



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Plataforma Experimental para Obtenção de Resistência Elétrica de um Atuador de Liga de Memória de Forma

Wislayne Dayanne Pereira da Silva

Campina Grande, PB

04 de dezembro de 2019

Wislayne Dayanne Pereira da Silva

Plataforma Experimental para Obtenção de Resistência Elétrica de um Atuador de Liga de Memória de Forma

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduada em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Instrumentação Eletrônica

Orientador: Jaidilson Jó da Silva, D.Sc.

Campina Grande, PB

04 de dezembro de 2019

Wislayne Dayanne Pereira da Silva

Plataforma Experimental para Obtenção de Resistência Elétrica de um Atuador de Liga de Memória de Forma

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduada em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____ / ____ / ____

Jaidilson Jó da Silva, D.Sc.
Orientador

Gutemberg Gonçalves dos S. Júnior
Professor Convidado

Campina Grande, PB
04 de dezembro de 2019

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Maria Juraneide Pereira da Silva e Eliosmar Bezerra da Silva, à meus irmãos Wirla Aparecida Pereira da Silva, Wesley Danilo Pereira da Silva e Wirlane Danise Pereira da Silva, e ao meu sobrinho Thiago Vinícius Pereira Belarmino.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar força e coragem diariamente para seguir minha jornada com fé e resiliência. Em seguida, agradeço aos meus pais, Eliosmar e Juraneide, por me mostrarem desde cedo que a educação é a única forma de transformar realidades e principalmente por todo amor e apoio emocional durante esses cinco anos de curso.

Gratidão aos meus irmãos, Wirla, Wesley e Wirlane, por todas as palavras de carinho e conforto faladas nos momentos de dificuldade e por terem batalhado comigo em 2014 para tornar minha vinda à Campina Grande possível. Ao meu sobrinho, Thiago, agradeço por ser minha fonte de motivação diária para não desistir dos meus objetivos.

Aos meus professores, por todos os ensinamentos e oportunidades que me foram dadas. Em especial aos professores: Jaidilson, que me orientou nesse trabalho de conclusão de curso e no estágio; ao professor Saulo que gerencia minhas atividades em projeto de Pesquisa e Desenvolvimento desde o início de 2018; e ao professor Wamberto por ter me acompanhado e orientado durante quase três anos no grupo PET-Elétrica UFCG.

Agradeço à Tony, grande amigo e colega de laboratório, por todo suporte ao longo de todo desenvolvimento desse trabalho. Não teria conseguido solucionar os desafios que surgiram sem sua ajuda e conselhos.

Agradeço às pessoas maravilhosas que encontrei ao longo da graduação, nos grupos IEEE WIE UFCG, Ramo Estudantil IEEE UFCG e PET Elétrica UFCG, que tornaram a jornada universitária mais leve e fácil, constituindo uma rede de apoio essencial para minha formação pessoal e profissional. Em especial aos queridos amigos: Camila Abrantes, Weverton, Marianne, Andhré, Alison, Arllan, Wemerson, Camila Pereira, Vanessa, Maria Clara, Isys e Danrley. Foi uma honra tê-los como contemporâneos de curso e será um grande privilégio tê-los como colegas de profissão.

Agradeço à Aislan, por ter sido meu confidente e companheiro, com quem pude dividir, diariamente, todas as aflições e dificuldades encontradas ao longo do trabalho e continuamente, deu-me forças para não desistir.

*"Acredite, pense e faça,
use sua intuição,
transforme sonho em suor,
pensamento em ação".
Bráulio Bessa*

Resumo

Efeito de Memória de Forma (EMF) se refere a capacidade de um material recuperar sua forma original, por meio da variação de temperatura, após ter sido submetido a grandes deformações. Esse fenômeno pode ser percebido em materiais metálicos especiais denominados Ligas de Memória de Forma (LMF). Essas ligas são muito estudadas e utilizadas como atuadores para o controle de vibração, deformação e posição e, nas últimas década, têm sido empregadas em uma grande variedade de aplicações. Utilizando uma plataforma composta por uma viga de aço engastada e um atuador de LMF, foi proposta para este trabalho, a implementação de uma estrutura experimental para ser aplicada a disciplina de Laboratório de Instrumentação Eletrônica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O objetivo é possibilitar que os alunos realizem experimentos para obter a característica da resistência elétrica da LMF e medir a deformação da viga, causada pela aplicação de corrente elétrica no atuador. Para isso, foram utilizados um dispositivo para a aquisição de dados NI DAQ USB-6212, dois sensores extensômetros para medição da deformação e projetados circuitos de condicionamento e acionamento do atuador. Para facilitar a execução do experimento, foi implementada uma interface gráfica utilizando o *software* LabVIEW. Com a realização dos experimentos foi possível adquirir os dados necessários para a analisar o comportamento da resistência do atuador e a deformação da viga.

Palavras-chaves: Atuador de Liga de Memória de Forma, Deformação, Extensômetros de Resistência Elétrica, Instrumentação Eletrônica, Resistência Elétrica.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação da Transformação de Fase de uma LMF	6
Figura 2 – Representação da Curva de Histerese e Temperaturas de Transição para LMFs	6
Figura 3 – Representação da Orientação dos Variantes da LMF, mediante (a) e (b) . . .	7
Figura 4 – Representação das Deformações do Tipo Axial (direita) e de Flexão (esquerda)	8
Figura 5 – Representação de um Extensômetro sob o Material que se Deseja Medir Deformação.	9
Figura 6 – Diagrama do Circuito Ponte de Wheatstone	9
Figura 7 – Diagrama do Circuito Ponte de Wheatstone com Dois Elementos Ativos Complementares	10
Figura 8 – Ilustrações das Vistas da Plataforma Experimental Utilizada	13
Figura 9 – Fotografia do Sistema Eletrônico	14
Figura 10 – Representação dos Extensômetros de Resistência Elétrica Utilizados	15
Figura 11 – Imagem da Placa de Aquisição de Dados NI DAQ USB-6212.	17
Figura 12 – Representação do Bloco do LABVIEW Utilizado para Configuração dos Canais	17
Figura 13 – Representação do Bloco do LABVIEW Utilizado para Leitura dos Canais .	18
Figura 14 – Representação do Bloco do LABVIEW Utilizado para Enviar um Sinal no Canal	18
Figura 15 – Representação da Pinagem do Dispositivo NI USB-6212	19
Figura 16 – Diagrama do Circuito de Condicionamento do Sinal de Saída da Ponte de Wheatstone.	20
Figura 17 – Diagrama do Circuito do <i>Driver</i> de Corrente	21
Figura 18 – Diagrama do Circuito de Medição da Tensão no Atuador de LMF	22
Figura 19 – Representação do Painel de Frontal da VI Implementada	24
Figura 20 – Representação do Código Implementado para Aquisição dos Dados pelo LabVIEW	24
Figura 21 – Representação do Código Implementado para o Tratamento Matemático dos Dados Adquiridos	25
Figura 22 – Representação do Código Implementado para o Salvamento das Variáveis de Interesse	26
Figura 23 – Fotografia da Plataforma Experimental	28
Figura 24 – Diagrama em Blocos dos Procedimentos Iniciais	28
Figura 25 – Representação do Comportamento Resistência <i>versus</i> Corrente	31
Figura 26 – Representação do Comportamento Resistência <i>versus</i> Corrente - Modelo Aproximado	32
Figura 27 – Representação do Comportamento Deformação <i>versus</i> Corrente	33

Figura 28 – Representação do Comportamento Deformação versus Corrente - Modelo Aproximado	34
Figura 29 – Representação do Código Implementado no LabVIEW	38
Figura 30 – Representação da Transformação de Fase de uma LMF	41
Figura 31 – Representação de um Extensômetro sob o Material que se Deseja Medir Deformação.	42
Figura 32 – Diagrama Elétrico da Ponte de Wheatstone com dois Extensômetros	42
Figura 33 – Fotografia da Plataforma Experimental	44
Figura 34 – Representação da Interface Gráfica no LabVIEW	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características do Atuador de Fio de LMF	16
Tabela 2 – Canais da NI DAQ USB-6212 Utilizados no Sistema	19
Tabela 3 – Dados Experimentais	30
Tabela 4 – Deformação, Tensão, Corrente e Resistência Correspondente	45

Lista de abreviaturas e siglas

DAQ	Data Acquisition
EMF	Efeito de Memória de Forma
GF	Fator de Medida - <i>Gauge Factor</i>
IHM	Interface Humano Máquina
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LIEC	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle
LMF	Liga de Memória de Forma
NI	National Instruments
NOL	Laboratório de Artilharia Naval - Naval Ordnance Laboratory
SMA	Shape Memory Alloy
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VI	Virtual Instruments

Sumário

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Organização do Texto	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Efeito de Memória de Forma	5
2.2	Medição de Deformação e Extensômetros de Resistência Elétrica	8
3	PLATAFORMA EXPERIMENTAL	12
3.1	Sistema Mecânico	12
3.2	Sistema Eletrônico	14
3.2.1	Extensômetros	14
3.2.2	Atuador Fio de LMF	16
3.2.3	Sistema de Aquisição de Dados	16
3.2.4	Circuitos de Condicionamento e de Ajuste de Ganho	20
3.2.5	<i>Driver</i> de Acionamento do Atuador	21
3.2.6	Circuito de Medição da Tensão no Atuador de LMF	22
3.3	Interface Humano-Máquina	23
4	ROTEIRO EXPERIMENTAL	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	REFERÊNCIAS	36
A	APÊNDICE A - CÓDIGO LABVIEW	38
B	APÊNDICE B - GUIA DO EXPERIMENTO	40

1 Introdução

As Ligas de Memória de Forma (LMF), também conhecidas como *Shape Memory Alloy* (SMA), são ligas metálicas que quando submetidas a deformações retornam a sua forma original após um ciclo térmico. Esse efeito é conhecido como Efeito de Memória de Forma (EMF) e foi descoberto em 1963 por Willian J. Buehler a partir de pesquisas desenvolvidas com ligas de níquel-titânio (NiTi) no Laboratório de Artilharia Naval (NOL). Ainda na década de sessenta o EMF foi encontrado em outras ligas que além de níquel de titânio possuíam Cobalto (Co) e Ferro (Fe). A adição desses dois elementos permitiu uma redução nas temperaturas de transformação da liga (NASCIMENTO, 2002).

Posteriormente, surgiram ligas de Titânio-Paládio (TiPd), Titânio-Platina (TiPt) e Titânio-Ouro (TiAu) utilizadas para aplicações em altas temperaturas. Mas apenas em 1980 foi que as LMFs passaram a ser utilizadas de forma mais abrangente, uma vez que o efeito foi melhor compreendido. Nesse contexto, as LMFs compõem uma classe única de materiais, que além de apresentar a capacidade de recuperação da forma preestabelecida quando sua temperatura é aumentada, apresenta a característica de super elasticidade. Quando a temperatura é aumentada a forma pode ser recuperada a partir da aplicação de cargas elevadas, que causam altas densidades de energia de atuação (BARROSO, 2019).

Tendo em vista que os sistemas mecânicos são frequentemente submetidos a perturbações que resultam em deformações e vibrações indesejadas, é extremamente importante que seja feita uma análise de deformações para não colocar em risco a própria integridade estrutural do sistema. Nas últimas décadas, problemas dessa natureza vêm sendo tratados por técnicas convencionais de controle, por meio da adição de atuadores de LMF. Isso se dá principalmente por sua relação com a deformação por peso, que permitem o desenvolvimento de dispositivos compactos e confiáveis (CAMPOS, 2018).

Além de atuadores, as LMFs são muito empregadas em aplicações de sensoriamento, absorção de impacto e amortecimento de vibrações. Dos diversos setores industriais que são aplicadas, destacam-se: aeroespacial, automotivo, biomédico, odontológico, ortopédicas, robótico e petrolífera (CAMPOS, 2018).

Neste trabalho, é proposta a implementação de uma plataforma de ensino para estudo de um atuador de LMF. A plataforma é composta por uma viga de aço engastada, um atuador de LMF, um sistema eletrônico e uma interface gráfica, e possibilita a realização de experimentos para obtenção da resistência elétrica da LMF e para a medição da deformação da viga, causada pela aplicação de corrente elétrica no atuador.

1.1 Motivação

No Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) há uma plataforma de testes composta por uma viga de aço engastada e um atuador de fio LMF, que possibilita realizar a medição da deformação da barra de aço, causada pela atuação da LMF, fazendo uso de extensômetros fixados nas partes superior e inferior da viga. A plataforma foi utilizada em trabalhos de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), de Lima (LIMA,2008), Pequeno (Pequeno, 2012), Campos (CAMPOS, 2018) e Barroso (BARROSO, 2019), visando principalmente modelagem e identificação de sistemas e aplicação de estratégias de controle.

Nos cursos de Engenharia, a realização de experimentos em laboratórios é uma ferramenta de aprendizagem muito importante, uma vez que os estudantes tem a oportunidade de aplicar de forma prática os conceitos teóricos apresentados em sala de aula, como também, compreendê-los de forma mais eficaz. Diante disso, este trabalho teve como motivação utilizar a estrutura mecânica da plataforma experimental aqui citada, para implementar uma estrutura de experimento que possa ser replicado por outros estudantes para estudos de sensores e atuadores, na disciplina de Instrumentação Eletrônica do curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma plataforma de ensino para obter a resistência elétrica de um atuador de Liga de Memória de Forma e medir por meio de sensores extensômetros, a deformação em uma barra de alumínio, causada pela variação da corrente elétrica no atuador.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Implementar o acionamento do atuador de liga de memória de forma utilizando um *driver* de corrente mediante a variação do sinal de tensão de entrada;
- Implementar o circuito para medição de tensão diferencial no atuador de LMF;
- Replicar os circuitos de medição dos extensômetros com novo ajuste de ganho;
- Realizar as leituras analógicas utilizando a placa de aquisição de dados NI DAQ USB 6212;
- Implementar uma interface gráfica utilizando o *software* LabVIEW;
- Realizar ensaios e analisar os resultados.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, conforme a descrição a seguir:

- Capítulo 1: apresenta-se uma introdução sobre as Ligas de Memória de Forma, a motivação e os objetivos do trabalho;
- Capítulo 2: concentra-se a fundamentação teórica dos conceitos utilizados no trabalho;
- Capítulo 3: apresenta-se a plataforma experimental desenvolvida;
- Capítulo 4: trata-se da apresentação do experimento proposto;
- Capítulo 5: descreve-se a análise dos resultados obtidos;
- Capítulo 6: apresenta-se as considerações finais.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos que fundamentam este trabalho, no intuito de prover maior embasamento teórico ao que será explanado posteriormente. São aqui descritos os fundamentos do Efeito de Memória de Forma, dos extensômetros e sua utilização na medição de deformação.

2.1 Efeito de Memória de Forma

O Efeito de Memória de Forma (EMF) se refere a capacidade de um material recuperar sua forma original, por meio da variação de temperatura, após ter sido submetido a grandes deformações. Esse fenômeno pode ser percebido em materiais metálicos especiais denominados Ligas de Memória de Forma (LMF) (ELAHINIA, 2015).

O EMF pode acontecer em duas formas: caminho simples (do inglês *one way*) e caminho duplo (do inglês *two way*). Em caminho simples o material deformado consegue recuperar sua forma original, ao ser submetido a um aumento de temperatura. Por outro lado, se o material é submetido a uma diminuição de temperatura, de forma a ser resfriado, não consegue recuperar à forma original, sendo necessário aplicar uma força para deformá-lo novamente. Já em caminho duplo, o material tem a capacidade de memorizar duas formas diferentes, uma para baixas temperaturas e outra para altas temperaturas, sendo possível a recuperação da forma original tanto com o aquecimento quanto o resfriamento (BARROSO, 2019).

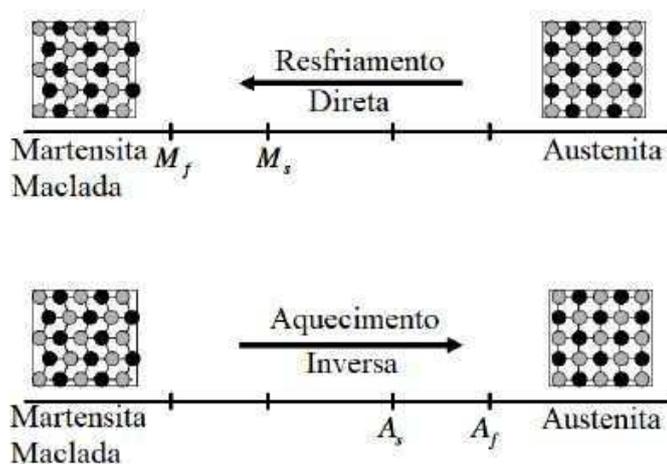
As Ligas de Memória de Forma (LMF) possuem duas fases distintas, cada uma com propriedades físicas específicas. Essas fases são nomeadas como: austenita e martensita. A austenita normalmente apresenta uma estrutura cristalina cúbica de face ou corpo centrado em altas temperaturas, já na fase de martensita, pode apresentar uma estrutura tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica em baixas temperaturas. Na fase martensítica, os cristais podem ficar orientados em direções distintas uns dos outros, cada direção recebe o nome de variante. Os variantes podem ter duas direções de orientação: martensita maclada ou desorientada e martensita de maclada ou orientada. A primeira é formada por um variantes autoacomodados e a última possui um variante que é dominante no agrupamento (LAGOUDAS, 2008).

A transformação de uma fase para outra pode ocorrer de forma direta e inversa. A transformação direta se refere a mudança da fase austenita para a martensita e se dá ao resfriar a LMF na ausência de carga aplicada. Na transformação inversa, por sua vez, ao aquecer a mesma LMF, a estrutura cristalina sofre uma transformação reversa, voltando da fase martensita para austenita.

As transformações são melhores ilustradas na Figura 1, na qual são apresentadas as estruturas nas formas de martensita desorientada e austenita. Como pode-se observar, na transformação

direta, com ausência de carga mecânica, a fase da austenita começa a transformação para a fase martensita desorientada na temperatura inicial de martensita (M_s) e a transição é concluída na temperatura final de martensita (M_f). Nessa temperatura, a liga se estará totalmente transformada na forma martensita desorientada, completando assim a transformação direta. Ao aquecer a liga, inicia-se o processo de transformação inversa, na temperatura inicial de austenita (A_s), e a transição é completada na temperatura final de austenita (A_f).

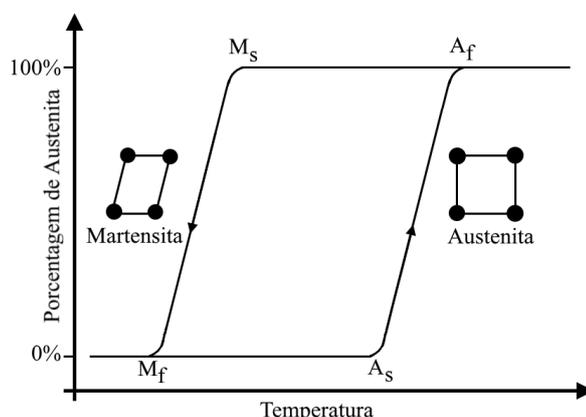
Figura 1 – Representação da Transformação de Fase de uma LMF



Fonte: CAMPOS, 2018 adaptado de LAGOUDAS, 2008

As mudanças das fases austenita para a martensita podem ainda ser explicadas por um laço de histerese. Quando nenhuma carga é aplicada, a transformação acontece devido à variação da temperatura. Dessa forma, para o caso de uma liga totalmente martensita, conforme ilustrado na Figura 2, é necessário que a temperatura de aquecimento da liga seja superior à temperatura inicial de austenita (A_s). A liga estará totalmente na fase de austenita quando atingir a temperatura final de austenita (A_f). De forma similar, o processo de resfriamento possibilita que a liga retorne da fase austenita para a martensita.

Figura 2 – Representação da Curva de Histerese e Temperaturas de Transição para LMFs

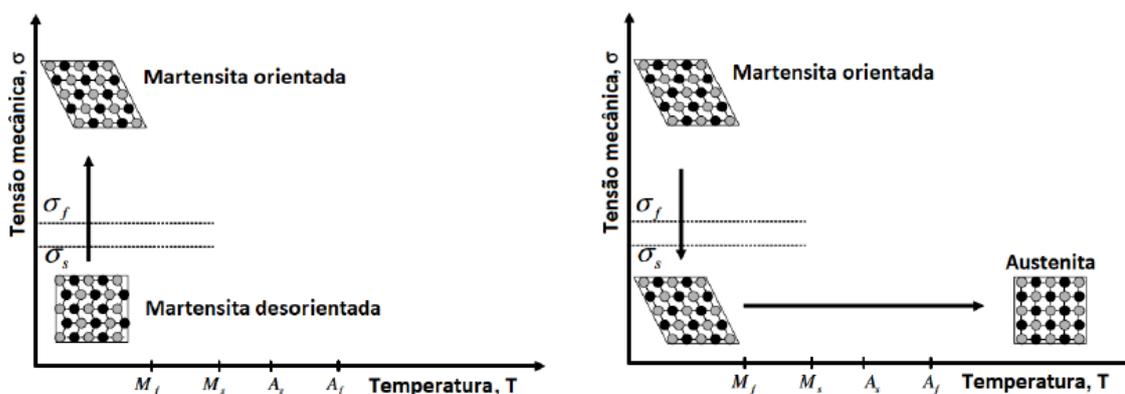


Fonte: Adaptado de NASCIMENTO, 2002

As transformações direta e inversa apresentadas se referem à conversão de martensita desorientada para austenita e vice-versa. Dessa forma, é necessário que ocorra uma orientação dos variantes antes da transição para fase austenica. Sendo assim, além de variar a temperatura, aplica-se uma tensão mecânica a LMF. Aplicando uma carga a liga na forma de martensita desorientada, é esperado que aconteça uma reorientação dos variantes e, conseqüentemente aconteça uma transformação para martensita orientada. Esse fenômeno resultará na mudança permanente da forma do material (CAMPOS, 2018).

Na Figura 3(a) pode-se visualizar a reorientação dos variantes. A carga mínima aplicada para iniciar a orientação é denominada como tensão mecânica de início de orientação, σ_s , e a carga necessária para tornar todos os variantes orientados é denominada de tensão mecânica de fim de orientação, σ_f . Após a transição de martensita desorientada para orientada, o processo de transformação para austenita ocorre normalmente por meio do aquecimento da LMF. Isso se dá da seguinte forma, após a deformação, a liga é submetida a uma temperatura superior a (A_f), o que resulta na conversão de martensita orientada para austenita, ou seja, irá recuperar a forma original, sem qualquer deformação. Ao ser resfriada a liga retornará a fase martensita desorientada inicial. Dessa forma, as temperaturas de início e fim de transformação são diretamente proporcionais à carga aplicada. Esse processo é ilustrado na Figura 3(b).

Figura 3 – Representação da Orientação dos Variantes da LMF, mediante (a) e (b)



(a) Aplicação de uma Tensão Mecânica

(b) Aplicação de uma Tensão Mecânica, seguido de um aquecimento do material

Fonte: CAMPOS, 2018 adaptado de LAGOUDAS, 2008

Segundo Otsuka e Wayman (1998), devido a capacidade de retornar a sua forma original, mesmo após sofrer grandes deformações, as LMFs são caracterizadas também pela superelasticidade ou efeito pseudoelástico histerético. Essa característica está relacionada com a grande tensão recuperável não linear em altas temperaturas ao carregar e descarregar.

2.2 Medição de Deformação e Extensômetros de Resistência Elétrica

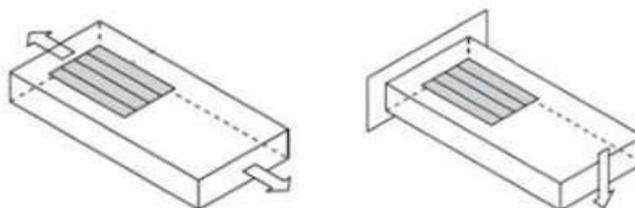
A instrumentação eletrônica desenvolve técnicas para sistemas de medição, transmissão, registro e controle de variáveis físicas utilizando dispositivos eletrônicos. Esses sistemas são compostos por circuitos eletrônicos que possuem entre seus componentes os sensores, que são responsáveis pela captação das variáveis que se deseja mensurar, de forma que detectam um sinal ou estímulo de uma grandeza física e a convertem em uma grandeza elétrica mensurável (CAMPO et al, 2008).

A deformação física de um material é um exemplo de grandeza que pode ser medida e se refere as alterações físicas de um material causadas pela aplicação de uma força. Dessa forma, pode ser definida como a relação entre a variação de comprimento de um material (ΔL) e seu comprimento original (L), conforme apresentado na Equação 2.1. Como pode-se observar trata-se de uma grandeza adimensional, porém é comumente expressa em unidades de mm/m ou $\mu\text{m}/\text{m}$.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

A medição da deformação é muito importante para a correta compreensão de como um dado objeto reage a diferentes forças aplicadas. A deformação pode ser positiva ou negativa, e são denominadas de tração e compressão, respectivamente. São classificadas ainda, como deformação axial, de flexão, de cisalhamento e torção. Sendo que as mais usuais são as do tipo axial e de flexão. A primeira é resultado da aplicação de uma força linear na direção horizontal, que causa alongamento ou compressão de um material. Já a deformação por flexão é causada pela aplicação de uma força linear na direção vertical, resultando em uma deformação de um lado do material mediante a contração do lado oposto. Na Figura 4 é representado esses dois fenômenos (NATIONAL INSTRUMENTS).

Figura 4 – Representação das Deformações do Tipo Axial (direita) e de Flexão (esquerda)



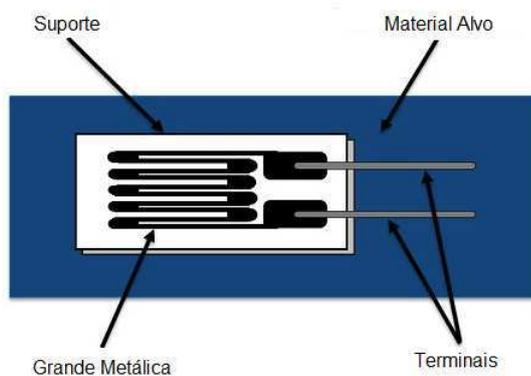
Fonte: National Instruments

A deformação por cisalhamento é ocasionada pela aplicação de uma força linear com componentes vertical e horizontal. E a deformação por torção é resultado da aplicação de uma força circular que apresenta componentes horizontal e vertical.

Para medir deformação que um dado material sofreu usualmente são usados extensômetros de resistência elétrica, também conhecidos como *strain-gauge*. Esses dispositivos variam sua resistência elétrica quando sofrem deformação e são constituídos de uma pequena grade formada por lâminas metálicas que podem ser fixadas à superfície de um componente ou estrutura a ser medida, com uma camada de adesivo que serve para transmitir as deformações da estrutura ao *strain-gauge*.

Os extensômetros são capazes de realizar medições de pequenas deformações na faixa de 0 a $50\mu\text{m}$ com precisão de $\pm 0,15\%$, apresentando normalmente resistência elétrica nominal de $120\ \Omega$, $350\ \Omega$ e $1000\ \Omega$. Na Figura 5 é apresentada uma ilustração da estrutura de um extensômetro.

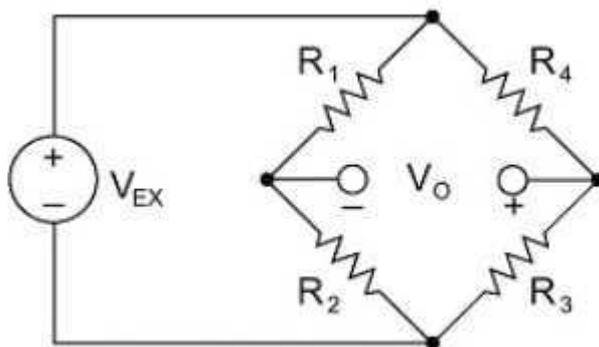
Figura 5 – Representação de um Extensômetro sob o Material que se Deseja Medir Deformação.



Fonte: National Instruments

A resistência elétrica de um extensômetro é medida utilizando um circuito de Ponte de Wheatstone. Uma ponte de Wheatstone genérica, ilustrada na Figura 6, consiste em uma rede formada por quatro braços resistivos e uma tensão de excitação, V_{EX} que é aplicada na entrada na ponte.

Figura 6 – Diagrama do Circuito Ponte de Wheatstone



Fonte: National Instruments

Dessa forma, a deformação ε do dispositivo é proporcional a tensão de saída do circuito V_0 , conforme descrito pela Equação 2.2.

$$V_0 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) * V_{EX} \quad (2.2)$$

Por sua vez, a ponte de Wheatstone é considerada eletronicamente equilibrada, $V_0 = 0$, quando se tem a seguinte relação: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$. Portanto, uma variação em uma das resistências (ΔR) ocasiona alteração no valor da tensão de saída e, conseqüentemente na deformação.

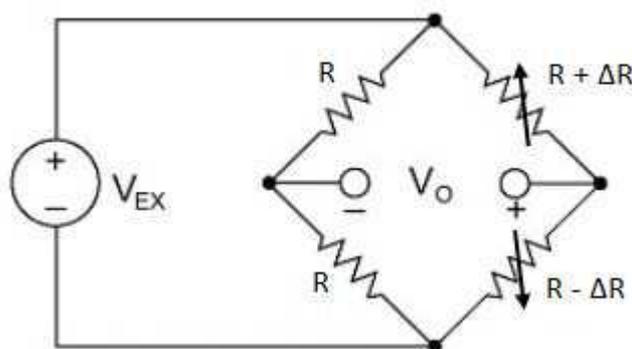
Um parâmetro muito importante na caracterização de um extensômetro é o fator de medida (GF), que se refere a medição da variação relativa de resistência elétrica do dispositivo ao sofrer deformação. Para extensômetros magnéticos esse parâmetro é em torno de 2. O GF pode ser calculado conforme a relação apresentada na Equação 2.3.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon} \quad (2.3)$$

em que: R é a resistência elétrica, ΔR é a variação da resistência, L é o comprimento do extensômetro, ΔL é a variação do comprimento e ε é a deformação.

Dependendo da aplicação, é possível se ter um, dois, três ou quatro elementos da ponte cuja a resistência varia em função da grandeza física mensurada. Para a aplicação apresentada nesse trabalho a variação de resistências ocorre em dois elementos ativos em oposição, que são dois extensômetros. Assim, o circuito da ponte de Wheatstone para essa configuração é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama do Circuito Ponte de Wheatstone com Dois Elementos Ativos Complementares



Fonte: Adaptado National Instruments

A tensão na saída da ponte é dada por:

$$V_0 = \frac{V_{EX}}{2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \quad (2.4)$$

Neste Capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica sobre as ligas de memória de forma e sobre os sensores extensômetros de resistência elétrica. Os conceitos apresentados serão utilizados no desenvolvimento desse trabalho. No Capítulo 3 será apresentada a plataforma experimental utilizada e instrumentação eletrônica desenvolvida.

3 Plataforma Experimental

Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizada uma plataforma experimental desenvolvida por Lima (2008) e otimizada por Pequeno (2012), Campos (2018) e Barroso (2019). A plataforma possui um atuador de fio de LMF fixada na extremidade de uma viga engastada. Na extremidade fixa da viga há dois extensômetros de resistência elétrica fixados um na parte superior e outro na parte inferior, que possibilitam realizar a medição da deformação.

A plataforma é constituída por um sistema mecânico, um sistema eletrônico e uma Interface Humano Máquina (IHM), desenvolvida com o *software* NI LabVIEW 2015 da National Instruments (NI). O funcionamento se dá seguinte forma: ao aplicar uma corrente elétrica no fio de LMF (atuador), é possível aplicar força suficiente na viga para que a mesma consiga variar sua posição. Isso acontece devido ao seu efeito de memória de forma, que faz com que o atuador seja capaz de recuperar sua forma original ao ser aquecido.

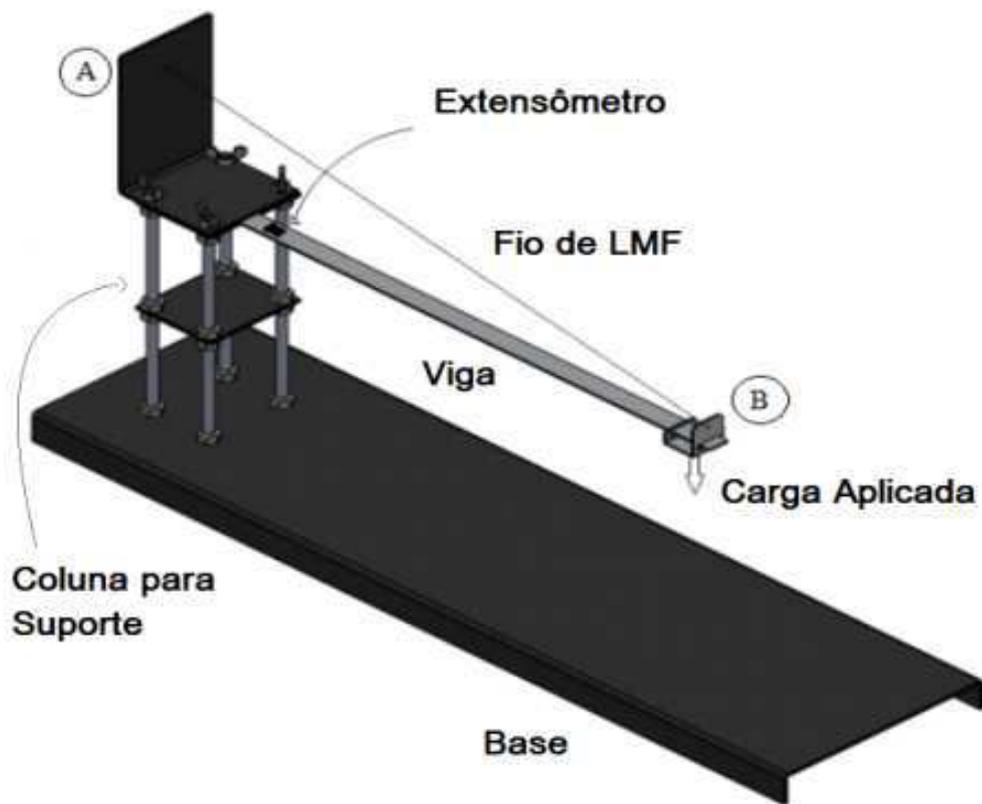
Para o experimento proposto, a plataforma foi utilizada para analisar o comportamento da deformação da viga e da resistência no atuador, mediante a variação de corrente elétrica. Dessa forma, para alcançar o objetivo, foi necessário adaptar os circuitos de condicionamento e acionamento do atuador existentes, bem como projetar novos circuitos de medição e implementar uma nova interface gráfica.

Neste capítulo são apresentados a estrutura mecânica da plataforma e os subsistemas de *hardware* e *software* desenvolvidos.

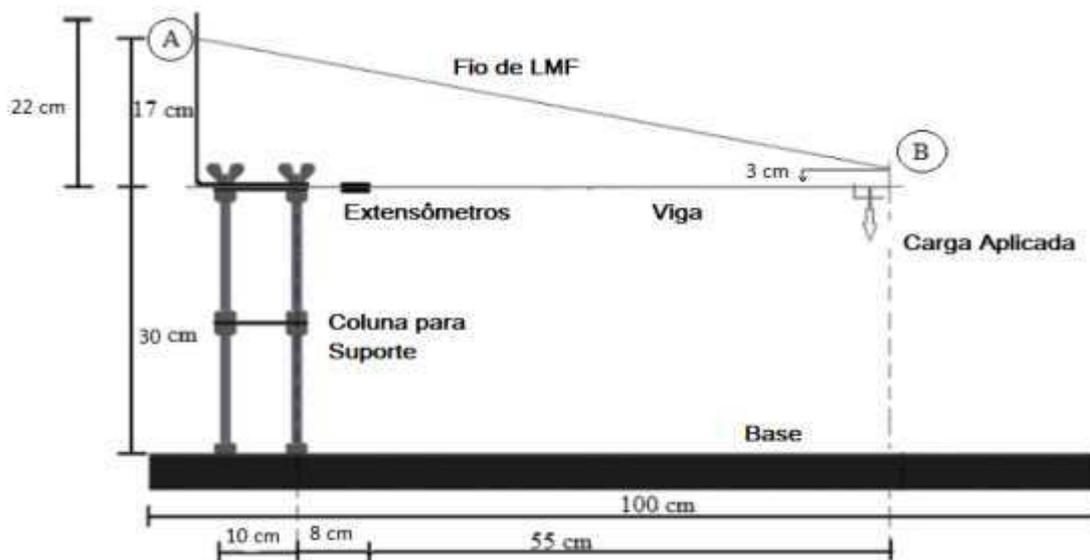
3.1 Sistema Mecânico

Na Figura 8 é possível visualizar as ilustrações da estrutura mecânica da plataforma pelas vistas isométrica e lateral esquerda. O sistema mecânico é composto por uma base Retangular de Ferro, com dimensões de 100 cm x 25,7 cm x 3,5 cm; uma coluna para suporte, com área retangular, formada por 4 parafusos (28 cm de comprimento por 1 cm de diâmetro), duas placas de fixação transversais (10cm x 12cm) e uma placa longitudinal de 22cm de altura; uma viga de aço carbono com dimensões 55cm x 2,6cm x 2mm, apresentando uma extremidade presa e outra livre; um fio de LMF fixado na parte superior da placa longitudinal por meio de um parafuso comum e na extremidade livre da viga por meio da peça para aplicação de força; e um suporte externo para possível aplicação de pesos de controle (carga externa).

Figura 8 – Ilustrações das Vistas da Plataforma Experimental Utilizada



(a) Vista Isométrica



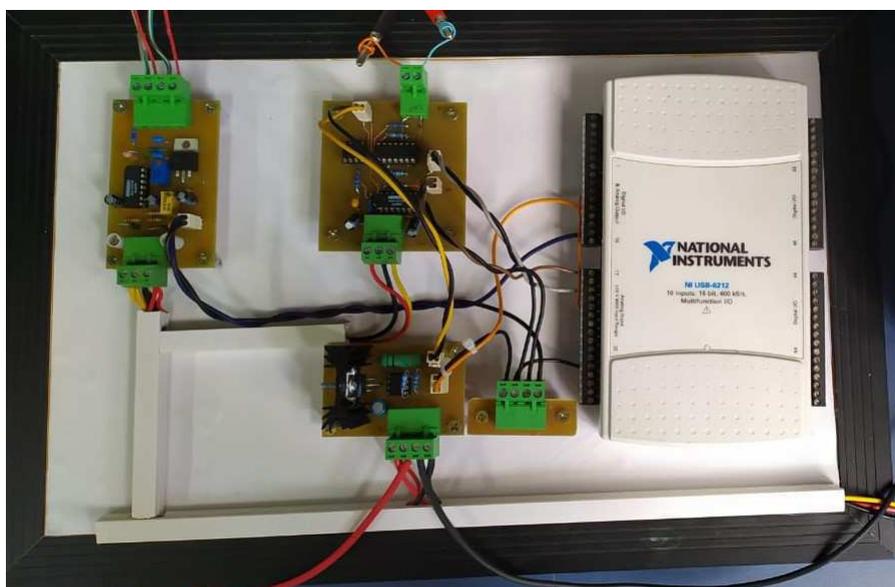
(b) Vista Lateral Esquerda da Plataforma Experimental

Fonte: LIMA, 2008

3.2 Sistema Eletrônico

O sistema eletrônico da plataforma, adaptado e implementado para esse trabalho, é composto por: dois extensômetros de resistência elétrica posicionados na extremidade fixa da viga, um na parte superior e outro na parte inferior; um atuador de LMF; sistema de aquisição de dados NI DAQ USB-6212 da National Instruments; circuitos de Ponte de Wheatstone, condicionamento de sinal e ajuste de ganho; *Driver* de corrente para acionamento do atuador de LMF e circuito para medição da tensão no atuador. O sistema eletrônico é apresentado na Figura 9 e cada subsistema é descrito a seguir.

Figura 9 – Fotografia do Sistema Eletrônico



Fonte: Autoria Própria

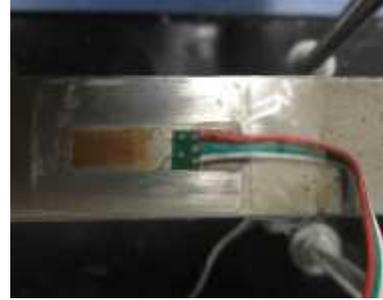
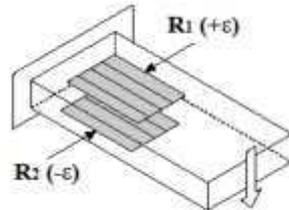
3.2.1 Extensômetros

Na extremidade fixa da viga da plataforma foram fixados dois extensômetros, sendo um localizado na parte superior e outro na parte inferior, sendo assim possível medir a deformação de flexão nesse ponto. Para se ter uma correta medição é necessário que os dois extensômetros estejam fixados a mesma distância da coluna de suporte da plataforma e posicionados sob o mesmo eixo. Quando um dos extensômetros é tensionado, o outro é comprimido seguindo a mesma proporção, de forma que a variação das resistências dos dois sensores apresentam o mesmo módulo, com sinais diferentes. Na Figura 11(a) é ilustrado esse esquema de deformação utilizado para medir a deformação na viga.

Os extensômetros utilizados são do modelo PA-06-125-BA-350-LEN da Excel Sensores, do tipo colável e recomendado para superfícies de aço, possui resistência unidirecional simples

com forma tradicional de 350Ω e fator de medida de 2,1 (ver Figura 11(b)).

Figura 10 – Representação dos Extensômetros de Resistência Elétrica Utilizados



(a) Esquema de Medição de Deformação Utilizando dois Extensômetros (b) Fotografia do Extensômetro Fixado na Viga

Fonte: National Instruments

Como a medição da deformação envolve a variação de resistência de dois elementos em oposição, fez-se uso de um circuito de meia ponte, conforme apresentado na Figura 7 e a tensão de saída dado pela Equação 2.4.

Isolando $\frac{\Delta R}{R}$, que se refere a variação relativa da resistência do extensômetro, nas Equações 2.3 e 2.4 e igualando ambos os resultados, é possível encontrar uma equação para a deformação, que é descrita por:

$$\varepsilon = \frac{2.V_0}{V_{EX}.GF} \quad (3.1)$$

A variação das resistência dos extensômetros é praticamente desprezível, inferior a 1%. Logo, como a tensão de saída da ponte é diretamente proporcional a essa variação, também será muito pequena. Faz-se assim necessário aplicar um ganho alto para amplificar o valor da tensão de saída e possibilitar assim que o conversor analógico digital (AD) da placa DAQ consiga realizar a aquisição desse sinal. O ganho aplicado foi de 931. Portanto, tem-se que a tensão adquirada pela placa de aquisição será:

$$V_{adquirida} = G.V_0 \Rightarrow V_0 = \frac{V_{adquirida}}{G} \quad (3.2)$$

Dessa forma, reescrevendo a Equação 3.1 considerando a nova expressão para V_0 , obtém-se que:

$$\varepsilon = \frac{2.V_{adquirida}}{V_{EX}.GF.G} \quad (3.3)$$

3.2.2 Atuador Fio de LMF

O fio de LMF utilizado como atuador é uma liga de NiTiNOL do tipo FLEXINOL TCF1140, fabricado pela Daynalloy, Inc. Possui o efeito de memória de forma do tipo *two-way* e foi treinado termicamente por Campos (2018). Esse fio apresenta um diâmetro pequeno, são fáceis de utilizar e é muito utilizado nas mais diversas aplicações. De acordo com o manual do fabricante possui as características elencadas na Tabela 1.

Parâmetro	Valor
Diâmetro	0,2mm
Densidade	6,450kg/m ³
Calor Específico	837J/kg.K
Condutividade Térmica	1.800W/(m.K)
Resistência	29Ω/m
Tempo de Resfriamento	entre 2,7s e 3,2s

Tabela 1 – Características do Atuador de Fio de LMF

3.2.3 Sistema de Aquisição de Dados

Para realizar a aquisição dos dados dos circuitos de condicionamento foi utilizado o dispositivo multifuncional NI DAQ USB-6212 da *National Instruments*, conforme ilustrado na Figura 11. O NI DAQ USB-6212 possui 32 entradas e saídas digitais, 2 saídas analógicas com 250 mil amostras por segundo e 16 entradas analógicas com 16 bits e 400 mil amostras por segundo. A tensão de entrada é ajustável para as faixas de ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V e ± 10 V. Esse dispositivo é muito aplicado em testes, processos de controle, monitoramento em campo, aquisição de dados e aplicações em ensino e pesquisa (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

Figura 11 – Imagem da Placa de Aquisição de Dados NI DAQ USB-6212.

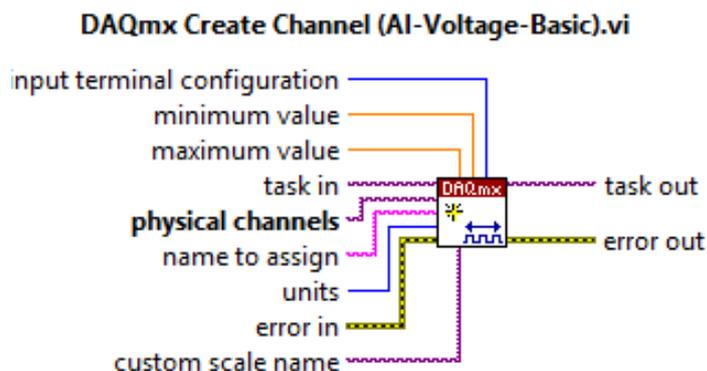


Fonte: National Instruments.

O NI DAQ USB-6212 é um dispositivo leve e portátil, com alimentação pela USB que permite fácil configuração e integração com ambiente LabVIEW. Portanto, foi utilizado no sistema para obter as leituras analógicas e enviá-las para o *software* LabVIEW, no qual serão processadas. É também responsável por enviar os comandos de acionamento e desligamentos do atuador. Essa comunicação foi feita utilizando os blocos DAQmx de entrada e saída de sinais analógicos.

Para criar os canais virtuais foi utilizado o bloco *DAQmx Create Channel*, apresentado na Figura 12. Esse bloco cria um ou um conjunto de canais virtuais e os associa a uma tarefa. Para esse trabalho, o bloco foi utilizado para criar canais de medição de tensão.

Figura 12 – Representação do Bloco do LABVIEW Utilizado para Configuração dos Canais

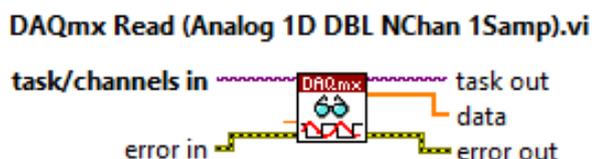


Fonte: NI LabVIEW 2015 da National Instruments

Para realizar a leitura dos canais de entrada analógica foi utilizado o bloco *DAQmx Read*, apresentado na Figura 13. Esse bloco lê as amostras dos canais virtuais especificados e é possí-

vel configurar o formato das amostras a ser retornado. Para esse trabalho o bloco foi configurado para ler uma amostra de ponto flutuante de cada canal em uma tarefa que contém quatro canais de entrada analógica.

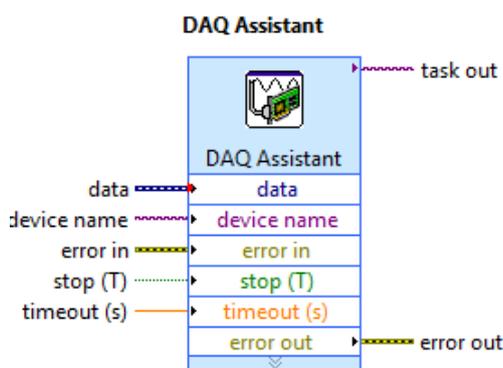
Figura 13 – Representação do Bloco do LABVIEW Utilizado para Leitura dos Canais



Fonte: NI LabVIEW 2015 da National Instruments

Para enviar um sinal para uma saída analógica foi utilizado o bloco *DAQ Assistant*, apresentado na Figura 14, utilizando o modo de geração de sinal.

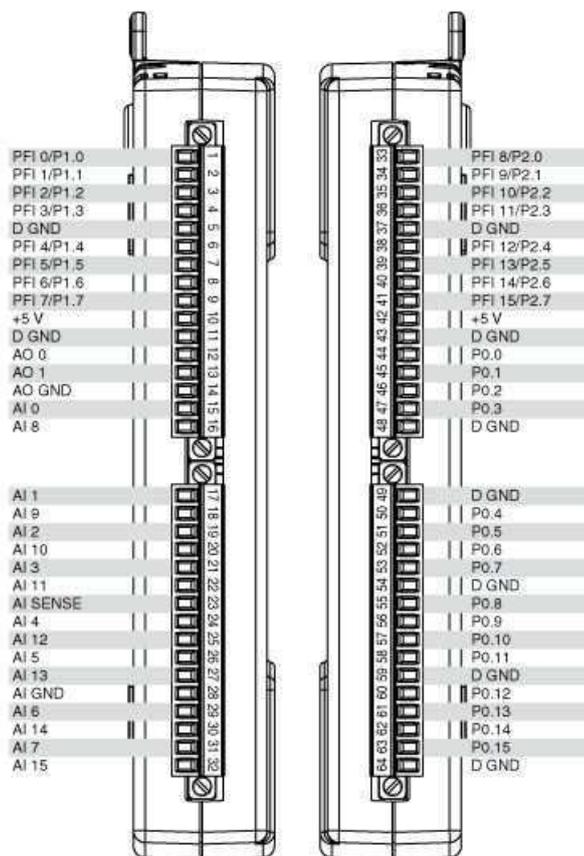
Figura 14 – Representação do Bloco do LABVIEW Utilizado para Enviar um Sinal no Canal



Fonte: NI LabVIEW 2015 da National Instruments

Para implementar esse trabalho foram utilizados sete canais da NI DAQ USB-6212, sendo cinco entradas analógicas, uma saída analógica e o sinal de 5 V fornecido pela placa. Na Figura 12 é apresentado o esquema da pinagem do dispositivo e na Tabela 2 são descritos os canais utilizados e suas respectivas funções no sistema.

Figura 15 – Representação da Pinagem do Dispositivo NI USB-6212



Fonte: National Instruments.

Canais	Pinos	Função
Entrada analógica 0	Pino 15	Recebe o sinal de tensão elevado pelo circuito de ajuste de ganho
Entrada Analógica 1	Pino 17	Recebe sinal de tensão do <i>driver</i> de corrente
Entrada Analógica 2	Pino 19	Recebe sinal de tensão do circuito de medição diferencial
Entrada Analógica 3	Pino 21	Recebe sinal de tensão de 5V
Saída Analógica 0	Pino 12	Fornece o sinal DC para o acionamento do <i>driver</i> de corrente
5V	Pino 10	Fornece tensão de 5V para a entrada analógica 3
Entrada Analógica GND	Pino 28	Ponto de referência para o terra

Tabela 2 – Canais da NI DAQ USB-6212 Utilizados no Sistema

3.2.4 Circuitos de Condicionamento e de Ajuste de Ganho

Para aplicar o ganho no sinal de saída da ponte de Wheatstone, Campos (2018) desenvolveu um circuito que adiciona um ganho elevado no sinal de saída antes da sua aquisição. Para esse trabalho, utilizou-se da mesma configuração, realizando apenas alguns ajustes no ganho.

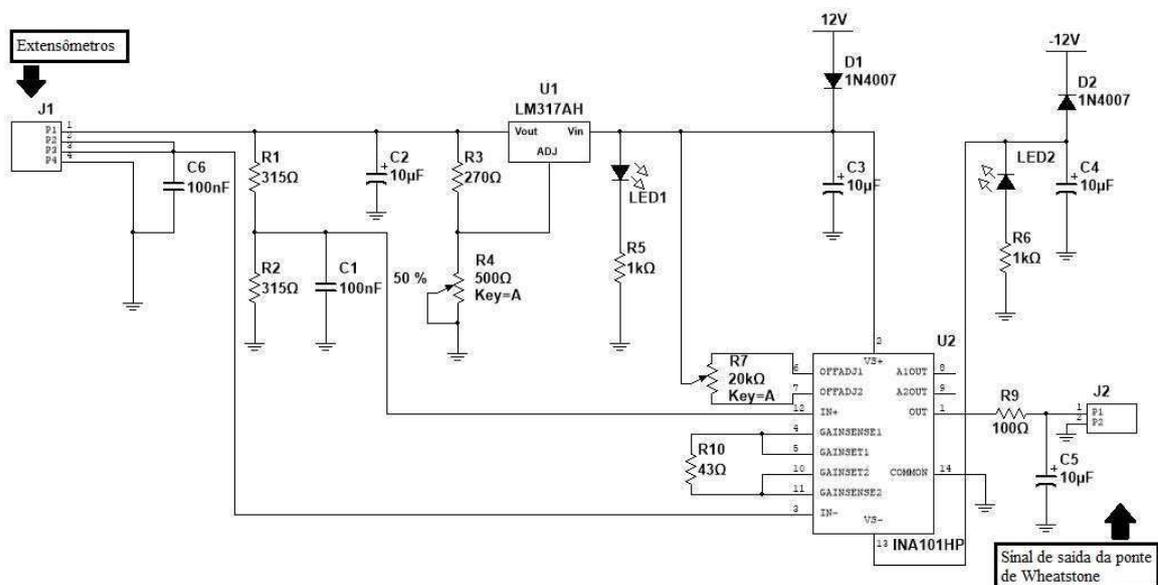
Um dos principais problemas na aplicação de ganhos altos, maiores que 100 V/V, é a amplificação de ruído na medição. Uma alternativa para reduzir esse problema e evitar o aparecimento de *offsets* elevados, é utilizar um amplificador de instrumentação, que é capaz de aplicar ganhos elevados em esquemas de amplificação diferencial com alta rejeição de modo comum e *offset* ajustável [CAMPOS, 2018].

O circuito de condicionamento e ajuste de ganho desenvolvido para elevar o sinal de tensão correspondente a deformação dos extensômetros de maneira adequada é apresentado na Figura 16. Esse circuito é alimentado com 12 V por uma fonte DC, e a amplificação foi feita utilizando um amplificador de instrumentação INA101HP. O INA101HP é ajustado por um resistor (R_G) e é capaz de aplicar ganhos de até 1000 V/V. A expressão para o ganho é dado pela Equação 3.4.

$$G = 1 + \frac{40000}{R_G} \quad (3.4)$$

O amplificador U2 é responsável pela amplificação e possui um ganho fixado em $G = 931V/V$. Substituindo esse ganho na Equação 3.4 obtém-se que $R_G = R10 = 43\Omega$. O ajuste de *offset* é feito manualmente por meio do potenciômetro R7.

Figura 16 – Diagrama do Circuito de Condicionamento do Sinal de Saída da Ponte de Wheatstone.



Fonte: Autoria Própria

do DAQ é ± 200 mv se fez necessário adicionar um ganho no valor da medição antes de enviá-lo a uma entrada analógica do placa. Para isso, foi utilizado um amplificador de instrumentação INA101HP, obtendo-se um ganho de 21 V/V, com o $R_G = R_5 = 2000\Omega$.

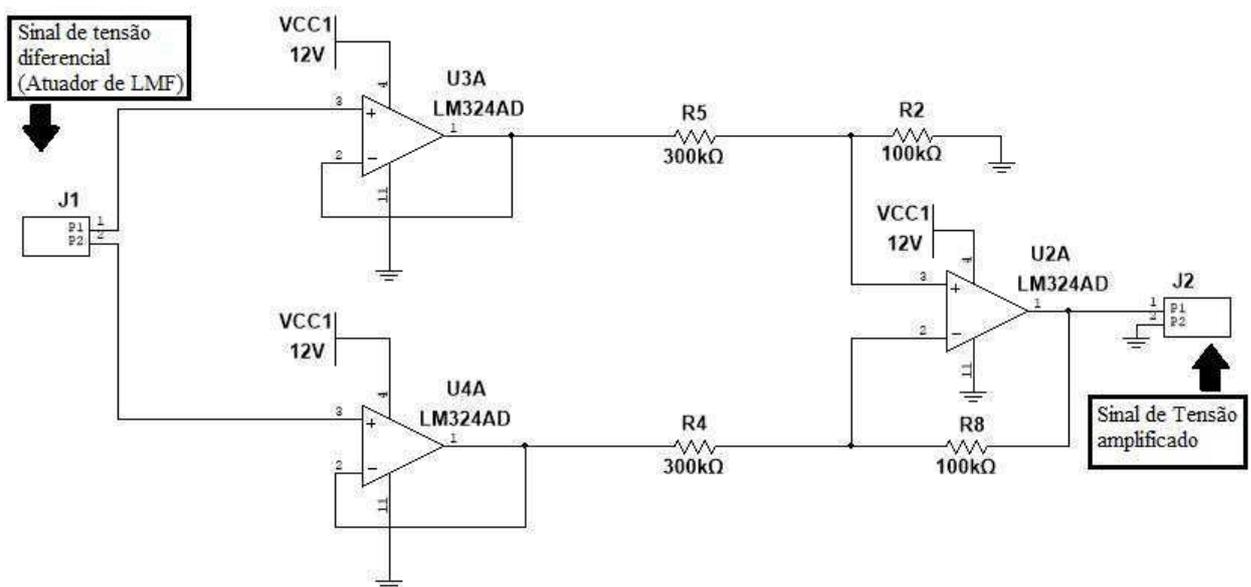
Por fim, o valor amplificado é colocado na entrada de um *buffer* para evitar quaisquer problemas com alta impedância da fonte de alimentação. A saída do *buffer* é colocado em uma entrada analógica do DAQ e lida pelo *software* LabVIEW, correspondendo a medição de corrente sob o atuador de LMF.

3.2.6 Circuito de Medição da Tensão no Atuador de LMF

Para realizar a medição da tensão no atuador de LMF (V_{LMF}) foi implementado o circuito de medição diferencial apresentado na Figura 18. O circuito é composto por dois estágios, o primeiro corresponde ao pré-amplificador com ganho unitário, constituído por dois seguidores de tensão que isolam os sinais de tensão de entrada, aumentando assim a impedância de entrada do circuito. O segundo estágio, é composto por um amplificador diferencial que foi projetado para ter um ganho A igual $1/3$, uma vez que:

$$A = -\frac{R_2}{R_5} \Rightarrow A = -\frac{1000}{3000} \Rightarrow A = \frac{1}{3} \quad (3.5)$$

Figura 18 – Diagrama do Circuito de Medição da Tensão no Atuador de LMF



Fonte: Autoria Própria

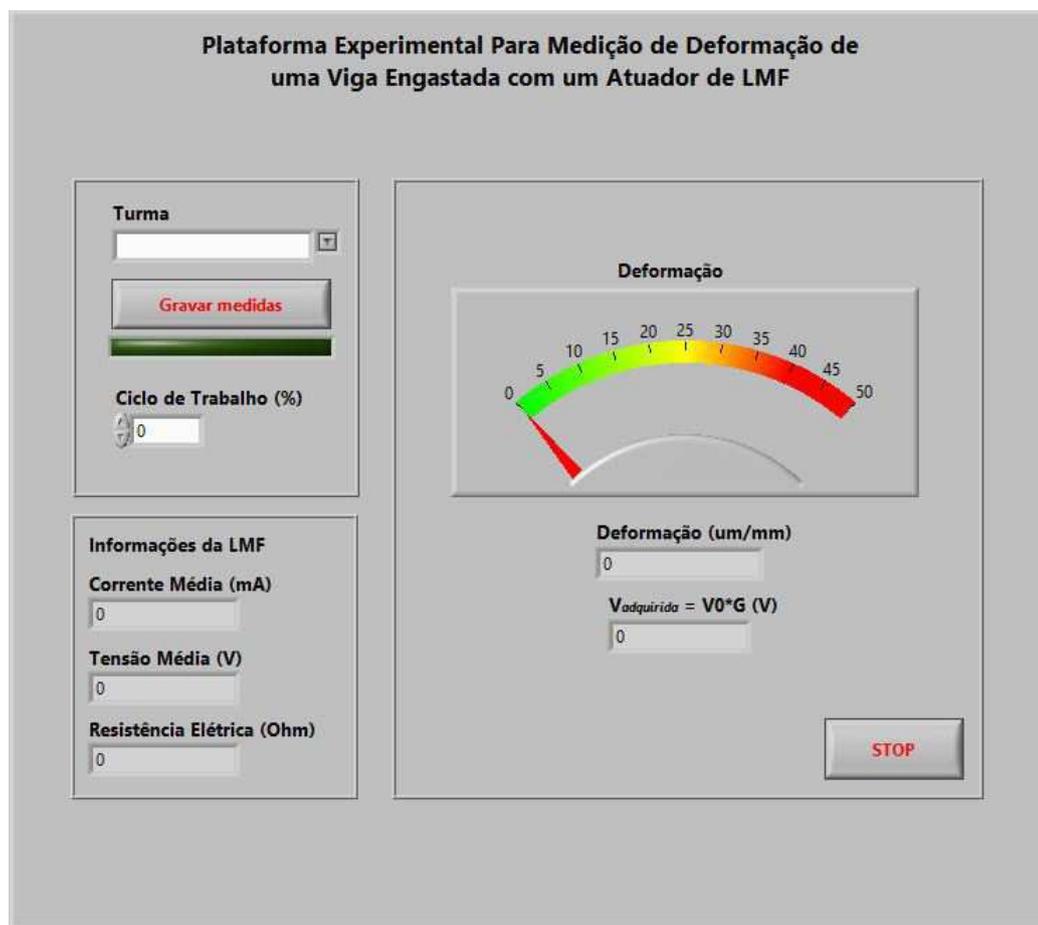
Dessa forma, o circuito implementado amplifica a tensão de entrada diferencial, recebido por meio do conector J1, para obter a tensão de saída desejada. O sinal da saída é colocado em uma entrada analógica do DAQ e lida pelo *software* LABVIEW, que multiplica o valor recebido por três para obter a medição de tensão no atuador.

3.3 Interface Humano-Máquina

O uso de Interface Humano-Máquina (IHM) é cada vez mais comum nos processos de automação. Na instrumentação eletrônica não é diferente, é muito utilizado o conceito de Instrumentação Virtual (*Virtual Instrument - VI*), que possibilita a simulação de instrumentos de medição reais por meio de programação gráfica. Uma das plataformas de programação gráfica mais utilizadas nessa área é o LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), um *software* de engenharia de sistemas desenvolvido pela National Instruments (NI) para aplicações que requerem testes, medições e controle com rápido acesso ao *hardware* e *insight* de dados. O LabVIEW utiliza uma linguagem de programação gráfica e é baseada em fluxo de dados. Permite realizar a aquisição dos dados, o processamento das informações e a interface com o usuário (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

Nesse contexto, foi desenvolvido uma interface Humano-Máquina (IHM) utilizando o *software* LabVIEW, que permite o(a) aluno(a) interagir com o sistema da plataforma e visualizar numérica e graficamente as saídas do processo. Na Figura 19 é possível visualizar ao painel frontal da VI implementada no LabVIEW.

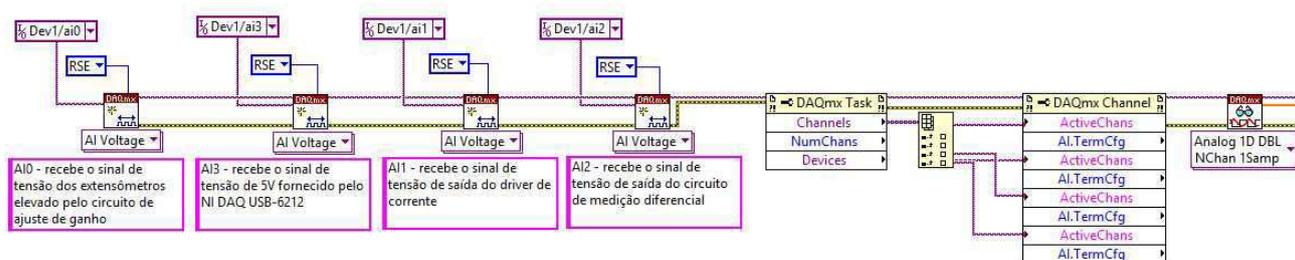
Figura 19 – Representação do Painel de Frontal da VI Implementada



Fonte: Autoria Própria

O programa desenvolvido realiza a aquisição das leituras analógicas correspondentes a corrente e tensão no atuador de LMF, e tensão adquirida para o cálculo da deformação da viga. Esses valores são tratados matematicamente para serem exibidos na interface gráfica ao usuário. Na Figura 20 é ilustrado o processo de aquisição das leituras dos canais analógicos no LabVIEW. Os canais virtuais correspondente a cada aquisição são criados utilizando o bloco *DAQmx Create Channel* e lidos pelo bloco *DAQmx Read*.

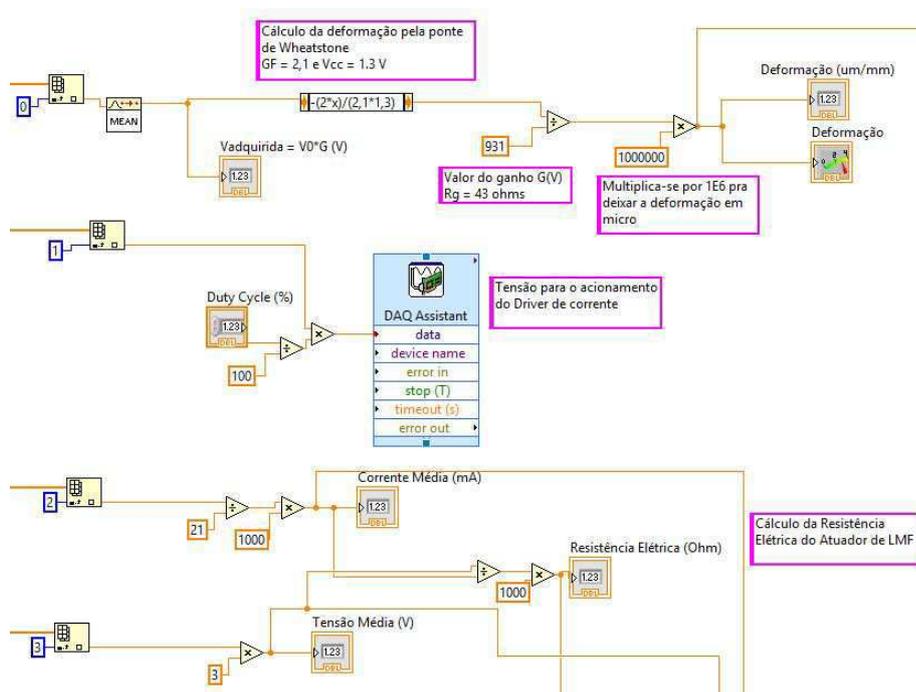
Figura 20 – Representação do Código Implementado para Aquisição dos Dados pelo LabVIEW



Fonte: Autoria Própria

Com a aquisição do valor da tensão na saída do circuito de ajuste de ganho é realizado o cálculo da deformação utilizando a equação 2.3. Com os valores da tensão e corrente no atuador é calculado o valor da resistência elétrica correspondente. De acordo com a porcentagem de tensão DC informada pelo usuário, é enviado para uma saída analógica do DAQ, por meio do bloco *DAQ Assistant* o sinal de acionamento da LMF para o circuito do *Driver* de corrente. Todos esses procedimentos são ilustrados na Figura 21.

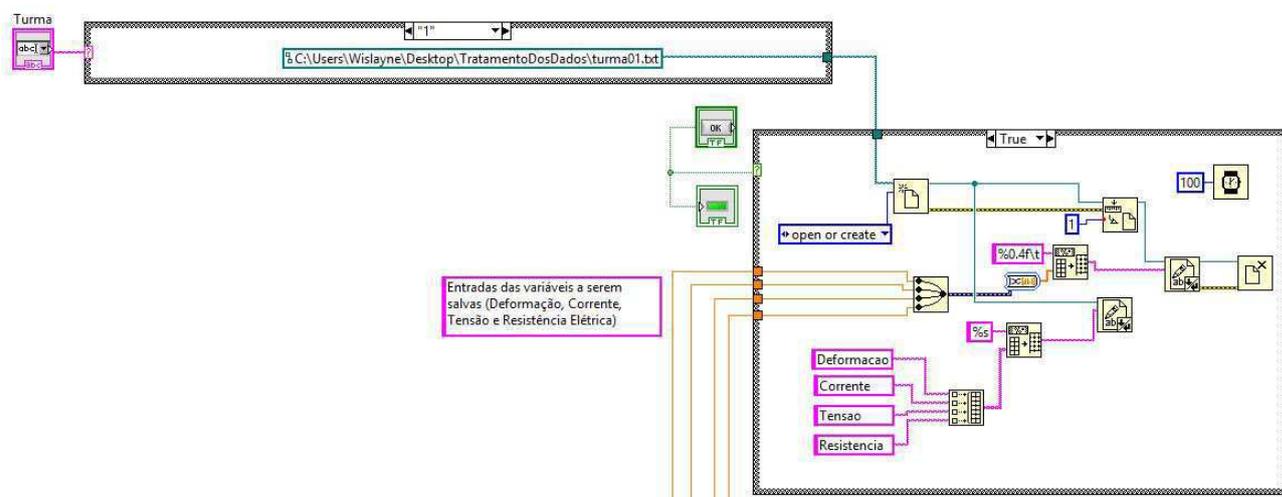
Figura 21 – Representação do Código Implementado para o Tratamento Matemático dos Dados Adquiridos



Fonte: Autoria Própria

A interface gráfica permite ainda que o estudante faça a seleção da sua turma e grave as medidas em um arquivo txt para posteriormente realizar as análises solicitadas. O processo de salvamento no arquivo é apresentado na Figura 22 e o código completo se encontra no Apêndice A.

Figura 22 – Representação do Código Implementado para o Salvamento das Variáveis de Interesse



Fonte: Autoria Própria

Neste Capítulo foi apresentada a plataforma experimental utilizada, com seus componentes mecânicos e eletrônicos, detalhando os principais elementos da sua instrumentação eletrônica, como sensores, circuitos, placa de aquisição de dados, *drivers* de acionamento, atuador e IHM. No Capítulo seguinte será apresentada a proposta de experimento para ser replicada na disciplina de Instrumentação Eletrônica.

4 Roteiro Experimental

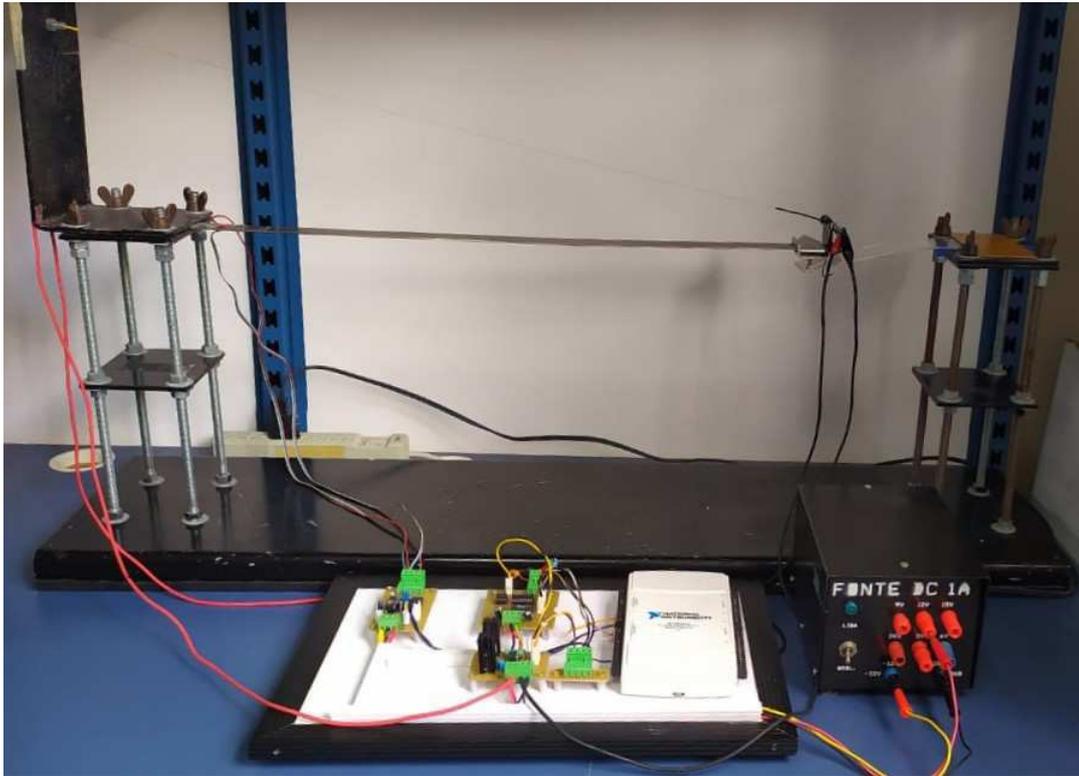
Nos cursos de Engenharia, a realização de experimentos em laboratórios é uma importante ferramenta para a aprendizagem do estudante. Especificamente, para formação de um (a) Engenheiro (a) Eletricista é essencial se ter a correta compreensão de como os sistemas de medição interagem com o meio e fornecem informações, que podem ser tratadas e aplicadas na resolução dos mais variados problemas, principalmente quando se considera as inúmeras aplicações dos sensores na atualidade.

Para suprir essa demanda de conhecimento, a disciplina de Laboratório de Instrumentação Eletrônica ofertada pelo curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, aborda conteúdos de grande importância para a formação do futuro profissional da Engenharia Elétrica, uma vez que introduz as técnicas básicas e os principais métodos para realizar medições utilizando sensores ou transdutores. Para melhor aproveitamento, a disciplina conta com atividades em laboratório, onde os alunos realizam experimentos práticos utilizando plataformas experimentais e sistemas de aquisição de dados. Com isso, o aluno se torna apto a analisar e dimensionar diversos tipos de circuitos de condicionamento, além de ter conhecimento sobre o funcionamento de diversos tipos sensores.

Nesse contexto, com o objetivo de possibilitar um estudo acerca da medição de deformação utilizando sensores *strain gauge* e do comportamento elétrico de um atuador de Liga de Memória de Forma, é proposto um experimento para ser aplicado a disciplina de Instrumentação Eletrônica.

O experimento consiste em medir por meio do *strain Gauge*, a deformação em uma viga de alumínio, causada pela aplicação de corrente elétrica em um atuador de LMF. Com a realização do experimento o aluno poderá levantar a curva Deformação *versus* Corrente Elétrica. Para isso, será utilizada a plataforma experimental apresentada no capítulo anterior. Na Figura 23 tem-se uma fotografia do sistema completo, incluindo sistema mecânico e eletrônico.

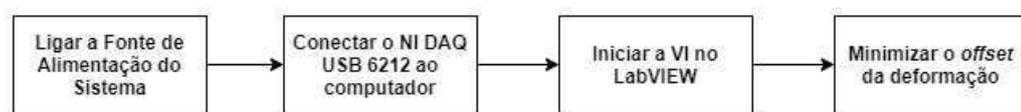
Figura 23 – Fotografia da Plataforma Experimental



Fonte: Autoria Própria

É necessário realizar alguns procedimentos iniciais para preparar o *setup* do ensaio. Esses procedimentos são apresentados no diagrama em blocos da Figura 24.

Figura 24 – Diagrama em Blocos dos Procedimentos Iniciais



Fonte: Autoria Própria

Conforme descrito no fluxograma, inicialmente o aluno deverá ligar a fonte que alimenta os circuitos da plataforma e conferir se a viga está apoiada no suporte. Em seguida, deve-se conectar o cabo USB da placa de aquisição de dados no computador e verificar a conexão por meio do *software NI Device Monitor*. Com isso, utiliza-se o *software LabVIEW* para abrir a VI disponibilizada no computador pessoal que acompanha a plataforma. Por fim, o aluno deverá iniciar a VI e ajustar manualmente o *offset* da deformação no circuito de condicionamento, de modo que a medição da deformação visualizada na interface gráfica fique o mais próximo de zero possível.

O experimento consiste em variar de 5% a 100% o valor do ciclo de trabalho do sinal de acionamento do atuador, que consiste na porcentagem do sinal de tensão DC que é aplicado

na entrada do *driver* de corrente. Os valores de deformação, corrente, tensão e resistência correspondentes a cada medição devem ser anotados ou salvos em um arquivo de texto utilizando o botão "Gravar Medidas" presente da interface do usuário. Todavia, é necessário que antes de gravar os dados, o estudante selecione a sua turma.

Quando atingir o último valor, o experimento deverá ser finalizado. Com os dados coletados o aluno poderá traçar a curva de comportamento e elaborar um relatório. No Capítulo 6 serão apresentados os resultados alcançados com a realização do experimento aqui proposto e no Apêndice B é apresentado uma proposta de guia experimental para ser aplicado a disciplina.

5 Resultados e Discussões

Para exemplificar as análises que podem ser realizadas com o experimento proposto, na Tabela 3 são apresentados dados reais de medições utilizando o sistema desenvolvido. Nessa tabela encontra-se os valores armazenados no arquivo txt para as vinte medições realizadas durante o ensaio, os valores correspondem as medições de deformação da viga, corrente e tensão medidas na LMF e a resistência calculada da LFM.

Ciclo de Trabalho (%)	Deformação ($\mu m/m$)	Corrente (mA)	Tensão (V)	Resistência (Ω)
5	0,4064	23,0087	0,5689	24,7254
10	0,4099	42,7998	1,0631	24,8389
15	0,4264	62,5595	1,5586	24,9139
20	0,4488	82,3349	2,0558	24,9688
25	0,4653	102,1104	2,5584	25,0552
30	0,5194	121,9485	3,0586	25,0811
35	0,5548	141,6613	3,5643	25,1607
40	0,5830	161,4368	4,0686	25,2024
45	0,6125	181,2437	4,5791	25,2649
50	0,6831	201,0035	5,0735	25,2409
55	0,7149	220,8104	5,5814	25,2769
60	0,7561	240,6330	6,0715	25,2314
65	0,7773	260,4086	6,4891	24,9189
70	0,8021	280,2312	6,8421	24,4159
75	0,8480	299,9912	7,1618	23,8734
80	0,9834	319,7513	7,5629	23,6524
85	1,8831	339,5270	7,9162	23,3154
90	3,0784	359,2714	8,3166	23,1485
95	5,1204	379,0629	8,7003	22,9521
100	7,7866	398,9639	9,1261	22,8745

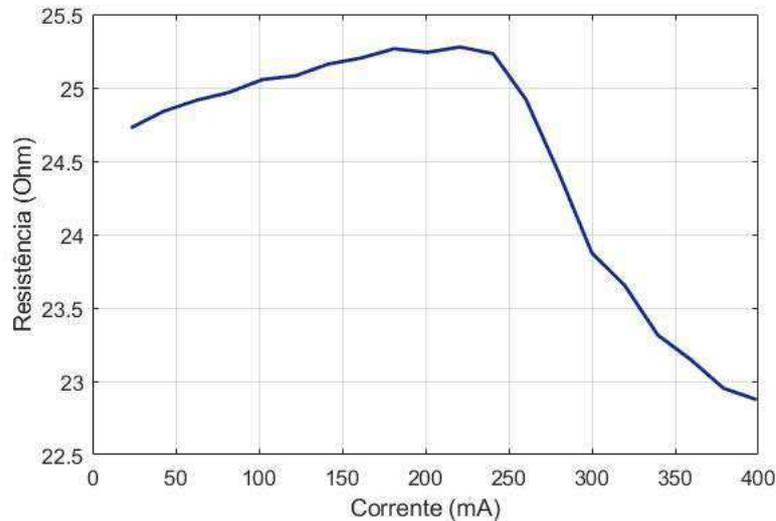
Tabela 3 – Dados Experimentais

De acordo com o trabalho de Cavalcanti (2011), a resistência elétrica de uma amostra de LMF aumenta à medida que a corrente aumenta, até atingir o valor de corrente a qual a transformação de fase é iniciada. A partir desse valor a resistência começa a diminuir.

Diante disso, analisando a última coluna da Tabela 3 observa-se que o valor da resistência da LMF sofreu variação ao longo do ensaio, obtendo-se uma variação de aproximadamente $1,85 \Omega$. A variação da resistência apresenta relação direta com a corrente que é aplicada na liga, de forma que podemos notar um aumento da resistência à medida que a corrente aumenta, até um valor de corrente de 240,63 mA. A partir desse valor a resistência começa a diminuir com o aumento da corrente. Dessa forma, percebe-se a transformação de fases é iniciada quando a

corrente aplicada na liga é superior a 240 mA. Utilizando o *software* MATLAB construiu-se o gráfico Resistência *versus* Corrente (Figura), que descreve esse comportamento.

Figura 25 – Representação do Comportamento Resistência *versus* Corrente



Fonte: Autoria Própria

Para a aplicação do experimento na disciplina de Laboratório de Instrumentação Eletrônica, o(a) estudante poderá ainda determinar um modelo matemático aproximado que melhor descreve esse comportamento. Para os resultados apresentados, a melhor aproximação encontrada para a curva Resistência *versus* Deformação foi um polinômio de décimo grau, conforme descrito pela Equação 5.1, na qual $f(x)$ corresponde a Resistência e x corresponde a Corrente.

$$f(x) = p1 * x^{10} + p2 * x^9 + p3 * x^8 + p4 * x^7 + p5 * x^6 + p6 * x^5 + p7 * x^4 + p8 * x^3 + p9 * x^2 + p10 * x + p11 \quad (5.1)$$

Em que,

$$p1 = 2,1572 * 10^{-22};$$

$$p2 = -4,0457 * 10^{-19};$$

$$p3 = 3,1871 * 10^{-16};$$

$$p4 = -1,3718 * 10^{-13};$$

$$p5 = 3,5183 * 10^{-11};$$

$$p6 = -5,5046 * 10^{-9};$$

$$p7 = 5,1505 * 10^{-7};$$

$$p8 = -2,6684 * 10^{-5};$$

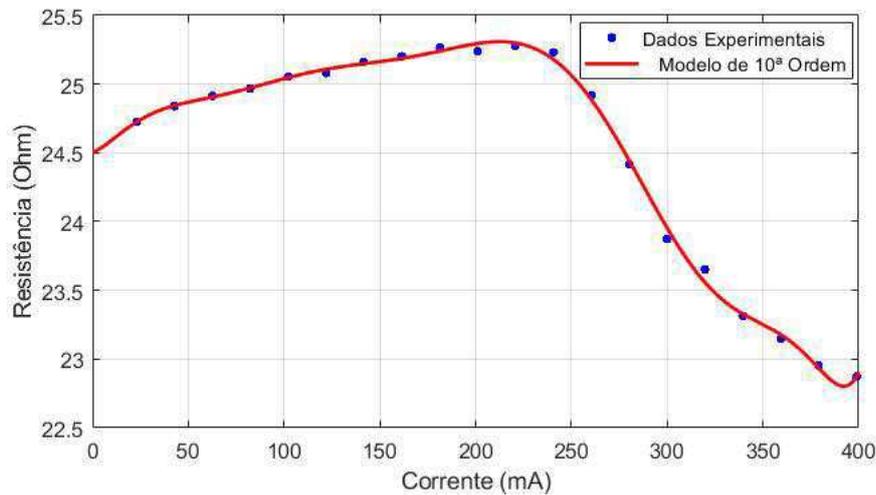
$$p9 = 0,00059919;$$

$$p10 = 0,004991;$$

$$p11 = 24,504;$$

Com essas informações traçou-se o gráfico da aproximação polinomial, apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Representação do Comportamento Resistência versus Corrente - Modelo Aproximado

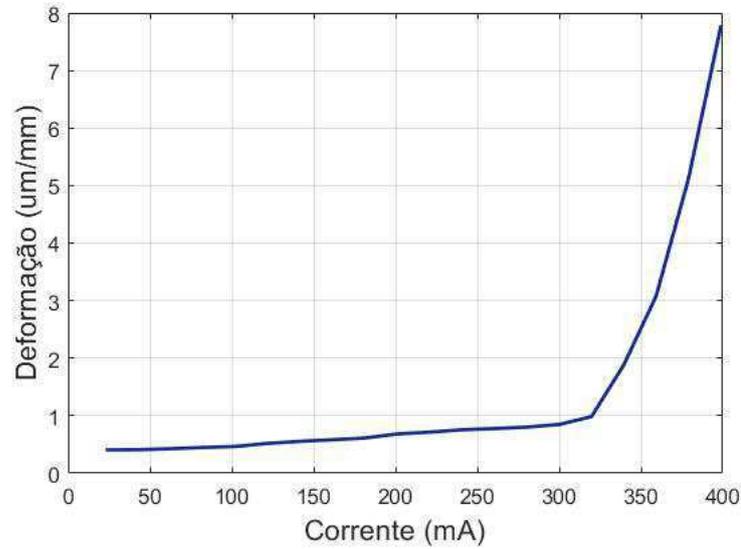


Fonte: Autoria Própria

A análise do comportamento da resistência elétrica de uma amostra de liga de memória de forma é muito importante quando se deseja utilizá-la como atuador. O comportamento encontrado pode ser levado em consideração para estudar os critérios de atuação antes da implementação do atuador, tendo em vista que é possível determinar sua melhor região de atuação, analisando quais as correntes que proporcionam a transformação de fase. Assim, pode-se escolher qual o tipo de LMF melhor atende as necessidades da aplicação desejada.

Ao que se refere ao comportamento da medição da deformação na viga, observa-se que quando pequenas correntes são aplicadas no atuador de LMF, não é aplicada força suficiente na viga para que a mesma sofra variação da sua posição, uma vez que o atuador ainda não começou a contrair. Por consequência, a medição dos extensômetros nesse intervalo não apresenta variações muito significativas. Entretanto, para valores de corrente mais altos, acima de 300 mA, a liga começa a contrair e consequentemente possui força suficiente para levantar a viga da sua posição inicial. Dessa forma, a medição da deformação começa a aumentar de acordo com a corrente que é aplicada. Na figura 27 é descrito esse comportamento, a partir do gráfico de Deformação da viga *versus* Corrente na LMF.

Figura 27 – Representação do Comportamento Deformação versus Corrente



Fonte: Autoria Própria

A melhor aproximação do comportamento Deformação *versus* Corrente foi um polinômio de nona ordem, que é descrito na Equação 5.2

$$f(x) = p1 * x^9 + p2 * x^8 + p3 * x^7 + p4 * x^6 + p5 * x^5 + p6 * x^4 + p7 * x^3 + p8 * x^2 + p9 * x + p10 \quad (5.2)$$

Em que,

$$p1 = 6,1361 * 10^{-21};$$

$$p2 = -1,4801 * 10^{-17};$$

$$p3 = 1,4118 * 10^{-14};$$

$$p4 = -7,04 * 10^{-12};$$

$$p5 = 2,0258 * 10^{-09};$$

$$p6 = -3,4738 * 10^{-07};$$

$$p7 = 3,5114 * 10^{-05};$$

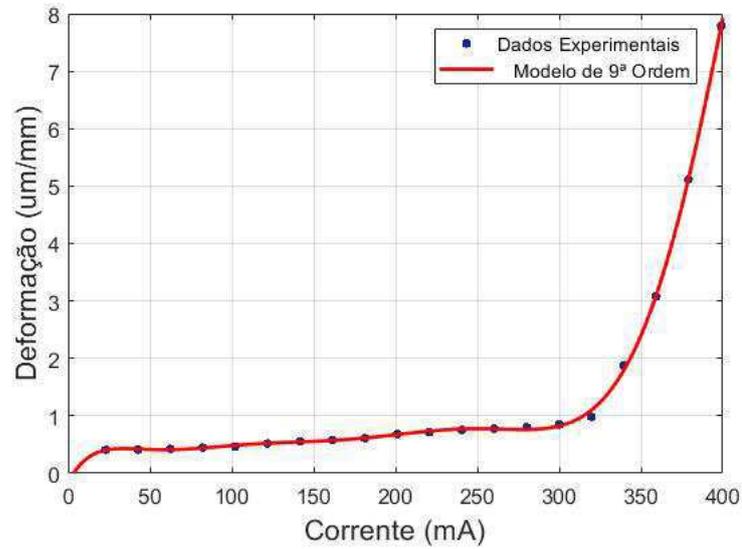
$$p8 = -0,0019751;$$

$$p9 = 0,055351;$$

$$p10 = -0,1668.$$

Com essas informações traçou-se o gráfico da aproximação polinomial, apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Representação do Comportamento Deformação versus Corrente - Modelo Aproximado



Fonte: Autoria Própria

Neste Capítulo foram apresentados a análise dos resultados alcançados com a realização do experimento proposto. A partir disso, serão apresentadas no Capítulo 6 as considerações finais deste trabalho.

6 Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentada a plataforma experimental para obtenção de resistência elétrica de um atuador de Liga de Memória de Forma desenvolvida. Para isso, optou-se por uma descrição dos conceitos e características do atuador em estudo e do sensor utilizado para a medição da deformação da viga, bem como um detalhamento sequencial das principais ferramentas e procedimentos realizados para a implementação e utilização da estrutura experimental proposta. Dessa forma, foram explicados os componentes que compõem o sistema mecânico, o sistema eletrônico e a interface gráfica do usuário. Em seguida, foi apresentada a proposta de experimento para ser aplicado na disciplina de Laboratório de Instrumentação Eletrônica.

Com a análise dos resultados obtidos experimentalmente, conclui-se que a plataforma satisfaz os requisitos que se pretendia atingir, possibilitando a obtenção da característica da resistência elétrica da LMF. A análise do comportamento da resistência mediante a aplicação de corrente na liga consiste em um estudo de grande relevância para utilização do material como atuador, uma vez que possibilita determinar a melhor região de atuação, de acordo com a transformação de fase.

Além disso, foi possível encontrar a relação entre a atuação da LMF com a deformação da viga, medida por meio de sensores extensômetros de resistência elétrica. Sendo verificado que quando pequenas correntes são aplicadas no atuador de LMF, não é aplicada força suficiente na viga para que a mesma sofra variação da sua posição. Todavia, para valores de corrente mais altos, a liga começa a contrair e conseqüentemente possui força suficiente para levantar a viga da sua posição inicial.

Dessa forma, o experimento proposto pode ser utilizado na disciplina de Laboratório de Instrumentação Eletrônica, para complementar os conjuntos de experimentos realizados acerca de sensores e atuadores.

Referências

NASCIMENTO, M.M.S.F.; **Contribuição ao estudo da histerese em ligas com memória de forma**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Dezembro de 2002.

BARROSO, A. J. S. **Caracterização, modelagem e controle de um atuador de liga de memória de forma**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Agosto de 2019.

CAMPOS, A. H. P. **Estratégias de controle aplicadas a um atuador de liga de memória de forma para o controle de deformação de uma viga engastada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Julho 2018.

LIMA, W. M. **Plataforma para análise comportamental de atuadores de ligas com memória de forma e para o controle de deformação de uma barra flexível**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Agosto de 2008.

PEQUENO, A. A. P. **Aplicação de métodos de controle em uma estrutura ativa de viga engastada com atuador de liga com memória de forma**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Janeiro de 2012.

ELAHINIA, M.H. *Shape Memory Alloy Actuators*. John Wiley & Sons, Ltd, Dezembro de 2015.

LAGOUDAS, D.C. *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications*. Springer, Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, 1st edition, 2008.

OTSUKA, K; WAYMAN, C.M. *SHAPE MEMORY ALLOY MATERIALS*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU , United Kingdom, 1st edition, 1998.

CAMPO, J. C.; FERRERO, F. J.; VALLEDOR, M.; ALVAREZ-ALVAREZ, J.C. ; ALVAREZ-ANTON, J. C.; VIERA, J. C. **An Electronic Instrumentation Course as Part of a Multidisciplinary Learning Project**. In: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference 2008, Victoria, Vancouver Island. Canadá, 2008.

National Instruments. **Medições de deformação com strain gage**. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/> Acesso em: setembro de 2019.

CAVALCANTI, T.C. M; VALENZUELA, W. A. V.; ROCHANETO, J. S. **Metodologia para a Obtenção das Característica da Resistência Elétrica de Atuadores de Ligas de Memória de Forma**. XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE 2011). Blumenau, SC, 2011.

Apêndice B - Guia do Experimento

A seguir é apresentada a proposta do guia do experimento para ser aplicado na disciplina de Laboratório de Instrumentação Eletrônica.



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle - LIEC

Medição de Resistência Elétrica de uma Atuador de Liga de Memória de Forma

1. Objetivos

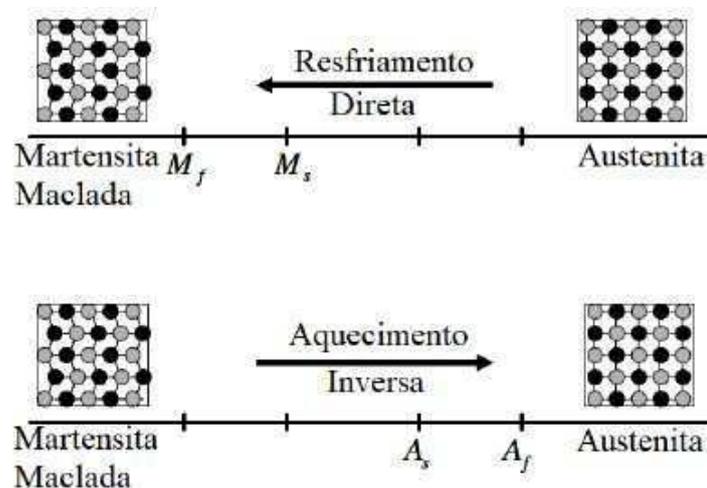
Medir por meio dos *strain Gauge*, a deformação em uma viga de alumínio, causada pela aplicação de corrente elétrica em um atuador de LMF, levantando a curva Deformação x Corrente Elétrica e encontrando o polinômio que a descreve.

2. Atuador de Liga de Memória de Forma

Ligas de Memória de Forma (LMF), também conhecidas como *Shape Memory Alloy* (SMA), são ligas metálicas que quando submetidas a deformações retornam a sua forma original após um ciclo térmico. Essas ligas são muito utilizadas como atuadores e aplicadas no controle de vibração, deformação e/ou posição.

As LMFs possuem duas fases distintas, cada uma com propriedades físicas específicas. Essas fases são nomeadas como: austenita e martensita. A austenita normalmente apresenta uma estrutura cristalina cúbica de face ou corpo centrado em altas temperaturas, já na fase de martensita, pode apresentar uma estrutura tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica em baixas temperaturas. A transformação de uma fase para outra pode ocorrer de forma direta e inversa. A transformação direta se refere a mudança da fase austenita para a martensita e se dá ao resfriar a LMF na ausência de carga aplicada. Na transformação inversa, por sua vez, ao aquecer a mesma LMF, a estrutura cristalina sofre uma transformação reversa, voltando da fase martensita para austenita.

Figura 30 – Representação da Transformação de Fase de uma LMF

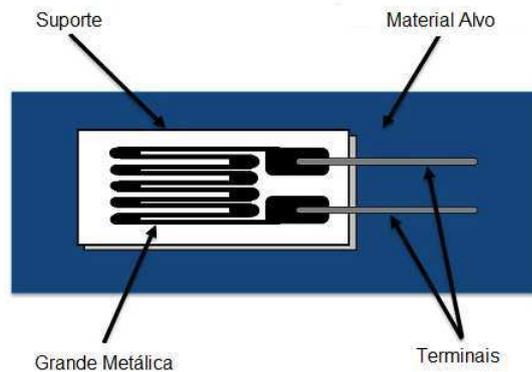


A plataforma utilizada possui um atuador de fio de LMF, que realiza o controle de posição da viga. O atuador é acionado por meio de um *driver* de corrente que recebe um sinal de entrada variável, enviado pela placa de aquisição de dados NI DAQ USB 6212. Ao aplicar corrente elétrica no fio de LMF, é possível aplicar força suficiente na viga para que a mesma consiga retornar a posição esperada. Isso acontece devido ao seu efeito de memória de forma, que faz com que o atuador seja capaz de recuperar sua forma original ao ser aquecido.

3. Extensômetros

Extensômetros de resistência elétrica, também conhecidos como *strain gauge*, são dispositivos que variam sua resistência elétrica quando sofrem deformação e são constituídos de uma pequena grade formada por lâminas metálicas que podem ser fixadas à superfície de um componente ou estrutura a ser medida, com uma camada de adesivo que serve para transmitir as deformações da estrutura ao *strain gauge*, além de servir de isolante entre os dois. Na Figura 31 é apresentada uma ilustração da estrutura de um extensômetro.

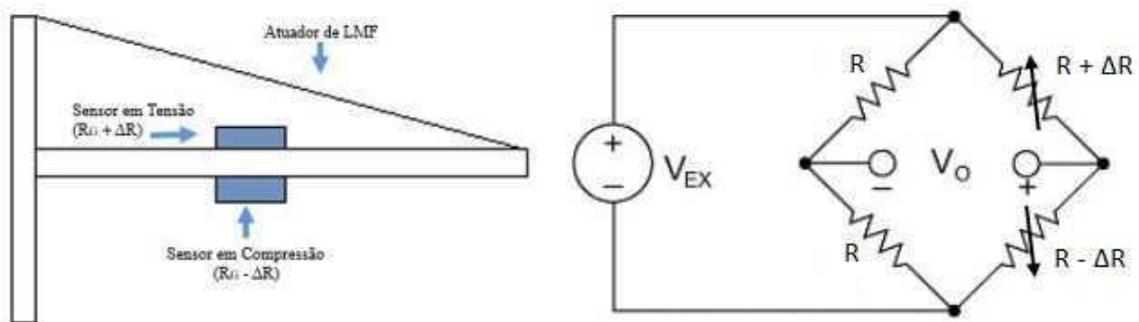
Figura 31 – Representação de um Extensômetro sob o Material que se Deseja Medir Deformação.



A plataforma utilizada para realizar esse experimento, contém uma barra de alumínio fixada horizontalmente por meio de um suporte. Na barra existem colados dois extensômetros idênticos, um na parte superior e outro na parte inferior. Para medir a deformação causada pela atuação da Liga de Memória de Forma.

Os extensômetros são conectados em uma ponte de Wheatstone, como apresentado na Figura 32. A ponte é completada com dois resistores de precisão com igual resistência. Esta configuração é denominada "1/2 ponte", pois existem dois elementos ativos (extensômetros). Outras configurações utilizadas são a "1/4 de ponte" e a "ponte completa", com um e quatro elementos ativos, respectivamente.

Figura 32 – Diagrama Elétrico da Ponte de Wheatstone com dois Extensômetros



A forma como os extensômetros são posicionados na barra permitem que os mesmos sofram deformações opostas. Desta forma, as resistências sofrerão as mesmas alterações, além de minimizar os efeitos da temperatura, pois, as variações de temperatura serão sensibilizadas

pelos grades resistivas dos extensômetros. Logo:

$$R_1 = R_2 = R_G \quad (\text{B.1})$$

$$R_3 = R_G + \Delta R \quad (\text{B.2})$$

$$R_4 = R_G - \Delta R \quad (\text{B.3})$$

$$\Delta R = GF \varepsilon R_G \quad (\text{B.4})$$

Em que GF é uma constante que depende da liga utilizada na confecção do extensômetro e ε a deformação. Para realizar as medições, a ponte é excitada com uma tensão contínua V_{EX} e a tensão V_0 deve ser nula quando a ponte estiver em equilíbrio, ou seja, quando não existir deformação na barra. A deformação é então encontrada por meio da seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot V_0}{V_{EX} \cdot GF} \quad (\text{B.5})$$

O valor da tensão V_0 é muito pequeno em relação a tensão de excitação da ponte. No entanto, as aplicações com extensômetros necessitam de uma amplificação para aumentar o nível da tensão de saída, isto, por sua vez, aumentará a resolução de leitura e melhorará a relação sinal-ruído. Após a medição, o valor é dividido pelo ganho para se obter o valor real da deformação. A magnitude da deformação em geral é muito pequena, por isso ela é frequentemente multiplicada por 10^6 e expressa em $\mu m/m$ ou $\mu\varepsilon$.

4. Roteiro Experimental

O experimento será realizado utilizando um protótipo da plataforma de experimentos apresentada na Figura 33. A plataforma é conectada com a plataforma de aquisição de dados. Na Figura 34 é apresentada a interface criada no LabVIEW para a monitoramento do experimento.

Figura 33 – Fotografia da Plataforma Experimental

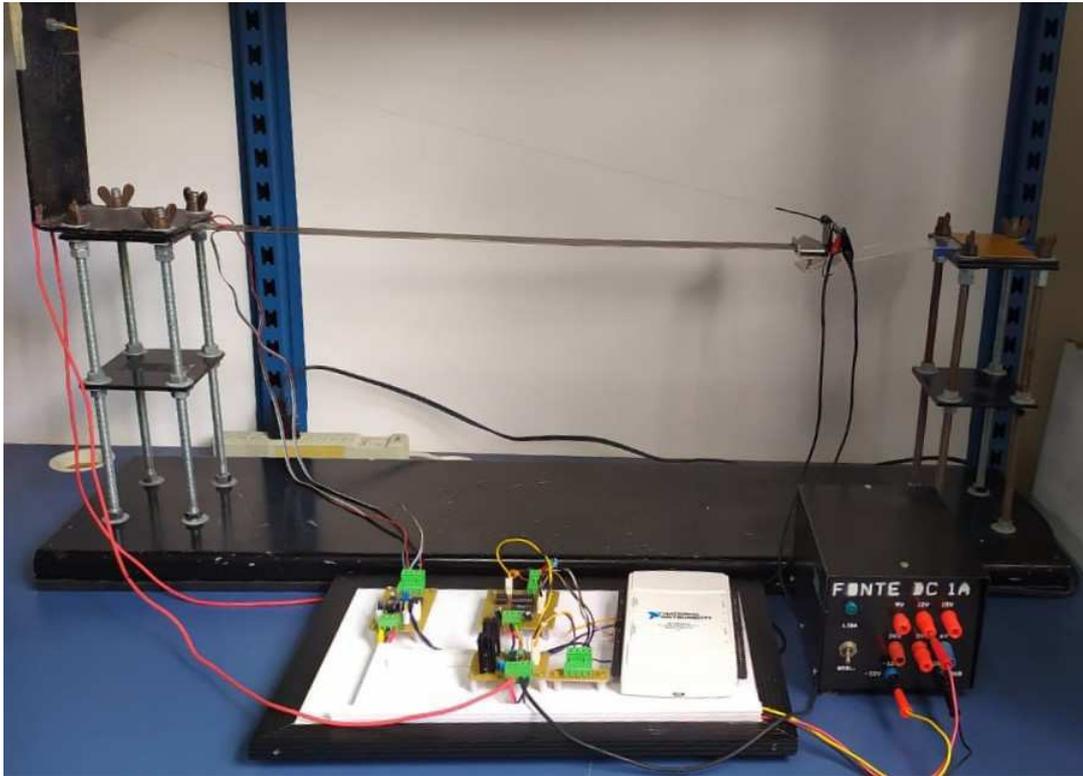
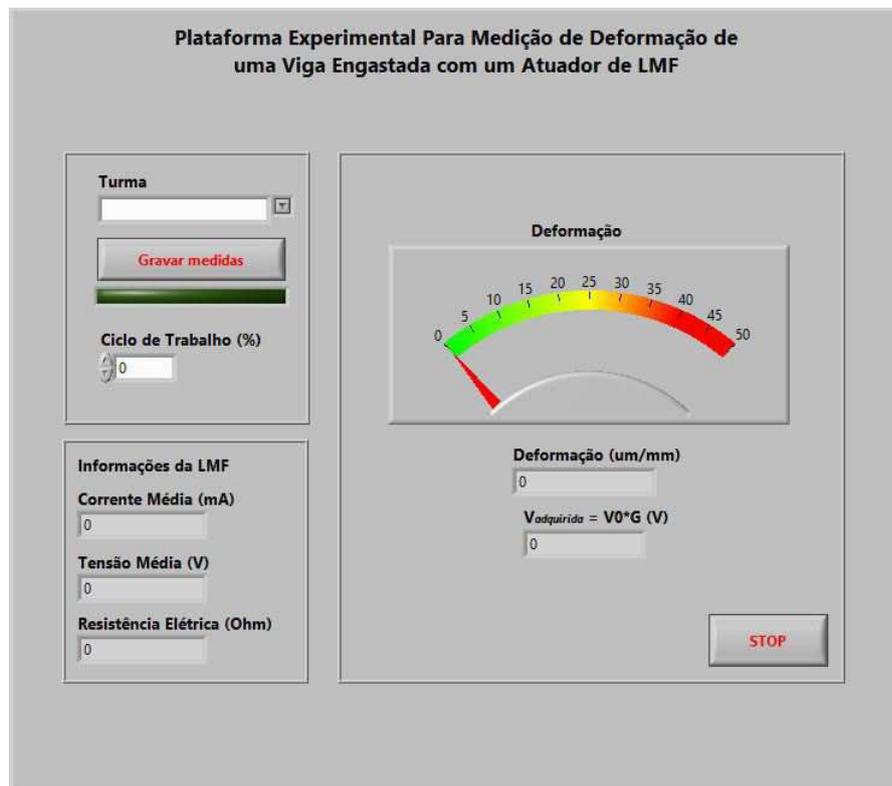


Figura 34 – Representação da Interface Gráfica no LabVIEW



O experimento consiste em variar o valor do ciclo de trabalho do sinal de acionamento do atuador, que consiste na porcentagem do sinal de tensão DC que é aplicado na entrada do *driver* de corrente.

A variação do ciclo de trabalho deve seguir a Tabela 4 e os valores de deformação, corrente, tensão e resistência correspondentes a cada medição devem ser anotadas ou salvas em um arquivo texto utilizando o botão "Gravar Medidas".

Ciclo de Trabalho (%)	Deformação ($\mu m/m$)	Corrente (mA)	Tensão (V)	Resistência (Ω)
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				
80				
85				
90				
95				
100				

Tabela 4 – Deformação, Tensão, Corrente e Resistência Correspondente

5. Relatório

O relatório deve conter uma breve descrição sobre o *Strain Gauge* e o sistema de medição utilizando a ponte de Wheatstone, a descrição do experimento, como também a curva Deformação x Corrente e Deformação x Resistência, o seu modelo matemático e a conclusão.