode ser induzida por tensão mecânica ou calor. Essas fases estão associadas à temperaturas específicas, a fase de temperatura mais alta é definida como austenita e a fase de temperatura mais baixa como martensita. No processo de transformação de fase há quatro temperaturas envolvidas: As, Af, Ms e Mf, austenita inicial, austenita final, martensita inicial e martensita final, respectivamente. Cada uma destas fases possui propriedades físicas distintas (LEO, 2007).

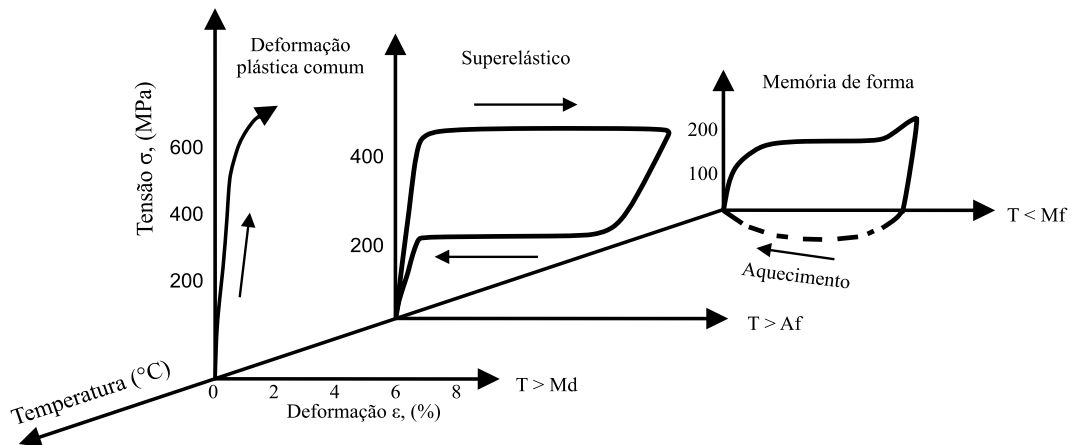
O processo de transformação de fase não ocorre por difusão atômica, mas sim pela deformação da estrutura por cisalhamento. Tal transformação é conhecida como martensítica. Caso o material se encontre em uma temperatura acima da austenita final, em um estado livre de tensões, ao resfriá-lo até a uma temperatura abaixo da martensita final, ocorrerá uma transformação de fase completa e o material estará composto totalmente por fase martensita.

De modo que, ao aquecê-lo novamente até uma temperatura acima da austenita final, ocorrerá uma transformação de fase no sentido inverso. Esse tipo de comportamento é definido como EMF, neste estado o material ao ser deformado até certo ponto, ele mantém uma deformação residual até que uma aplicação de calor o faça retornar para fase austenita e seu formato previamente definido seja recuperado. Uma mudança de forma macroscópica é observável durante o processo de transformação (LAGOUDAS, 2008).

Por outro lado, quando o material se encontra em uma temperatura acima da austenita final (A_f), ele poderá induzir a fase martensita através de carregamento mecânico. Sob estas condições, toda deformação pode ser recuperada quando ocorre o descarregamento. Isto ocorre porque a instabilidade das variantes de martensita em altas temperatura faz com que a liga retorne para a fase austenita. Este efeito é denominado de pseudoelasticidade (LAGOUDAS, 2008).

Além dos dois efeitos apresentados, as LMF podem se comportar como um material comum se submetidas a temperaturas acima da austenita final, conhecida como M_d . Esses três efeitos podem ser entendidos a partir da análise das curvas de tensão/deformação em regiões térmicas distintas, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento de tensão versus deformação em diferentes condições térmicas

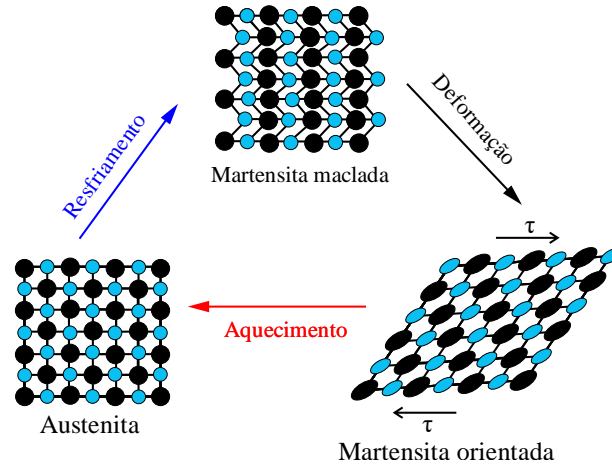


Fonte: Adaptado de (ZANABONI, 2008)

Em LMF o mecanismo de cisalhamento mais comum é a maclagem. Assim, quando o material se encontra na fase martensita e é deformado, os planos de maclas são deslocados provocando um movimento relativo entre os átomos, porém, as ligações atômicas são mantidas. Este processo permite a reversibilidade da estrutura cristalográfica quando aquecido para a fase austenita. Geralmente essa fase tem estrutura cristalina cúbica (B_2), já a estrutura da martensita é muito dependente da composição. Para uma liga equiatômica de NiTi a mais comum é a monoclinica (B_{19}') (LAGOUDAS, 2008). É ilustrado na Figura 2 como essas

estruturas cristalinas se comportam quando há mudança de temperatura e carregamentos mecânicos.

Figura 2 – Comportamento da estrutura cristalina na transformação e deformação



Fonte: Adaptado de (ZANABONI, 2008)

Essas ligas constituem uma classe específica de materiais com duas fases sólidas bem definidas. Dentre as propriedades mais importantes das LMF, as temperaturas críticas onde ocorre a transformação de fase são umas das mais importantes, em um estado de tensão nulo. Em muitas aplicações é necessário conhecer esses quatro valores (A_s , A_f , M_s e M_f) para fazer o uso adequado do material e conseguir aplicá-lo para alcançar resultados satisfatórios.

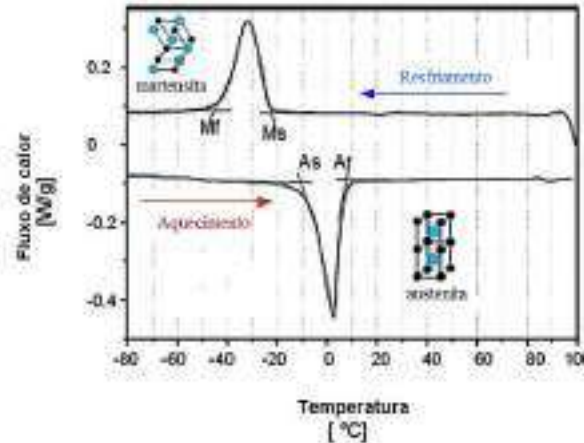
No processo de transformação de fase o material libera e absorve calor latente. Diante desse fato é que se fundamenta um dos métodos mais populares para determinação das temperaturas de transformação de fase em ligas com memória de forma, a calorimetria de varredura diferencial (*Differential Scanning Calorimetry* – DSC). Com este método a taxa de calor fornecida a uma amostra é medida, e a taxa de aquecimento ou resfriamento é mantida constante. O dispositivo é chamado de diferencial porquê ele tem a habilidade de monitorar a resposta de duas amostras e subtrair os resultados (LAGOUDAS, 2008).

A transformação martensítica em ligas de Nitinol é uma transição sólido-sólido de primeira ordem, onde não há dependência da taxa de aquecimento. Porém, a norma F2004 estabelece o valor padrão de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para ensaios de DSC com esse tipo de material. Outros parâmetros da liga podem ser examinados com esse método como: efeito de ciclagem térmica, envelhecimento da liga e a variação dos elementos da liga (INTERNATIONAL, 2005; SLOUGH, 2007).

Uma curva típica obtida de um ensaio de DSC é apresentada na Figura 3. A reação endotérmica durante o resfriamento é decorrência da transição de austenita para martensita, e a exotérmica ocorre no aquecimento, onde há transformação da fase martensita para austenita.

Para determinar os valores das quatro temperaturas envolvidas é comum utilizar o método das retas tangentes, as interseções das retas nos picos de reação fornecem os valores aproximados (ZANABONI, 2008). Uma desvantagem desta técnica é o fornecimento de resultados inconclusivos em materiais parcialmente trabalhados a frio.

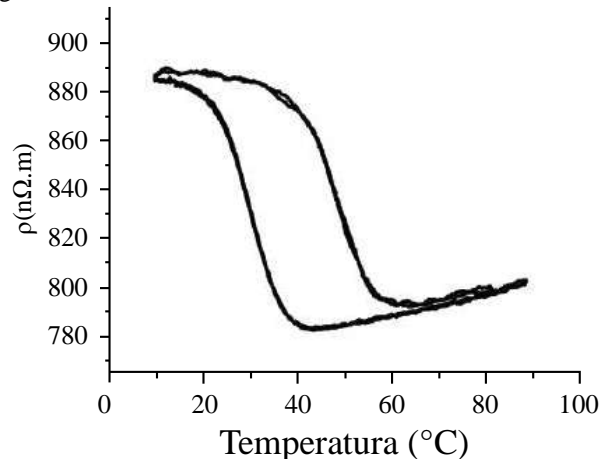
Figura 3 – Curva típica de um ensaio de DSC para uma amostra de NiTi



Fonte: Adaptado de (ZANABONI, 2008)

Outro método bastante utilizado para determinar as temperaturas de transformação é com base no princípio da medição da resistividade elétrica (RET). Este método é mais sensível que o DSC, com capacidade de detectar mudanças microestruturais na rede cristalina, rearranjo de defeitos, tensões e deformações residuais (LIU et al., 1997). É apresentado na Figura 4 uma curva clássica de um ensaio RET para uma amostra de Ti-45Ni-5Cu.

Figura 4 – Ensaio de resistividade de uma amostra de NiTiCu

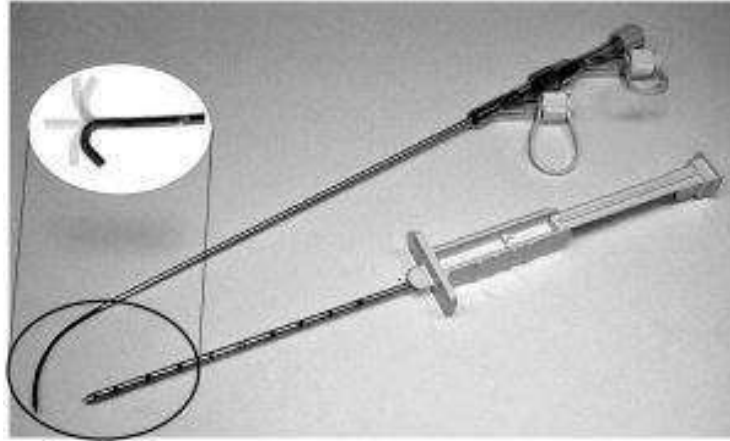


Fonte: Adaptado de (SOTO-PARRA et al., 2014)

Uma das principais aplicações das ligas com memória de forma é no campo da biomédica devido a biocompatibilidade desses materiais. Essas ligas conseguem se manter inócuas durante seu período funcional em um corpo vivo. As potenciais áreas são: odontologia e cardiovascular. O destaque recentemente é dado por *stents*, os quais têm a

função de manter o diâmetro do vaso sanguíneo sem alterações. Além disso, equipamentos e ferramentas para cirurgias também têm-se utilizado, como aparelhos para endoscopia. No trabalho de Zanaboni (2008) foi realizado um estudo de caracterização de ligas de NiTi para aplicação em uma ferramenta cirúrgica, a qual está apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Ferramenta cirúrgica com LMF



Fonte: (ZANABONI, 2008)

Na área da reabilitação humana esses materiais também vêm sendo alvo de estudos, como o protótipo apresentado Figura 6. No trabalho desenvolvido por Basílio Sobrinho et al. (2016), atuadores de LMF foram utilizados para acionar uma mão robótica com deslocamentos angulares de até 80°.

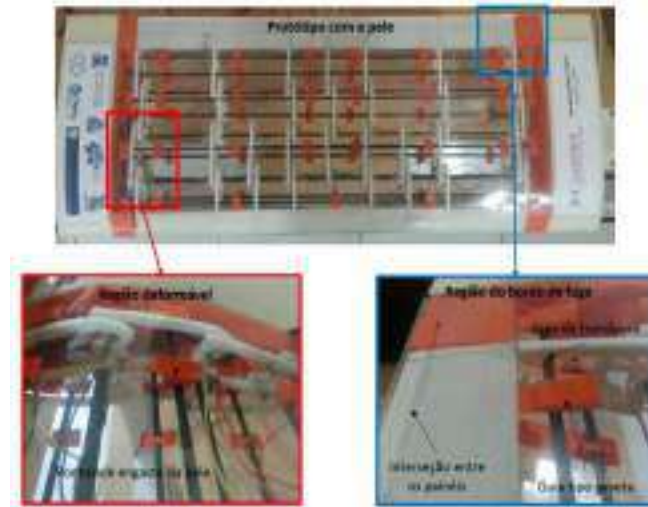
Figura 6 – Mão robótica acionada por LMF



Fonte: (BASÍLIO SOBRINHO et al., 2016)

Na indústria aeroespacial há também uma grande procura por esse tipo de liga. O trabalho de Emiliavaca (2016) apresenta o desenvolvimento e caracterização de um protótipo de asa adaptativa ativada por micro molas de LMF.

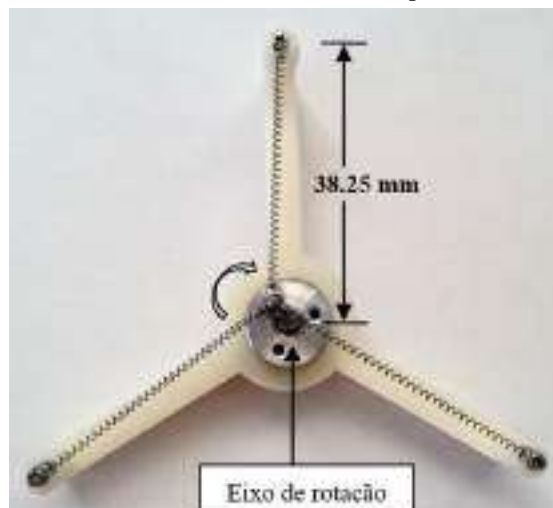
Figura 7 – Protótipo de asa adaptativa acionado por LMF



Fonte: (EMILIAVACA, 2016)

Outras alternativas com o objetivo de substituir motor elétricos também são fontes de pesquisas. Na pesquisa de Basílio Sobrinho et al. (2017) foi desenvolvido um motor termoelétrico utilizando molas ortodônticas de LMF, o protótipo está apresentado na Figura 8. Esse dispositivo tem a capacidade de executar rotação contínua em ambos os sentidos. Apesar de suas limitações, esse motor tem uma densidade de energia relativamente elevada se comparado com os convencionais, mostrando-se bastante promissor para algumas aplicações.

Figura 8 – Motor termoelétrico acionado por molas de LMF



Fonte: (BASÍLIO SOBRINHO et al., 2017)

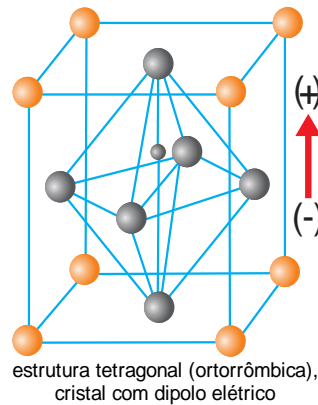
1.2. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Por volta de 1880, os irmãos Curie observaram que alguns cristais naturais apresentavam polarização elétrica quando submetidos a uma tensão mecânica. Esse efeito é denominado de piezoelectricidade (que significa eletricidade por pressão), onde o efeito direto é caracterizado pela obtenção de uma diferença de potencial entre as faces do material através de uma entrada em forma de deformação mecânica. Alguns anos depois o efeito inverso foi comprovado, a aplicação de campo elétrico provoca uma deformação no cristal. Como os dois efeitos estão presentes no elemento piezoeletrico, o fato de ignorar o efeito inverso ao utilizá-lo como gerador, a aplicação torna-se termodinamicamente inconsistente (ERTURK e INMAN, 2011).

Para aplicações em engenharia os materiais devem possuir elevado acoplamento mecânico, o que se observa nas piezocerâmicas de Zirconato Titanato de Chumbo (*Lead Zirconate Titanate* - PZT), desenvolvidas pelo Instituto de Tecnologia de Tokyo nos anos 1950, tornando-as bastante utilizadas atualmente (ERTURK e INMAN, 2011). Esse tipo de cerâmica viabilizou o uso desse mecanismo em sistemas de geração de energia elétrica, controle de vibração e até mesmo monitoramento estrutural (PATEL, 2011).

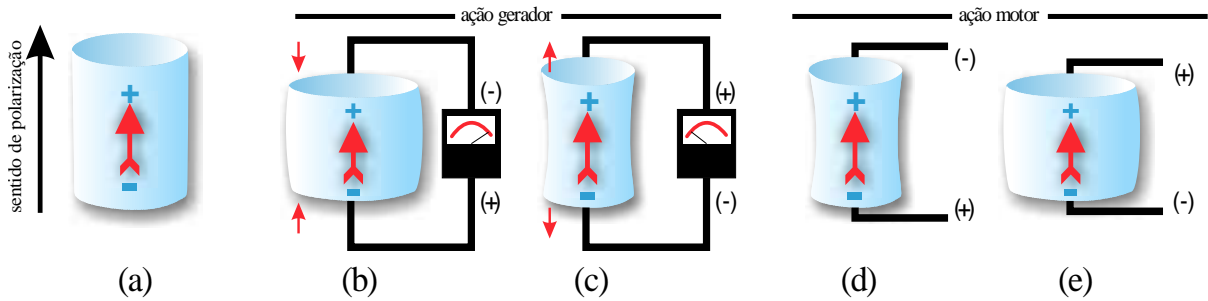
Do ponto de vista microscópico o efeito piezoeletrico é caracterizado pelo deslocamento de cargas iônicas na estrutura do cristal. As células unitárias nas cerâmicas de PZT em temperaturas abaixo de Curie exibem polarização espontânea devido a assimetria da estrutura cristalina, onde cada cristal possui momento de dipolo, como é observado na Figura 9. Dipolos vizinhos formam regiões de alinhamento local chamadas de domínios. O alinhamento desses domínios dá origem a uma rede de momentos de dipolo, e assim uma polarização da rede. O sentido do momento do dipolo na rede depende da polarização no processo de fabricação do material, definindo por consequência o sentido da deformação para uma dada tensão elétrica aplicada e vice-versa. A Figura 10 apresenta essa relação com as indicações no voltímetro e por vetores indicando a direção e o sentido da deformação, dado ao sentido do momento de dipolo definido pela polarização remanescente no processo de polarização (*poling*) como mostrado na Figura 10(a). Quando o material é comprimido, uma tensão elétrica de mesma polaridade é gerada nos terminais do disco (Figura 10(b)), enquanto que no movimento de tração a polaridade da tensão é invertida (Figura 10(c)). Na ação como atuador uma diferença de potencial com mesmo sentido produz um movimento de tração (Figura 10(d)) e de compressão no disco quando a polaridade é oposta (Figura 10(e)) (PATEL, 2011).

Figura 9 – Estrutura cristalina de uma cerâmica piezoelétrica tradicional abaixo da temperatura de Curie



Fonte: Adaptado de (PATEL, 2011)

Figura 10 – Relação entre deformação e tensão elétrica de acordo com a polarização do material



Fonte: Adaptado de (PATEL, 2011)

O comportamento dos materiais piezoelétricos pode ser descrito matematicamente pela primeira lei da termodinâmica (princípio da conservação de energia), considerando-o como um elemento linear, a Equação (1) descreve essa relação (ERTURK e INMAN, 2011).

$$\dot{U} = -\dot{y}_{ij} T_{ij} - \dot{v}_i E_i \tag{1}$$

onde U é a densidade de energia armazenada no piezoelétrico, T_{ij} é o tensor de tensão mecânica, S_{ij} é o tensor de deformação, E_i é o tensor de campo elétrico, D_i é o tensor de deslocamento elétrico, e o ponto acima das variáveis indica a diferenciação em relação ao tempo.

Uma forma alternativa de representar as equações constitutivas, e que é usualmente utilizada para aproximações sob certas circunstâncias limitadas, é apresentada nas Equações (2) e (3) (ERTURK e INMAN, 2011).

$$S_{ij} = s_{ij}^E T_{kl} + d_{kj} E_k \tag{2}$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \epsilon_{ik}^T E_k \tag{3}$$

onde d_{ikl} é a constante do piezoelétrico de acoplamento eletromecânico, s_{ij}^E é a constante de compliança elástica, e ε é a constante de permissividade do material. Os subscritos E e T representam os valores das constantes em condições de campo elétrico constante e tensão mecânica constante, respectivamente.

Diante disto, quando utilizados como geradores piezoelétricos ou como sensores para monitoramento estrutural, eles são usualmente modelados por um circuito equivalente de Thevénin, com uma fonte de tensão em série com uma capacitância, utilizando o modelo com parâmetros concentrados, o que é aceitável para o primeiro modo de vibração e operando na região linear. Por conta dessa característica capacitiva material piezoelétrico, a impedância série é relativamente elevada em baixas frequências, onde valores mais elevados de frequência são geralmente mais adequados para o uso como sensor (KEAWBOONCHUAY e ENGEL, 2003).

1.3. ACOPLAMENTO ESTRUTURAL

Pelo fato do material piezoelétrico, quando deformado, produzir um nível de tensão elétrica proporcional a sua deformação e quando aplicado um campo elétrico produzir uma deformação mecânica, faz dele um elemento eletromecânico. Isso comprova o acoplamento mecânico e elétrico que esse material possui. Com a caracterização apresentada neste trabalho é possível obter os dados de temperatura de transformação de fase pelo método EMI, pois o transdutor ao ser acoplado a estrutura adquire propriedades mecânicas pelo efeito piezoelétrico, e ao ocorrer uma mudança de fase das LMF há uma modificação na rigidez mecânica da estrutura, com um valor mais alto para austenita (fase “dura” do material) e um valor mais baixo para martensita (fase “mole” do material) fazendo com que o piezoelétrico responda em sua impedância elétrica (SOUTO et al., 2014).

Esse acoplamento eletromecânico pode ser observado através da medição da impedância elétrica. A técnica de medição de impedância eletromecânica já é bastante utilizada em análises de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM) para aplicações em pontes e aeronaves, de modo a aumentar a segurança e reduzir custos de manutenção da estrutura (OSTACHOWICZ e GÜEMES, 2013). A técnica de impedância eletromecânica (EMI) é considerada uma das mais promissoras existentes para SHM, porque é muito simples de implementar e usa sensores piezoelétricos pequenos e de baixo volume. Estes sensores consistem de fitas adesivas coladas a estrutura hospedeira. A vantagem desta técnica é que a análise da impedância mecânica é monitorada através da medição da impedância elétrica do sensor piezoelétrico (BAPTISTA, 2014).

Em referência a Figura 11, com o transdutor e a estrutura indicados, os eixos x , y e z , são indicados pelos subscritos 1, 2 e 3, respectivamente. Para um transdutor de espessura muito pequena, comparado as demais dimensões $T_3=0$ (pode ser desprezada). Considerando a propagação de onda apenas na direção x ($T_2=S_2=0$) as equações básicas (BAPTISTA e VIEIRA FILHO, 2010) do piezoelétrico para este caso podem ser escritas como (Equações (4) e (5)):

$$D_3 = d_{31} \cdot T_1 + \epsilon_{33} \cdot E_3 \quad (4)$$

$$S_1 = s_{11} \cdot T_1 + d_{31} \cdot E_3 \quad (5)$$

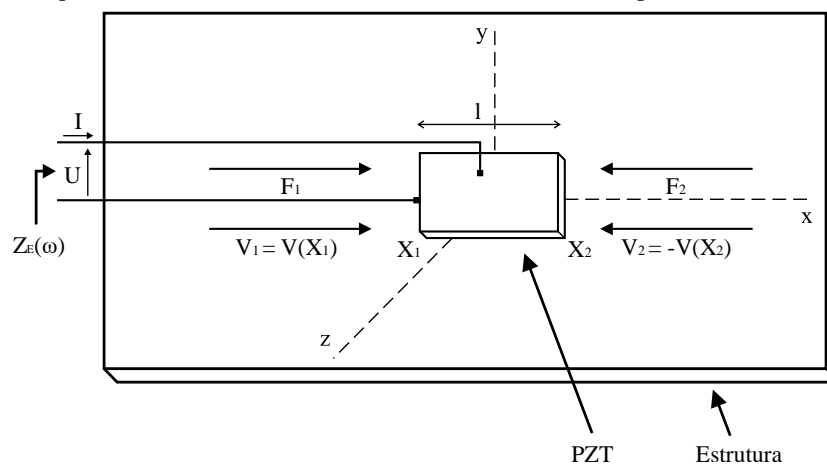
onde D_3 é a componente deslocamento elétrico, d_{31} é a constante piezoelétrica, T_1 é a componente de tensão mecânica, ϵ_{33} é a permissividade em tensão constante, E_3 é a componente de campo elétrico e s_{11} é a componente de compliança de campo elétrico constante. Estas expressões relacionam as variáveis mecânicas (F_1 , F_2 , V_1 , V_2) com as elétricas (U , I) (BAPTISTA e VIEIRA FILHO, 2010).

A impedância medida para uma estrutura como a representada pela Figura 11 e os as considerações feitas acima é dada pela Equação (6).

$$Z_E(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \parallel jZ_T \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \tan\left(\frac{k \cdot l}{2}\right) - \frac{1}{\sin(k \cdot l)} + \frac{Z_S}{j2 \cdot Z_T} \right] \quad (6)$$

onde C_0 capacitância estática do transdutor, ω é a frequência angular, Z_T a impedância mecânica do transdutor, Z_S é a impedância mecânica da estrutura hospedeira (é o efeito do meio de propagação), k é o número de onda e l a largura do transdutor.

Figura 11 – Esquemático de um sensor (PZT) colado a uma estrutura para monitoramento estrutural



Fonte: Adaptado de (BAPTISTA e VIEIRA FILHO, 2010)

Da Equação (6) tem-se que a impedância elétrica lida do conjunto sensor/estrutura depende diretamente da estrutura na qual o sensor está acoplado. Esse tipo de interface apresentada na estrutura da Figura 11, é referente ao método convencional de instalação de sensores, o qual apresenta sensibilidade mais alta em frequências mais baixas (DA SILVEIRA et al., 2016).

Diante desse contexto, a proposta do presente trabalho é avaliar a modificação da rigidez da LMF durante as transformações de fase através do método EMI, sendo monitorada pela impedância elétrica.

A ciclagem térmica de uma heteroestrutura PZT/NiTi foi investigada no trabalho de Souto et al. (2014), onde uma caracterização mostrou a possibilidade obter os dados de temperatura de transformação de fase. Nesta pesquisa foi utilizado um divisor resistivo para medir a variação da tensão no sensor piezoelétrico. Esta mudança de tensão com a temperatura foi causada pelo acoplamento eletromecânico, com a mudança da rigidez na transformação de fase.

A técnica EMI é utilizada principalmente no campo da engenharia civil como apresenta LIANG et al. (2016) na detecção de falhas causadas por escorregamentos devido a colagem em uma estrutura de concreto revestido. Os testes foram conduzidos experimentalmente e em seguida comparados com análises por elementos finitos. Outro trabalho também mostra o uso de EMI em concreto, mas com o objetivo de realizar o monitoramento online da estrutura hospedeira (SHIN e OH, 2009). Boukabache et al. (2012) desenvolveram um sistema embarcado para monitoramento de falhas utilizando EMI em partes de aeronaves de fibra de carbono, e toda eletrônica foi integrada em um SoC (*System on Chip*). Ambos os trabalhos verificam a mudança da rigidez da estrutura para detectar falhas.

Heteroestruturas de PZT/LMF têm sido pesquisadas para aumentar a quantidade de energia que pode ser absorvida de um ambiente vibratório, com aplicações no controle de vibração, como em dispositivos MEMS. Esse tipo de aplicação é bastante ampla desde micro bombas a micro grampeadores para o uso em bombeamento em microescalas, ou também em cirurgias minimamente invasivas para remoção de tumores (CHOUDHARY e KAUR, 2016). No trabalho de Choudhary e Kaur (2010) foi realizado uma caracterização para desenvolvimento desses materiais utilizando substrato de silício (Si). Para essa heteroestrutura a curva de resistência elétrica em função da temperatura apresentou uma dependência da memória de forma com a espessura de NiTi, sendo o valor mínimo de 1,2 μm para a estrutura apresentar transformações de fase.

1.4. OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo caracterizar uma heteroestrutura formada por material piezoelétrico e material de liga com memória de forma.

1.4.1 Objetivos específicos

- Construir uma máquina térmica para produzir calor para heteroestruturas;
- Aplicar um sistema de controle de temperatura na máquina térmica;
- Caracterizar outros materiais para comparação com a heteroestruturas;
- Determinar as temperaturas de transformação de fases pelo DSC e comparar com o método proposto;
- Implementar uma interface em ambiente LabVIEW™ para automatizar e facilitar o manuseio dos experimentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

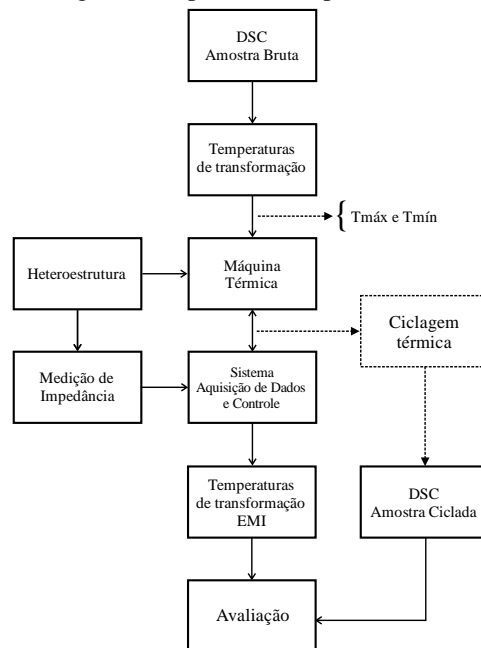
O método para determinar as temperaturas de transformação de fases em materiais de LMF proposto neste trabalho foi dado pela técnica de impedância eletromecânica. Assim, a detecção desse fenômeno foi realizada por um material piezoelétrico funcionando como sensor acoplado a uma amostra de LMF. A impedância elétrica desse sensor foi o parâmetro medido para verificar o comportamento em função da variação da temperatura da heteroestrutura (LMF acoplado ao PZT), e conseqüentemente extrair informações de temperaturas de transformação de fase da LMF. Os dois materiais foram conectados utilizando um adesivo apropriado.

Existem vários métodos para medição de impedância elétrica, porém este trabalho fez o uso de um analisador de impedância comercial de alta precisão. Essa escolha foi motivada por esse tipo de equipamento fornecer níveis adequados de oscilação e frequência, além de sua elevada confiabilidade.

Uma máquina térmica utilizando pastilhas termoelétricas foi utilizada para fornecer calor a heteroestrutura. Esse dispositivo foi especificado para operar dentro da faixa de temperatura de transformação de fases da LMF. Desta forma fez-se necessário determinar tais valores de temperatura com o método convencional (DSC), e então projetar a máquina para operar nesta região de interesse.

É mostrado na Figura 12 a metodologia para condução dos ensaios experimentais em forma de fluxograma. Inicialmente um teste de DSC é realizado para conhecer os valores das temperaturas de transformação e conseqüentemente a faixa de operação da máquina térmica (temperaturas máxima e mínima). Em seguida as heteroestruturas são preparadas para serem submetidas a ciclagens térmicas, com a temperatura e impedância sendo monitoradas. Por fim, o método é avaliado a partir dos valores de temperatura de transformação obtidos e comparados com o ensaio de DSC. Vale ressaltar que o material utilizado para este DSC é submetido às mesmas condições de carregamentos térmicos que a heteroestruturas, neste caso uma amostra de LMF de tamanho menor é colocada ao lado da amostra de PZT/LMF. Desse modo, erros causados pelo aumento das temperaturas devido a ciclagem são minimizados nesta etapa de avaliação.

Figura 12 – Fluxograma simplificado do procedimento experimental



Fonte: Autoria própria

2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para realização dos ensaios de impedância elétrica em função da temperatura foi necessário desenvolver a heteroestrutura (corpo de prova). A LMF utilizada foi de NiTi com 55 % de Ni, e com a geometria em formato de disco com 12,8 mm de diâmetro e 3,0 mm de espessura de 3,0 mm. A cerâmica piezoelétrica foi do tipo PZT C-64, e possui o mesmo formato com 10,0 mm de diâmetro e 0,22 mm de espessura.

O critério para escolha das dimensões físicas dos corpos de prova foi dado primeiramente na impossibilidade de fabricação do corpo de prova, e também na compatibilidade das dimensões da máquina térmica, além de facilitar o manuseio dos sensores de temperatura e o acoplamento dos materiais. Corpos de prova de NiTi com dimensões menores foram fabricados para poder realizar ensaios de DSC.

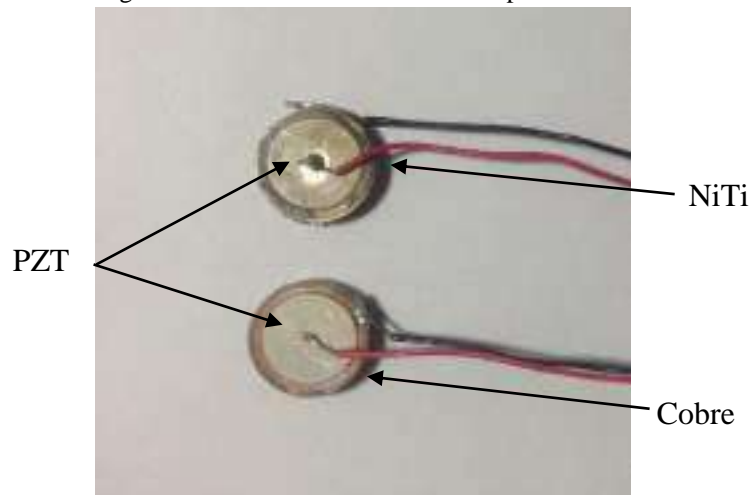
Para a conexão entre o disco de LMF e o material piezoelétrico foi empregado o adesivo *epoxy*, KBR-610. Este tipo de produto é indicado para aplicação em extensômetros, o que o torna também adequado para esta aplicação (SENSORES, 2017). Esse tipo de adesivo necessita que os dois componentes sejam misturados e mantidos por um período de uma hora para que ocorra a completa reação. Seguindo as recomendações do fabricante, o material foi submetido a um forno de tratamento térmico para o processo de cura por 4 horas à 100 °C, sob pressão. Após este procedimento o adesivo resiste a temperaturas entre -200 °C e +300 °C. Levou-se em consideração também que esta temperatura utilizada no processo de cura não

comprometeria as propriedades do piezoelétrico e da LMF, pois o PZT possui uma temperatura de Curie maior que 300 °C e a LMF tem uma A_f em torno de 100 °C.

Além de uma amostra de material com memória de forma, outra amostra com material de cobre comum foi desenvolvida com exatamente as mesmas dimensões e preparada do mesmo modo que a amostra de NiTi, para realização de ensaios e verificação da resposta térmica da impedância elétrica em um material conhecido, mostrando assim que a característica da resposta da impedância do conjunto PZT/NiTi em função da temperatura realmente se deve a liga com memória de forma e não a outros fatores, como o PZT ou a Célula de Peltier.

Outras amostras também foram preparadas com materiais convencionais a fim de comprovar a validade do método. Pois, se o comportamento da impedância em função da temperatura evidenciar a transformação de fases na LMF, isto não deve ser observado em outros materiais, mantendo-se os parâmetros do ensaio sob mesmas condições. Para isso, mais três corpos de prova foram produzidos com as cerâmicas piezoelétricas do mesmo tipo com aço, latão e cobre, todos eles de mesma dimensão que a heteroestrutura PZT/LMF. É mostrado na Figura 13 duas das quatro heteroestruturas produzidas para realização dos ensaios experimentais.

Figura 13 – Amostras confeccionadas para ensaio



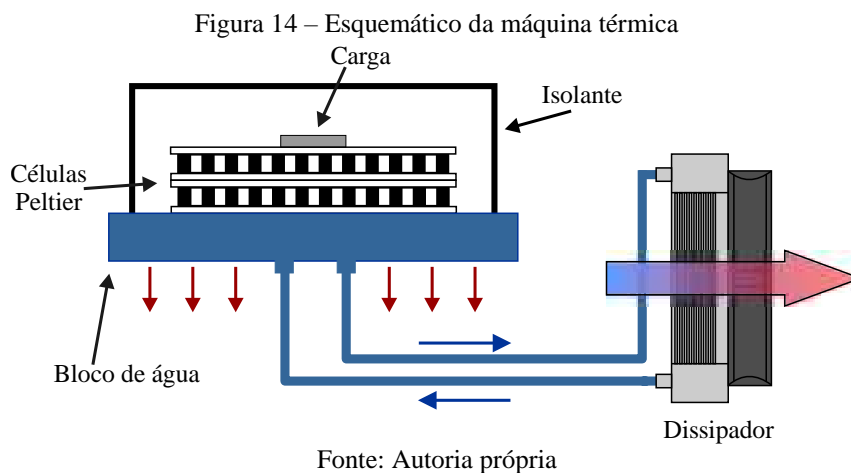
Fonte: Autoria própria

2.2 MÁQUINA TÉRMICA

A máquina térmica é constituída de células Peltier e um sistema para dissipação de calor, formado por um radiador e uma bomba, também denominado como *watercooler*. O objetivo do *watercooler* é manter a temperatura em uma das faces do Peltier aproximadamente constante, proporcionando uma maior facilidade no controle de temperatura da outra face.

Como os volumes das amostras das heteroestruturas são relativamente reduzidos, comparando-as com as células utilizadas, essa estrutura tem a capacidade de fornecer calor para atingir as temperaturas desejadas. Desse modo é possível garantir uma uniformidade na distribuição de temperatura ao longo de toda a amostra, sendo bastante desejável, pois caso contrário a transformação poderia ocorrer em algumas áreas e outras não. A troca de calor entre a carga e a célula termoelétrica ocorre pelo mecanismo de condução, o que ocasiona em um sistema de controle mais simples. Ainda assim, optou-se por utilizar uma associação com duas células Peltier em série (termicamente) para aumentar o gradiente de temperatura. Com esse arranjo é possível alcançar uma diferença de temperatura de mais de 100 °C (LEE, 2010).

O sistema de arrefecimento contém uma bomba para circular o fluido, e assim, facilitar a troca de calor da face quente do Peltier com o ambiente. O fluido de trabalho flui entre um bloco, o qual está em contato com a célula, e um dissipador de calor de baixa resistência térmica. Um isolante é adicionado acima da carga, onde a temperatura é controlada, de modo que seja possível reduzir a influência da troca de calor por convecção. O esquemático da máquina térmica está apresentado na Figura 14, com os componentes destacados.



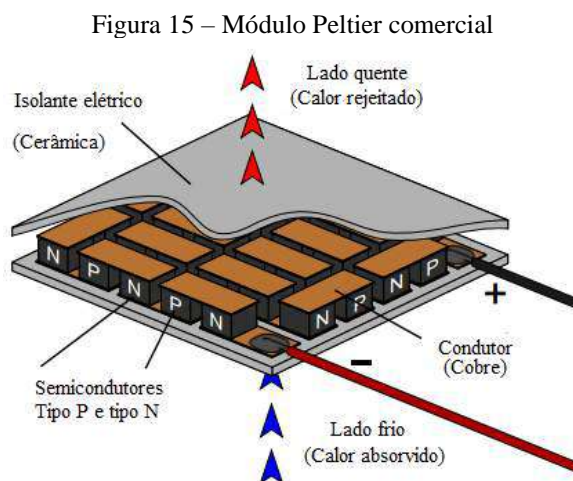
2.2.1 Células de efeito Peltier

As células que utilizam propriedades termoelétricas, ou seja, conversão de energia elétrica em térmica (efeito Peltier) e térmica em elétrica (efeito Seebeck), são atuadores bastante utilizados para fornecimento (ou absorção) de calor a um corpo. Elas são disponibilizadas comercialmente e bastante empregadas nos sistemas de controle de temperatura. Comparando-as com sistemas termomecânicos, há uma série de vantagens, dentre elas podemos destacar: não possui partes móveis, são silenciosas, alta confiabilidade, bastante estáveis e não produzem algum malefício ao meio ambiente.

O efeito Peltier foi descoberto em 1834 por Jean C. A. Peltier, e o princípio de funcionamento é dado pela geração de um gradiente de temperatura quando uma junção de dois materiais distintos é percorrida por uma corrente elétrica. Dentre os materiais utilizados os semicondutores (junções P-N) apresentam uma melhor relação entre condutividade térmica e elétrica, sendo esta uma figura de mérito para a eficiência deste efeito. E este efeito se eleva através de conexões entre várias junções de semicondutores, de forma que estejam dispostas eletricamente em série e termicamente em paralelo, formando os que são conhecidos por módulos Peltier, como apresentado na Figura 15 (NIELSEN, 1960; MAXIMILIAN, 2015).

Em uma face de um módulo Peltier o calor é rejeitado e na outra o calor é absorvido, e este processo é termicamente reversível, isso provém do fato de que quando uma corrente elétrica é percorrida pelo módulo, e atravessa uma junção, há um ganho e perda de energia cinética, onde há uma maior dopagem em uma das faces e menor na outra. Essa taxa de transferência de calor é proporcional a corrente elétrica, e a uma constante que depende do material (MAXIMILIAN, 2015).

Os módulos Peltier utilizados neste trabalho são o TEC1-12706, o qual pode ser encontrado comercialmente. As propriedades deste módulo estão apresentadas na Tabela 1.



Fonte: Adaptado de (MAXIMILIAN, 2015)

Tabela 1 – Especificações do módulo TEC1-12706

Temperatura da face quente - T_H (°C)	25	50
Potência (<i>Watts</i>)	50	57
Delta $T_{MÁX}$ (°C)	66	75
$I_{MÁX}$ (A)	6,4	6,4
$V_{MÁX}$ (V)	14,4	16,4

Fonte: Hebei I.T. (Shanghai) Co

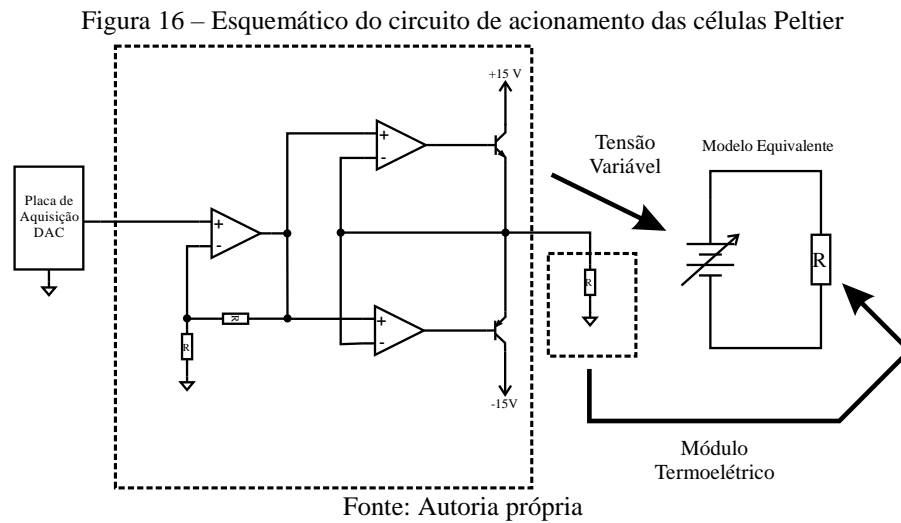
O gradiente que o módulo consegue gerar depende fortemente da temperatura na face quente, desta forma é importante que o sistema de resfriamento consiga manter essa temperatura constante e a face fria seja controlável adequadamente. Caso contrário é necessário um sistema de controle mais sofisticado para prever essa variação (SARMENTO, 2016). Com a estrutura montada foi possível alcançar uma temperatura em uma das faces aproximadamente constante, sendo bastante desejável, pois o projeto do controlador tornou-se mais simplificado.

2.2.2 Circuito para acionamento

Devido ao modelo constitutivo das células termoelétricas é possível obter um gradiente de temperatura tanto pela variação da corrente elétrica quanto pela tensão no módulo (HUANG e DUANG, 2000). Deste modo, para o acionamento das células termoelétricas optou-se por um circuito eletrônico em configuração de tensão contínua variável. A topologia escolhida foi a *push-pull*, a qual fornece uma amplificação de corrente com tensão de saída controlável, em níveis positivos e negativos. Foi adicionado a este circuito, um estágio de ganho de tensão para amplificar o sinal de controle proveniente da placa de aquisição de dados.

Os dois módulos foram conectados em uma associação paralelo com dois circuitos independentes, ou seja, o mesmo sinal de controle enviado às duas células simultaneamente. Com esse conjunto foi possível obter uma variação em torno de -15 e 100 °C para um intervalo de tensão de saída de +2,5 e -2,0 V. Estes valores de tensão correspondem a sinais analógicos fornecidos por uma placa de aquisição com um conversor (*digital-to-analog converter* - DAC) integrado. O esquemático desse circuito de forma simplificada está apresentado na Figura 16. O módulo Peltier é representado como uma resistência elétrica de carga na saída do circuito para facilitar a leitura do diagrama, e o circuito amplificador de

corrente está representado com uma fonte de tensão variável em um modelo equivalente ao lado do esquemático.



2.2.3 Controle de temperatura

As células Peltier e a estrutura montada (dissipador, quantidade de células e etc.) neste trabalho possuíam algumas características que foram levadas em consideração para o projeto do controlador de temperatura. Onde a mais importante delas é o comportamento não linear do transdutor, onde seu modelo dinâmico contém derivadas parciais e parâmetros dependentes da temperatura (HUANG e DUANG, 2000). Outro ponto a ser analisado é o fato de conter duas células associadas em cascata.

Para implementação de um sistema de controle para esta planta seria necessário considerar o acoplamento entre essas células, o que torna os controladores mais sofisticados. Porém, é possível realizar algumas simplificações e utilizar uma aproximação para atender aos requisitos do controle de temperatura necessário para as heteroestruturas. As especificações para essa aplicação são: entrada em rampa com taxa de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e erro em regime permanente nulo. Esse tipo de entrada pode ser descrita por pequenas variações de degraus, principalmente devido a taxa de crescimento quando comparada a constante de tempo do sistema, de modo que a linearidade pode ser considerada.

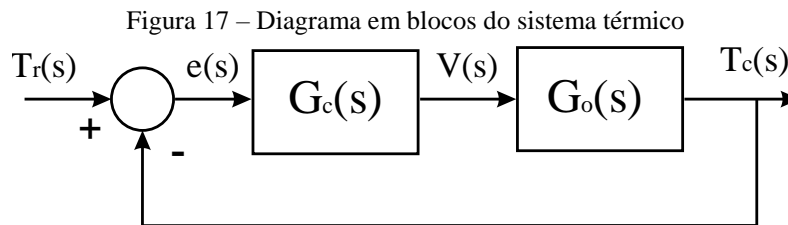
Uma outra simplificação é a consideração do sistema como sendo de única entrada e única saída (*Single-Input-Single-Output - SISO*), ou seja, as células são representadas como um único atuador. Assim, a tensão de saída analógica da placa de aquisição é a variável manipulada (VM), em comum para ambos Peltier, e a temperatura na carga (heteroestruturas) é a variável controlada (VC).

Devido a estas considerações a função de transferência para esse tipo de planta pode ser simplificado como de primeira ordem com um atraso de transporte, assim como descrito na Equação (7).

$$G_o(s) = \frac{K_o e^{-s\tau_o}}{v_o s + 1} \quad (7)$$

onde v_o é o polo, K_o é uma constante e τ_o é o atraso de transporte.

Um controlador que pode ser empregado neste tipo sistema é o clássico PID, devido a sua simplicidade e conseguir alcançar resultados satisfatórios (GOODWIN, GRAEBE e SALGADO, 2001). O diagrama em blocos que descreve o sistema de controle em malha fechada desenvolvido para esta planta está representado na Figura 17.

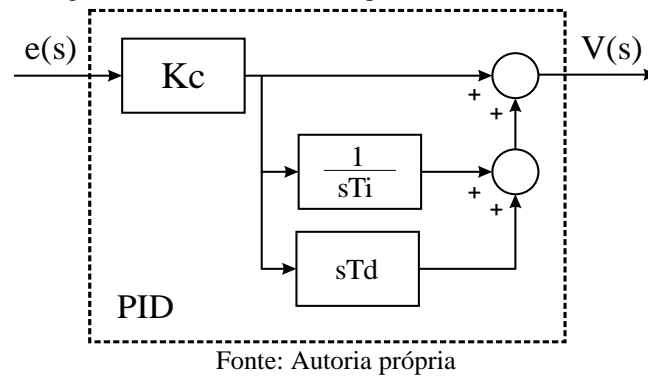


Fonte: Autoria própria

onde $Tr(s)$ é a temperatura de referência e $Tc(s)$ é a temperatura na carga, $V(s)$ é o sinal da variável manipulada, $G_o(s)$ é a função de transferência da planta (módulo Peltier) e $G_c(s)$ é a função de transferência do controlador.

Como em sistemas térmicos convencionais, e neste também, a resposta é relativamente lenta (com constante de tempo da ordem de dezenas de segundos), a implementação do controlador em um sistema digital tornou-se mais simplificada, ou seja, sem a necessidade de frequência de amostragem elevada. No entanto, o PID foi elaborado no ambiente LabVIEW™. Este *software* dispõe de algoritmos já implementados no formato de blocos que realizam a função PID. A forma utilizada é PID *academic*, e o seu diagrama em blocos está representado na Figura 18.

Figura 18 – Diagrama em blocos do PID implementado no ambiente LabVIEW™



onde T_d é o tempo da ação derivativa, T_i é o da ação integral, ambos expressos em minuto, e K_c o ganho proporcional. Como este controlador é implementado discretamente, para isto é utilizado a aproximação bilinear, e ainda é adicionado um termo para controlar o nível de ruído provocado pela ação derivativa.

A complexidade para a obtenção dos parâmetros desse sistema nos motivou a calcular os parâmetros do controlador utilizando a técnica de sintonia Ziegler-Nichols, principalmente pela mudança das constantes da planta em função do ponto de operação. O método utilizado foi o da curva de reação. Neste método aplica-se um degrau na entrada e a partir da resposta em malha aberta é possível obter os valores dos ganhos. Este método é bastante utilizado em modelos como o apresentado na Equação (7) (GOODWIN, GRAEBE e SALGADO, 2001). É apresentado na Tabela 2 os valores dos parâmetros em função dos dados obtidos na curva de resposta.

Tabela 2 – Cálculo dos parâmetros do controlador pelo método de sintonia Ziegler-Nichols

K_c	$1,2/RL$
T_i	$2L$
T_d	$0,5L$

Fonte: Adaptado de (GOODWIN, GRAEBE e SALGADO, 2001)

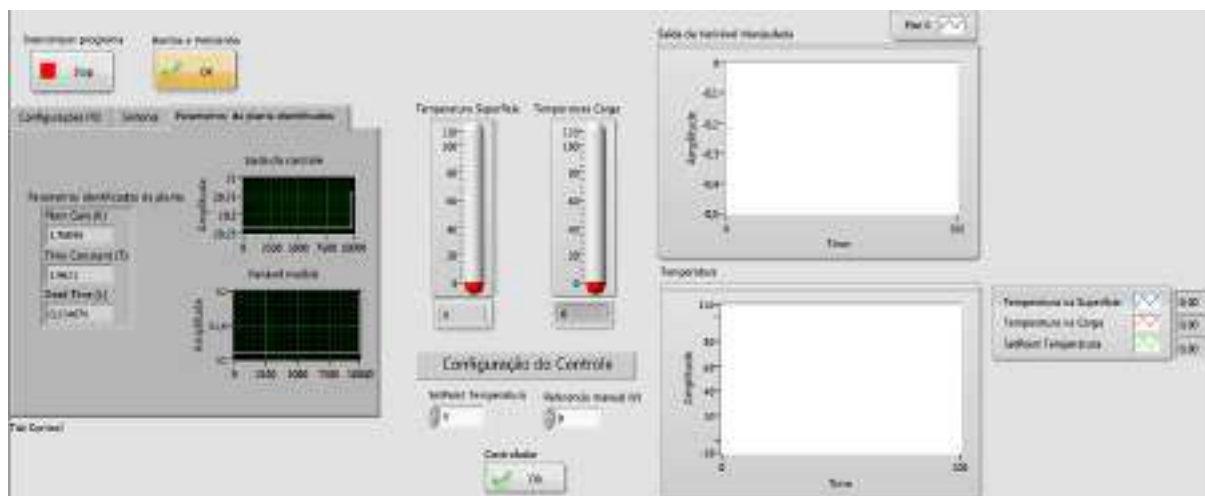
onde $R=A/\tau$ indica a taxa de reação, ou seja, a variação da saída sobre a variação da entrada, sobre a constante de tempo e L é o atraso de transporte.

Como este método é empírico, na maioria das vezes os valores encontrados são apenas um ponto pé inicial, de modo que ajustes são realizados para alcançar o desempenho desejado. Testes foram realizados com os diferentes materiais para verificar como o ganho poderia variar em função da carga sem alterar as especificações do sistema de controle.

Um recurso interessante no ambiente LabVIEW™ é um algoritmo que executa o método de sintonia descrito acima iterativamente. Uma rotina foi utilizada neste trabalho, o

que facilitou bastante na extração das constantes para os quatro materiais. A partir do momento em que os valores são obtidos, eles já são avaliados e as modificações para alcançar os requisitos de desempenho são realizadas em seguida. A interface para manipulação da sintonia está apresentada na Figura 19. O diagrama de blocos com a rotina está apresentado no apêndice.

Figura 19 – Interface gráfica no LabVIEW™ para aplicação do método de sintonia



Fonte: Autoria própria

2.3 ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA

A análise da impedância elétrica empregada nesta pesquisa foi realizada por um analisador de impedância comercial de alta precisão, modelo Agilent 4294A. Este equipamento possibilita ajustar o nível de tensão de oscilação, 5 mV a 1 Vrms ou 200 μ A a 20 mArms, e a frequência de trabalho desejada, de 40 Hz até 110 MHz. Ele utiliza a técnica de ponte auto balanceada para medição de impedância elétrica, além de fornecer diversos modelos de circuito de acordo com a aplicação. A precisão deste analisador chega até 0,08 % (TECHNOLOGIES, 2017).

Análises de varreduras de frequência e de *bias* (nível DC) podem ser realizadas no limite permitido da ponta de prova. O nível de *bias* é ajustável até 40 V ou 100 mA. Para realização de experimentos é necessário calibrar a ponta de prova antes de usar para evitar erros de medição, e assim aumentar a qualidade da medição (TECHNOLOGIES, 2017). A foto do equipamento com vista frontal é apresentada na Figura 20.

A varredura utilizada foi por *bias* sem variação (0 a 0 V) e frequência central fixa, pois os testes precisavam de frequência constante. A quantidade de pontos para média foi de 50 com nível de oscilação de 500 mV de amplitude para evitar deslocamento mecânico na estrutura.

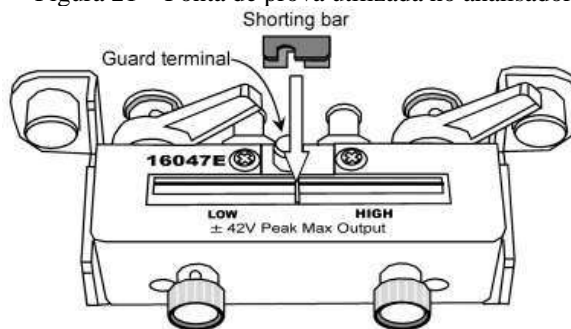
Figura 20 – Visão frontal do analisador de impedância Agilent 4294A



Fonte: (TECHNOLOGIES, 2017)

Pela simplicidade e evitar erros devido ao modelo do circuito escolhido, foi utilizado o modelo de impedância série, ou seja, $Z = R + jX$ (resistência e reatância) para as medições. E pelos valores de impedância das heteroestruturas utilizadas serem de valor médio (algumas dezenas de kOhm) e os contatos por meio de fios, a ponta de prova 16047E foi adequada para essa aplicação. Antes dos ensaios foram realizadas calibrações para eliminar a impedância residual dos contatos, esta ponteira é apresentada na Figura 21. A faixa de frequência que pode ser utilizada é de 0 a 110 MHz, porém, devido a limitação do equipamento apenas testes acima de 40 Hz foram efetuados.

Figura 21 – Ponta de prova utilizada no analisador



Fonte: (TECHNOLOGIES, 2003)

Para aquisição de dados do analisador fez-se uso da interface serial GPIB (*General Purpose Interface Bus*). Esse tipo de interface está em conformidade com as normas IEEE 488.1, IEC-625, IEEE 488.2 e JIS-C1901, e é amplamente empregada para comunicação entre computadores e equipamentos de laboratório. Desta forma é possível enviar comandos e instruções do computador para o 4294A e receber dados. O controlador do sistema GPIB neste caso é o próprio computador (TECHNOLOGIES, 2012).

A sintaxe da mensagem é definida pela norma IEEE 488.2 e pelo próprio equipamento, que fornece funções específicas de medição, e pode ser encontrado em

(TECHNOLOGIES, 2012). O endereço do equipamento pode escolhido de forma arbitrária, mas, nesse caso, foi escolhido o padrão, 17. Nas funções utilizadas estão o algoritmo para comunicação que foi implementado no ambiente LabVIEW™. Um exemplo de um comando enviado é a configuração da frequência central, que deve ser da forma “CWFREQ1000”, neste caso o valor escolhido é de 1 kHz. Já a medição dos dados mostrados na tela do equipamento, neste caso é a impedância na forma série, pode ser obtida pelo comando “OUTPDATA?”.

Na rotina implementada a configuração do equipamento foi definida com os valores dos parâmetros da análise e a aquisição ficou dentro de um bloco iterativa para armazenamento dos dados de impedância. Os parâmetros configurados estão apresentados na Tabela 3. O diagrama de blocos da rotina encontra-se no apêndice.

Tabela 3 – Comandos utilizados para configuração dos parâmetros do analisador 4294A

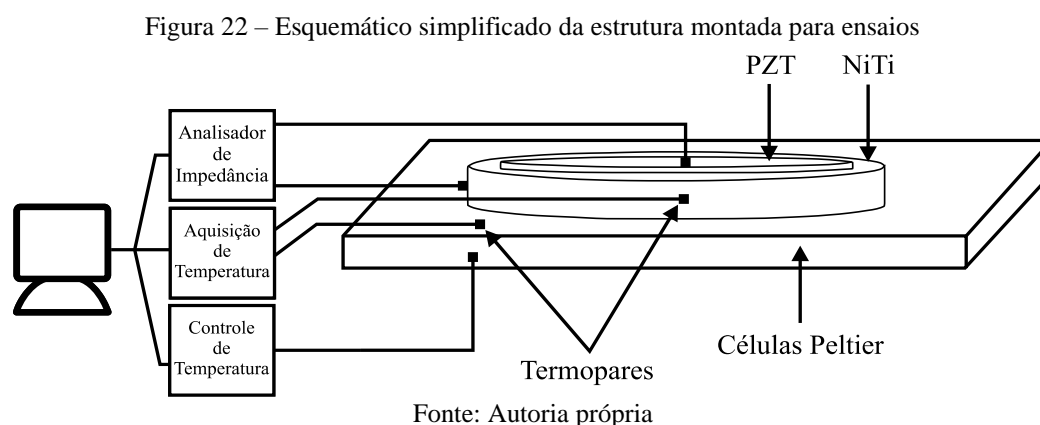
Parâmetro	Valor	Comando
Endereço	17	
Frequência central (Hz)	1000	CWFREQ
Parâmetro de varredura (Frequência/ <i>bias</i>)	DCB	SWPP
Modo <i>bias</i> (tensão/corrente)	VOLT	DCMOD
Número de pontos (até 201)	50	POIN
Modo de oscilação (tensão/corrente)	VOLT	POWMOD
Nível de oscilação	0,5	POWE
Valor de início	0	START
Valor de parada	0	STOP
Medição (Magnitude/fase)	IMPH	MEAS
Traço ativo (A/B)	A	TRAC
Dados do traço ativo		OUTDATA

Fonte: Autoria própria

2.4 INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

As faixas de temperatura utilizadas nos experimentos de análise de impedância foram escolhidas a partir das temperaturas de transformação obtidas pelo ensaio de DSC da amostra após o processo de cura. Ensaios com diferentes frequências foram realizados para verificar se o comportamento da curva, e por consequência a detecção da transformação de fase poderia ser afetada por esse parâmetro.

Na Figura 22 está apresentado o esquemático de todos os componentes do sistema de aquisição de dados. Um sensor de temperatura foi inserido no centro do disco da amostra sob teste através de um furo, garantindo que a temperatura lida está internamente ao material. Outro sensor foi colocado na superfície da célula Peltier para comparar se o valor lido está próximo do valor na carga. Esse sensor foi utilizado para monitorar possíveis falhas do sistema de controle, e assim o algoritmo pudesse tomar alguma decisão.



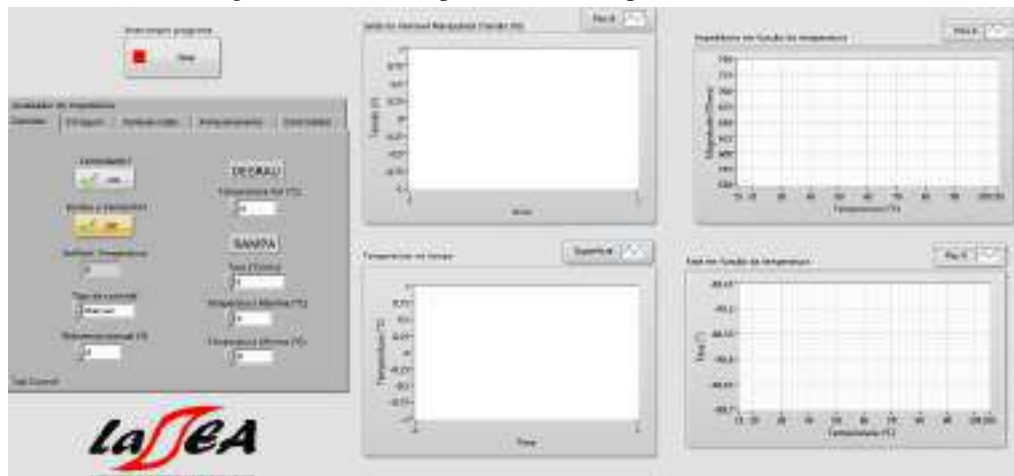
Para medição de temperatura foram utilizados dois termopares do tipo K. Esse tipo de sensor tem a vantagem de ser fabricado em volumes reduzidos e operar em uma ampla faixa de temperatura. Essa característica é interessante para o sistema de controle, pois nenhuma dinâmica é inserida na planta devido à baixa inércia térmica, ou seja, o sensor responde rapidamente. A aquisição de temperatura foi realizada com uma placa da *National Instruments (NI)*, modelo 9213, com uma interface serial USB para gerenciamento dos dados via computador. Este equipamento é dedicado a uso com termopar, com o condicionamento de sinal internamente. Podemos ressaltar as suas principais características como: resolução de 24 bits, 16 canais, modo de alta resolução com 55 ms de tempo de conversão, precisão de até 0,02 °C e erro de medição em torno de 1 °C, para termopares do tipo K.

O controlador de temperatura foi implementado discretamente em computador, e as saídas de controle foram convertidas em sinais analógicos para o circuito através de uma placa da *NI*, modelo 9263. Essa placa possui 4 canais de saída com conversor de 16 bits,

tensão de saída entre +/-10 V e frequência de amostragem de 100 kS/s por canal. A interface para comunicação também foi dada via serial por uma porta USB.

O tempo de amostragem utilizado para a aquisição de dados foi de 300 ms. Este valor é adequado para o sistema de controle pela natureza do processo térmico. E também para a reposta do fenômeno que está sendo analisado, a taxa de temperatura empregada é de 10 °C/min. Uma interface gráfica foi desenvolvida no ambiente LabVIEW™ para facilitar o gerenciamento dos dados, a qual está apresentada na Figura 23.

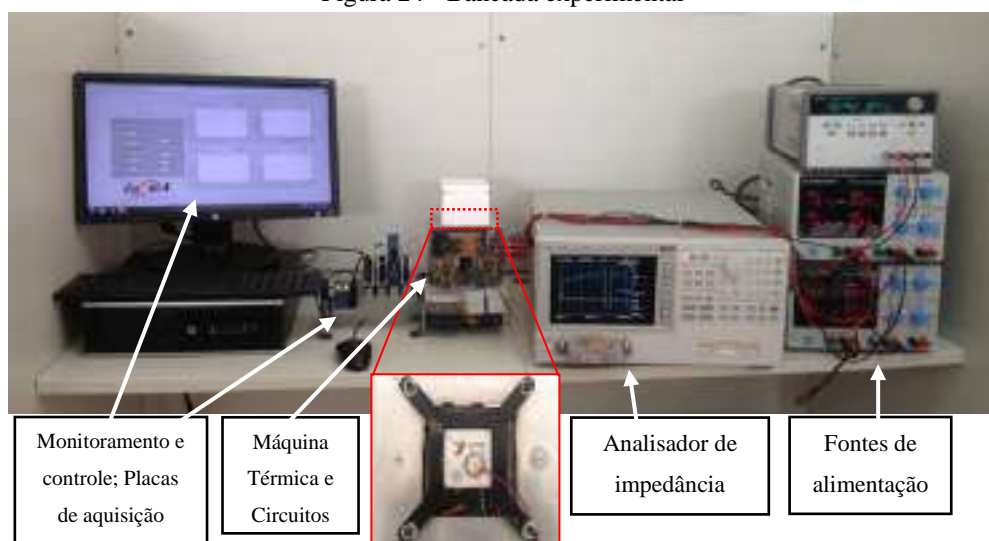
Figura 23 – Interface para ensaio de impedância



Fonte: Autoria própria

A bancada de trabalho onde os experimentos foram efetuados está mostrada na Figura 24, com a disposição dos equipamentos e um detalhe da máquina, como a amostra está fixada.

Figura 24 - Bancada experimental



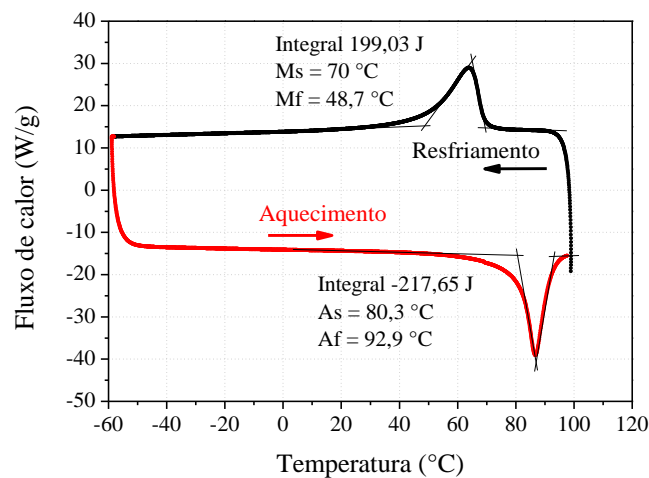
Fonte: Autoria própria

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As temperaturas de transformação de fase são ligeiramente modificadas com tratamentos e ciclagem térmica. Portanto a faixa de temperatura entre Af e Ms pode ser observada na amostra antes do tratamento (bruta) para fornecer os limites de atuação da máquina térmica. O ensaio de DSC apresenta esse resultado na Figura 25, com uma taxa de 10 °C/min e massa de 406 mg. O comportamento desta curva é típico de um ensaio em LMF de NiTi com apenas as fases austenita e martensita presentes na transformação, que pode ser comprovado pela quantidade de energia absorvida e liberada serem próximas.

As temperaturas foram calculadas utilizando o método das tangentes, que significa colocar retas tangenciais aos pontos de inflexão da curva, coincidindo com os picos das transformações. Durante o resfriamento tem-se a absorção de calor com martensita inicial de Ms = 70 °C e final de Mf = 48,7 °C. Já no aquecimento há uma liberação de calor com austenita inicial de As = 80,3 °C e final de Af = 92,9 °C. A partir desses valores a máquina térmica ficou especificada para operar entre 20 e 100 °C.

Figura 25 – DSC da amostra bruta



Fonte: Autoria própria

Com as curvas de resposta de reação em malha aberta com a entrada em degrau de -1,0 V os valores obtidos com a rotina para cálculo dos parâmetros, para os quatro materiais, estão apresentados na Tabela 4. Verifica-se que há uma pequena diferença, principalmente no ganho proporcional, de uma carga para outra em função apenas das propriedades. Embora esses valores forneçam uma resposta aceitável em algumas aplicações, isso não foi observado na avaliação para um sinal de entrada em rampa.

Tabela 4 – Parâmetros dos controladores obtidos pela sintonia

Material	NiTi	Latão	Cobre	Aço
Kc	0,912	1,478	1,14	1,643
Ti (min)	0,033	0,022	0,025	0,020
Td (min)	0,006	0,004	0,005	0,004

Fonte: Autoria própria

Sendo assim, um ajuste foi realizado para atender as especificações e os valores estão apresentados na Tabela 5. Dessa forma o erro de regime permanente aproximadamente nulo e baixo sobre valor percentual foram obtidos.

Tabela 5 – Parâmetros dos controladores após ajustes

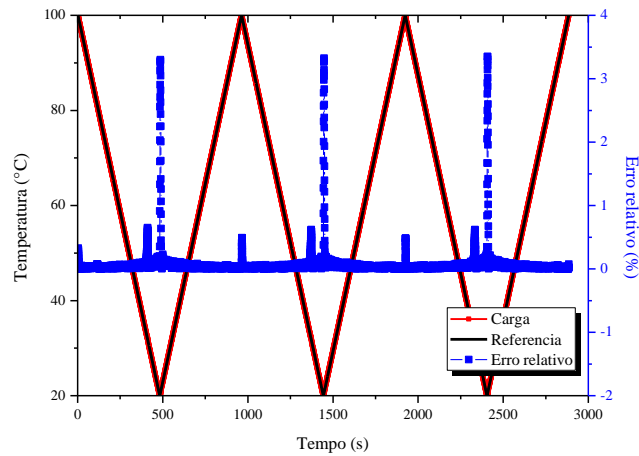
Material	NiTi	Latão	Cobre	Aço
Kc	15	15	15	15
Ti (min)	0,06	0,06	0,06	0,06
Td (min)	0,01	0,01	0,01	0,01

Fonte: Autoria própria

A resposta da planta para uma entrada em rampa, sendo a amostra de NiTi a carga, está apresentada na Figura 26. Esta rampa tem uma inclinação de 10 °C/min, assim como no ensaio de DSC, de modo a garantir o mesmo padrão dos ensaios.

A temperatura na carga e a referência estão sobrepostas na curva juntamente com um eixo de erro relativo. Durante o regime permanente o erro é próximo de 0%, e na transição de inclinação esse valor é elevado em função do transitório. Os níveis de erro mais altos estão durante a mudança de resfriamento para aquecimento devido a diferente dinâmica da planta nessas circunstâncias, e o controlador se mantém inalterado em todo o processo. Contudo, essas variações não afetaram a resposta do sistema. Os outros materiais também apresentaram resultados semelhantes para este teste.

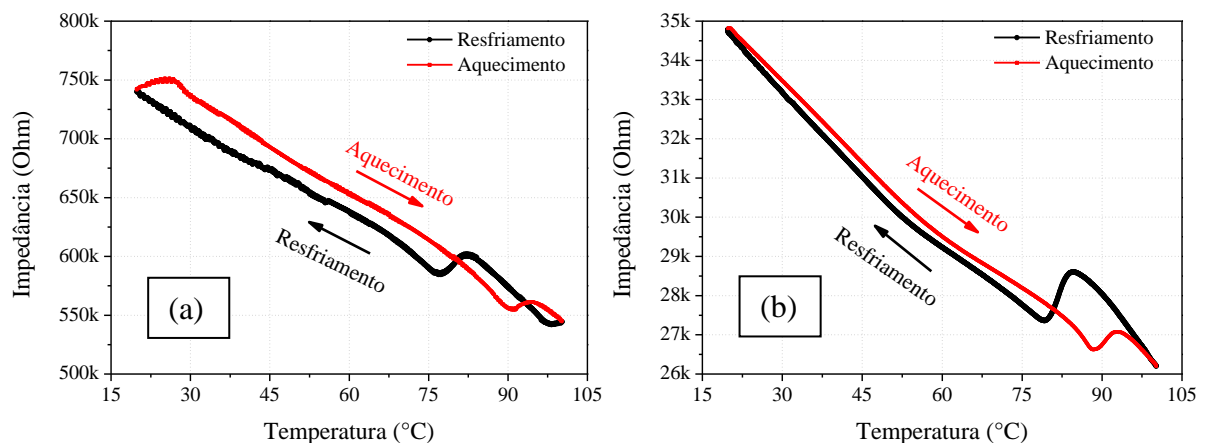
Figura 26 – Resposta de temperatura da máquina térmica para uma entrada em rampa

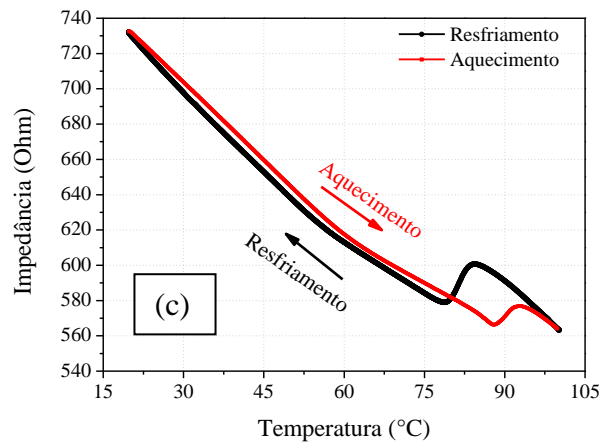


Fonte: Autoria própria

É apresentado na Figura 27 as respostas da magnitude da impedância em função da temperatura para diferentes valores de frequência de excitação, de 40, 1.000 e 50.000 Hz. O objetivo nesta análise é determinar um valor a ser seguido nos demais ensaios. Em todas as três curvas é possível observar um comportamento de mudança inclinação, com dois picos na região próxima aos valores de temperatura obtidos no ensaio de DSC apresentado anteriormente. Em frequências mais baixas a natureza capacitiva do piezoelétrico fornece valores de impedância mais elevados e como pode ser visto na Figura 27 (a) os picos não são tão acentuados como em frequências mais elevadas como em 1 kHz e 50 kHz. Pela inclinação da curva e uma melhor definição dos picos de impedância foi escolhido a frequência de 1 kHz. O nível de oscilação manteve-se o mesmo em todas as análises, sendo igual a 500 mV, pela baixa dependência dessa impedância com o nível de oscilação.

Figura 27 – Amostra de NiTi com frequência de (a) 40 Hz, (b) 1 kHz e (c) 50 kHz

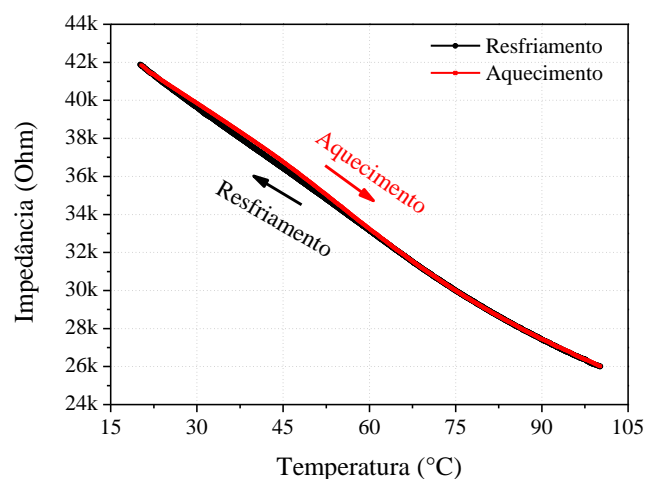




Fonte: Autoria própria

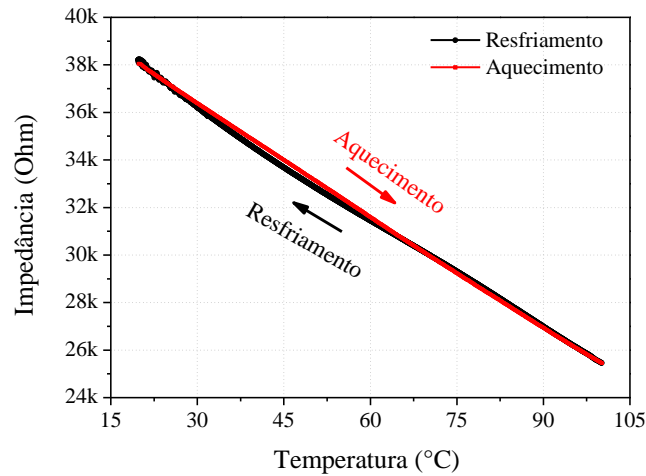
Nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30 estão apresentadas as respostas da magnitude da impedância em função da temperatura para os materiais: aço, cobre e latão, respectivamente. Os parâmetros utilizados foram de taxa igual a $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e frequência de excitação de 1 kHz. Em todas as curvas observa-se uma relação aproximadamente linear com uma histerese, consequência do armazenamento de energia na ciclagem térmica. Este ensaio comprova que os picos apresentados na amostra de NiTi na faixa de 75 a 95 $^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, são decorrência da transformação de fase do material. Eliminando a possibilidade do comportamento observado na Figura 27 ser influenciado pela máquina térmica ou até mesmo o sensor piezoelétrico.

Figura 28 – Análise de impedância da amostra de Aço



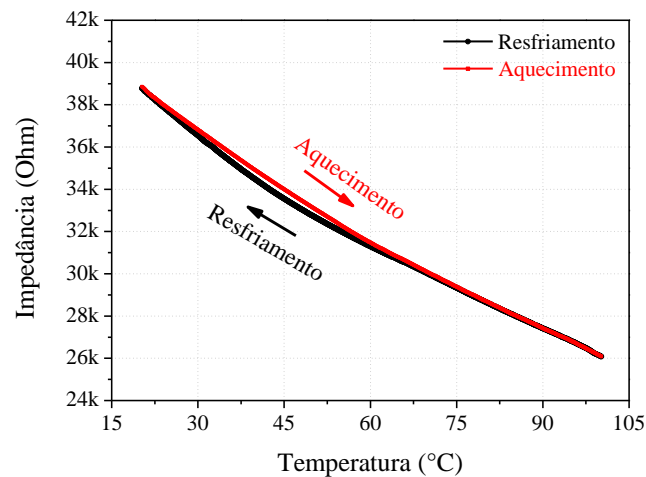
Fonte: Autoria própria

Figura 29 – Análise de impedância da amostra de Cobre



Fonte: Autoria própria

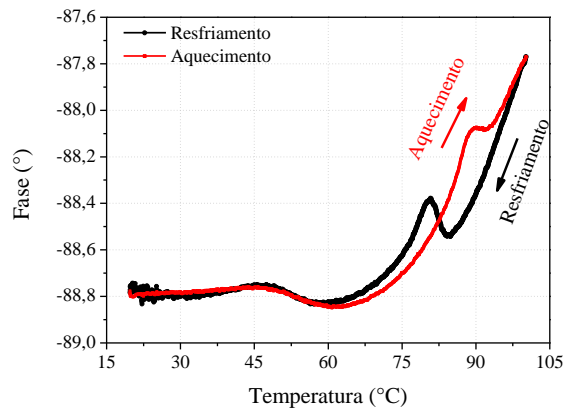
Figura 30 – Análise de impedância da amostra de Latão



Fonte: Autoria própria

A Figura 31 apresenta o comportamento da fase da impedância em função da temperatura. Nesta curva os picos de transformação também são visíveis entre 75 e 95 °C. Este fato justifica a efetividade do sensor em medir a mudança da rigidez da estrutura quando ocorre a transformação de fase, diferentemente do princípio no ensaio de DSC e no ensaio de resistência elétrica (RET). Onde na primeira a transformação é obtida pela quantidade de calor que a amostra absorve ou libera e no segundo a resistividade elétrica é mensurada. Esses dois métodos possuem limitações quanto a geometria e quantidade de material necessária para os experimentos. Neste contexto, o método proposto mostra-se uma alternativa para medições de temperaturas de transformação de fase em LMF robusto também.

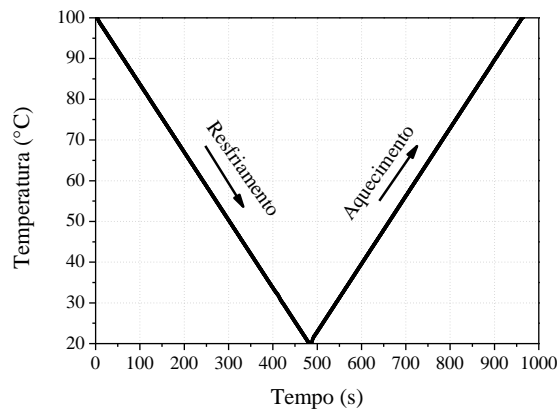
Figura 31 – Resposta da fase da amostra de NiTi com uma frequência de 1 kHz



Fonte: Autoria própria

A temperatura na heteroestrutura de NiTi no domínio do tempo é apresentada na Figura 32. Apenas um ciclo de resfriamento/aquecimento é destacado, observa-se que o sistema de controle e a máquina térmica atenderam aos requisitos de projeto.

Figura 32 – Resposta da temperatura em função do tempo na amostra de NiTi à 1kHz



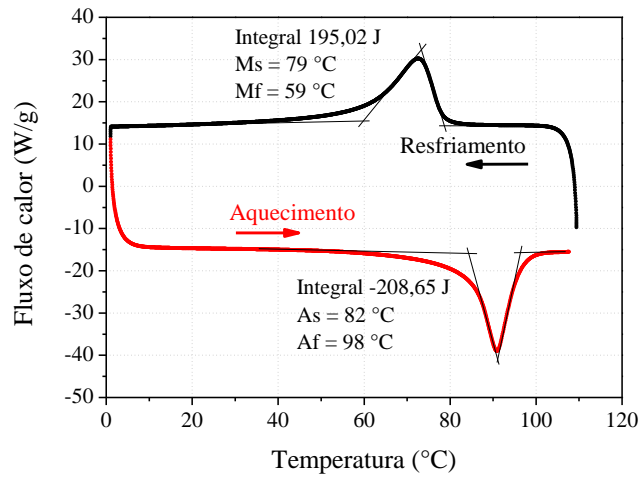
Fonte: Autoria própria

Uma amostra de dimensão menor foi mantida durante os ensaios ao lado da heteroestrutura de NiTi para ser submetida às mesmas ciclagens térmicas e ao processo de colagem para garantir os mesmos esforços térmicos da amostra de teste. Em seguida foi realizado um outro ensaio de DSC para verificar a mudança nas temperaturas de transformação. Esses novos valores foram confrontados com os encontrados com o método proposto.

Na Figura 33 é mostrado o ensaio de DSC com poucas variações nas temperaturas e ainda com apenas as duas fases presentes na transformação. Os valores estão resumidos na Tabela 6 com a comparação com o método de impedância eletromecânica. Para este último as temperaturas foram calculadas também pelas retas tangentes do ensaio a 1 kHz, como apresentado na Figura 34.

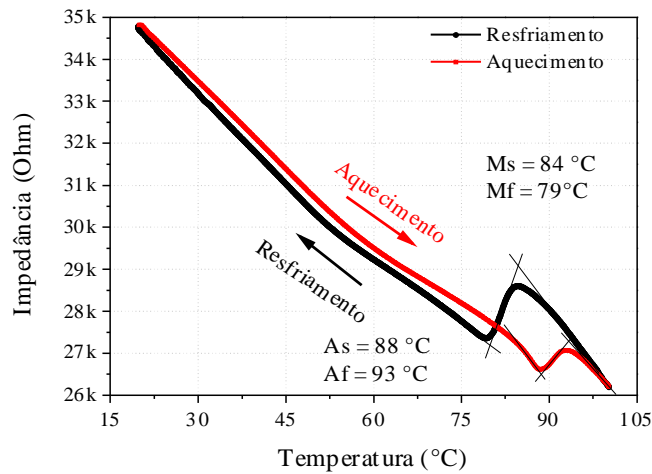
Como descrito na Tabela 6, a histerese pelo método de impedância é menor que pelo DSC. Isto pode ser explicado pelo princípio do DSC, onde a medição da energia fornecida ou absorvida possui um decaimento menor para estabilização. Diferentemente do que ocorre na medição de impedância, neste caso o fenômeno é observado em um tempo menor. A diferença máxima encontrada entre os métodos foi de 20 °C.

Figura 33 – DSC da amostra de NiTi após ciclagem e tratamento térmico



Fonte: Autoria própria

Figura 34 – Resposta de impedância da amostra de NiTi com frequência de 1 kHz e retas tangentes



Fonte: Autoria própria

Tabela 6 – Comparação das temperaturas de transformação pelo método proposto (EMI) e pelo DSC

Método	DSC	EMI	Erro (%)
Ms (°C)	79	84	6,3
Mf (°C)	59	79	33,8
As (°C)	82	88	7,3
Af (°C)	98	93	5,1

Fonte: Autoria própria

Como no final da transformação de fase martensita o material emite baixa energia, o sensor de fluxo de calor do DSC não capta o sinal muito bem, e a curva fica com uma inflexão mais suave do que no início da transformação (austenita-martensita). Já no método apresentado esse problema de baixa energia emitida pelo material não afeta a medição. Fato este explica a diferença maior no cálculo da temperatura M_f pelos dois métodos, com um erro de 33,8%.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentaram boa concordância entre a medição das temperaturas pela técnica de impedância e o ensaio DSC. O método proposto mostra-se uma alternativa bastante viável para medições de temperaturas de transformação de fase em LMF. Comparando-o com os tradicionais (DSC e RET), é possível extrair essas propriedades de ligas de NiTi em diferentes geometrias e tamanhos.

O controlador PID implementado, na forma digital, demonstrou resultados bastante satisfatórios, como visto na resposta em regime permanente e no transitório do comportamento térmico da máquina térmica controlada. Embora tenha sido considerado muitas simplificações no sistema de controle, sua simplicidade justificou a sua utilização nesta aplicação.

A interface gráfica desenvolvida conseguiu gerenciar todo o ensaio de maneira que o usuário o realizasse sem muito esforço. Proporcionando viabilidade de reprodução dos materiais desenvolvidos para uso a posteriori.

Algumas recomendações que podem ser feitas são no âmbito de realização de testes com materiais de LMF com diferentes composições, aplicar métodos de estatística para validação dos resultados e utilizar outro tipo de circuito para medição de impedância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHER, S. S. et al. A review on smart materials: future potentials in engineering. **International Journal of Science Technology and Management**, p. 7-15, Outubro 2015.
- BAPTISTA, F. G. et al. An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. **Sensors**, v. 14, 2014, p. 1208-1227.
- BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. Transducer loading effect on the performance of PZT-based SHM systems. **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, v. 57, 2010, p. 933-941.
- BASÍLIO SOBRINHO, J. M. et al. **Desenvolvimento de uma garra robótica acionada com atuadores de liga com memória de forma**. CONEM. Fortaleza: ABCM. 2016.
- BASÍLIO SOBRINHO, J. M. et al. Electronic Instrumentation for the Characterization of a Rotary Thermoelectric Motor Driven by Shape Memory Alloy Springs. **I2MTC**, p. 1-5, 2017.
- BOUKABACHE, H. et al. System-on-Chip integration of a new electromechanical impedance calculation method for aircraft structure health monitoring. **Sensors**, v. 12, 2012, p. 13617-13635.
- CHOUDHARY, N.; KAUR, D. Fabrication And Characterization Of SMA/PZT Thin Film Heterostructures. **AIP Conference Proceedings**, p. 90-93.
- CHOUDHARY, N.; KAUR, D. Shape memory alloy thin films and heterostructures for MEMS applications: a review. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 242, 2016, p. 162-181.
- DA SILVEIRA, R. Z. et al. Analysis of Sensor Installation Methods in Impedance-based SHM Applications. **Procedia Engineering**, v. 168, 2016, p. 1751-1754.
- EMILIAVACA, A. **SMArt morphing wing: um protótipo de asa adaptativa acionada por micro molas de liga com memória de forma**. UFCG. Campina Grande, p. 50-53. 2016.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric energy harvesting**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- GOODWIN, G. C.; GRAEBE, S. F.; SALGADO, M. E. **Control system design**. [S.l.]: Upper Saddle River, 2001.
- HUANG, B. J.; DUANG, C. L. System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler. **International journal of refrigeration**, v. 23, n. 3, 2000. p. 197-207.
- INTERNATIONAL, A. **Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis**. [S.l.], p. 1-2. 2005.
- KEAWBOONCHUAY, C.; ENGEL, T. G. Maximum power generation in a piezoelectric pulse generator. **IEEE transactions on plasma science**, v. 31, 2003, p. 123-128.
- LAGOUDAS, D. C. **Shape memory alloys**. [S.l.]: Science and Business Media, 2008.

LEE, H. S. **Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

LEO, D. J. **Engineering analysis of smart material systems.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

LIANG, Y. et al. Bond-slip detection of concrete-encased composite structure using electro-mechanical impedance technique. **Smart Materials and Structures**, v. 25, 2016, p. 1-10.

LINEYKIN, S.; BEN-YAAKOV, S. Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, 2007, p. 505-512.

LIU, Y. et al. Some aspects of the properties of NiTi shape memory alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 247, 1997, p. 115-121.

MAXIMILIAN, L. The Fundamentals of Thermoelectrics - A bachelor's laboratory practical. **Nanophotonics Group**, 2015. Disponível em: <http://www.nano.physik.uni-muenchen.de/nanophotonics/_assets/pdf/f1/K3_Thermoelectrics.pdf>. Acesso em: 15 Agosto 2017.

NIELSEN, J. P. **Thermoelectric Materials and devices.** New York: Reinhold, 1960.

OSTACHOWICZ, W.; GÜEMES, A. **New trends in structural health monitoring.** [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.

PATEL, I. **Ceramic based intelligent piezoelectric energy harvesting device.** In: Advances in Ceramics-Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment. [S.l.]: InTech, 2011.

SARMENTO, N. L. D. **Identificação e Controle de um Processo Termoelétrico Multivariável em Escala Laboratorial.** Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Campina Grande, p. 30-31. 2016.

SENSORES, E. Adesivos e materiais auxiliares da colagem. **Excel Sensor**, 2017. Disponível em: <<http://www.excelsensor.com.br/colagem>>. Acesso em: 5 Outubro 2017.

SHIN, S. W.; OH, T. K. Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online monitoring of strength development in concrete using smart PZT patches. **Construction and Building Materials**, v. 23, 2009, p. 1185-1188.

SINGH, H.; SINGH, R. **Smart Materials: New Trend in Structural Engineering.** International Journal. [S.l.]: [s.n.]. 2015, p. 661-664.

SOTO-PARRA, D. E. E. A. Recrystallization of a Ti-45Ni-5Cu cold-worked shape memory alloy characterized by thermoelectric power and electrical properties. **Materials Research**, v. 17, p. p. 1023-1030, 2014. ISSN n. 4.

SOUTO, C. D. R. et al. **Thermal cycling effect on a shape memory and piezoelectric heterostructure.** IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). [S.l.]: [s.n.]. 2014, p. 315-319.

SUN, B. Smart Materials and Structures. Zürich: Cape Peninsula University of Technology, 2015. Cap. 1, p. 1-7.

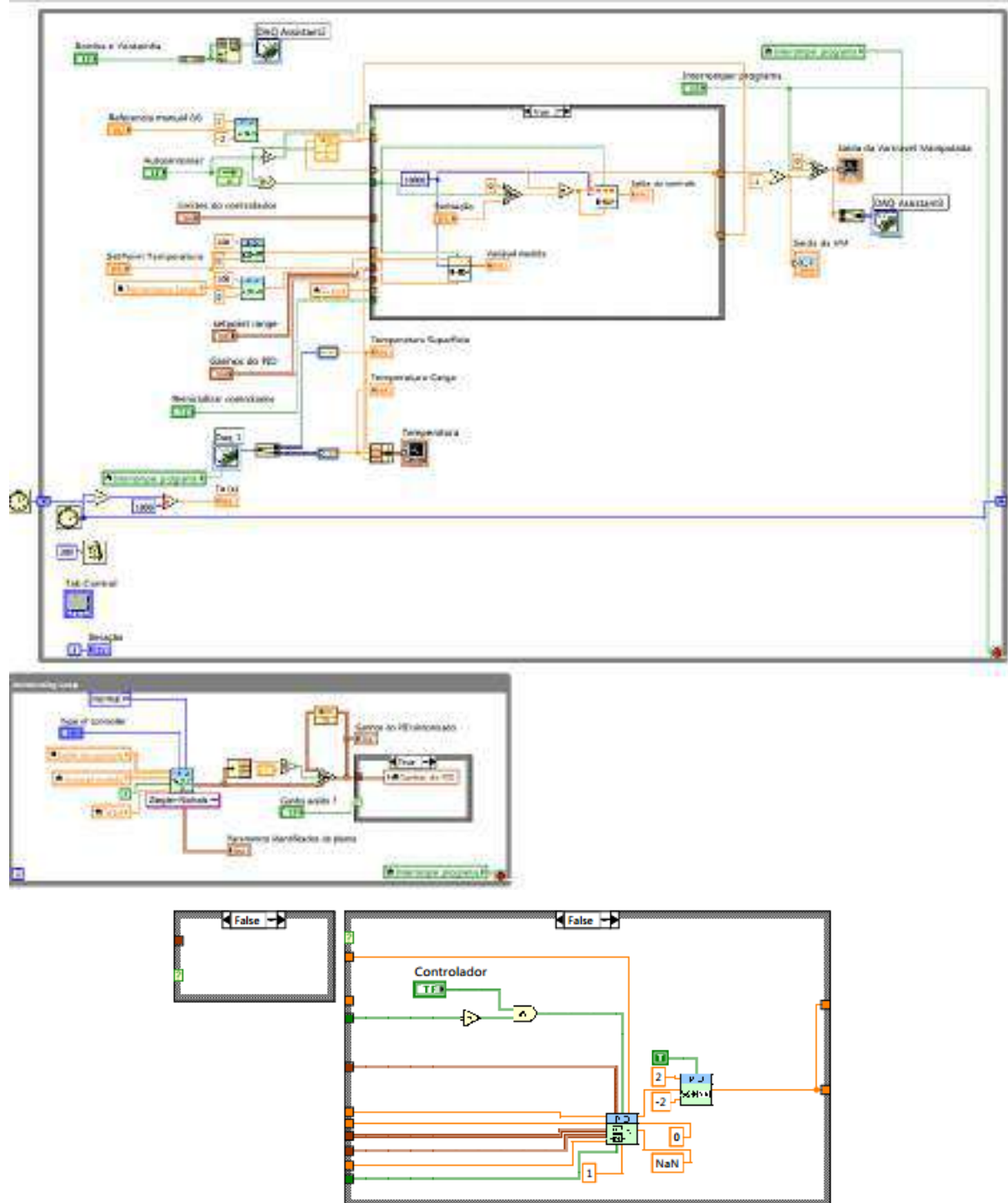
TECHNOLOGIES, A. **Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer: Operation Manual**. Japão. 2003.

TECHNOLOGIES, A. **Programming Manual**. [S.l.], p. 26-30. 2012.

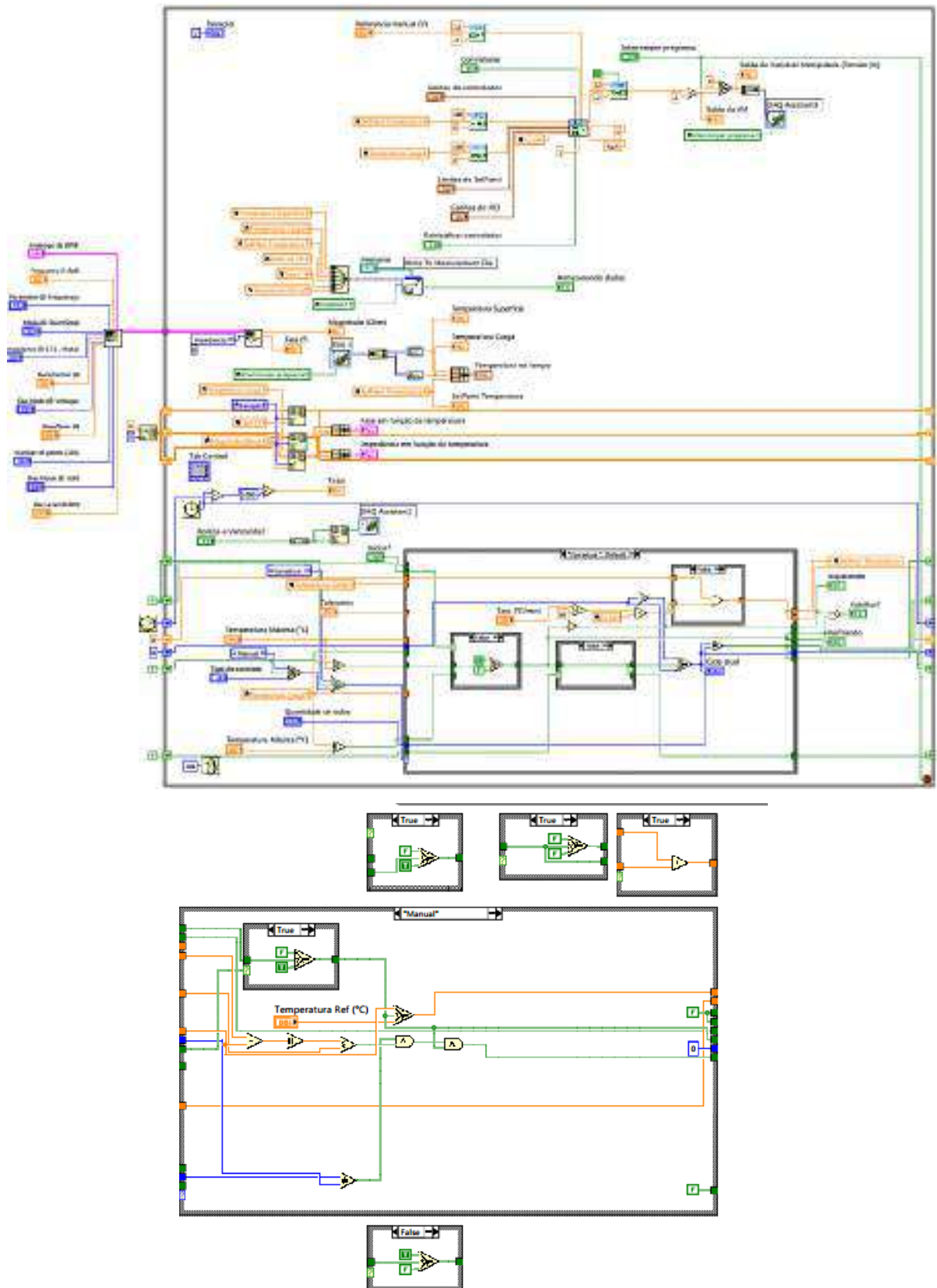
TECHNOLOGIES, K. 4294A Precision Impedance Analyzer, 40 Hz to 110 MHz, 2017. Disponível em: <<http://www.keysight.com/en/pd-1000000858%3Aeps%3Apro-pn-4294A/precision-impedance-analyzer-40-hz-to-110-mhz?cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 6 Novembro 2017.

ZANABONI, E. **One Way and Two Way–Shape Memory Effect: Thermo–Mechanical Characterization of Ni–Ti wires**. Università degli Studi di Pavia. [S.l.], p. 6-40. 2008.

APÊNDICE A – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ROTINA IMPLEMENTADA EM LabVIEW™ PARA SINTONIA PELO MÉTODO DA CURVA DE REAÇÃO



APÊNDICE B – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ROTINA IMPLEMENTADA EM LabVIEW™ PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE IMPEDÂNCIA



APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ROTINA IMPLEMENTADA EM LabVIEW™ PARA CONFIGURAÇÃO DO ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA VIA GPIB

