



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# **Aplicação de Métodos de Controle em uma Estrutura Ativa de Viga Engastada com Atuador de Liga com Memória de Forma**

Arthur Abrantes Paiva Pequeno

Dissertação de Mestrado

Campina Grande  
15 de Janeiro de 2012

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Arthur Abrantes Paiva Pequeno

# Aplicação de Métodos de Controle em uma Estrutura Ativa de Viga Engastada com Atuador de Liga com Memória de Forma

*Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em ciências no Domínio de Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Instrumentação eletrônica

*José Sérgio da Rocha Neto*

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Arthur Abrantes Paiva Pequeno, 15 de Janeiro de 2012



P425a Pequeno, Arthur Abrantes Paiva  
Aplicacao de metodos de controle em uma estrutura ativa de viga engastada com atuador de liga com memoria de forma / Arthur Abrantes Paiva Pequeno. - Campina Grande, 2012. 98 f. : il. color.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Eletrica e Informatica.

1. Instrumentacao Eletronica. 2. Estrutura Ativa. 3. Liga com Memoria de Forma. 4. Controle de Deformacao. I. Rocha Neto, Jose Sergio, Prof. Dr. II. Título

CDU 621.317.7(043)

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE EM UMA ESTRUTURA ATIVA  
DE VIGA ENGASTADA COM ATUADOR DE LIGA COM  
MEMÓRIA DE FORMA**

**ARTHUR ABRANTES PAIVA PEQUENO**

Dissertação Aprovada em 22.12.2011



**JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.SC., UFCG**  
**Orientador**



**ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG**  
**Componente da Banca**



**CARLOS JOSÉ DE ARAÚJO, Dr., DEM-UFCG**  
**Componente da Banca**

**CAMPINA GRANDE - PB**  
**DEZEMBRO -2011**

*Dedicado aos meus pais, Marilana e Afonso, ao  
meu irmão Matheus e à minha noiva Anna Sofia.*

# Agradecimentos

Agradeço inicialmente a Deus, por todas as oportunidades me dadas durante a vida.

Agradeço a toda minha família, em especial aos meus pais, Marilana Abrantes e Afonso José, meu irmão Matheus e minha noiva Anna Sofia, pelo constante apoio e incondicional crença em meu trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, por todo conhecimento repassado, em especial ao professor José Sérgio, pela orientação e pela paciência, e ao professor Antonio Marcus, pelos conselhos dados ao longo do trabalho.

Aos amigos conquistados durante graduação e mestrado no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle - LIEC, pela amizade em contínua, por estarem sempre presentes e dispostos oferecer qualquer ajuda, em especial ao aluno de doutorado José Mauricio, e o aluno de mestrado Luiz Carlos, que estiveram comigo nos momentos mais difíceis.

À CAPES pela concessão da bolsa que possibilitou minha dedicação integral a este projeto.

A vocês, agradeço.

# Resumo

Segundo estudos mais recentes no ramo de estruturas inteligentes, o uso integrado de sensores, atuadores e controladores, capacitaria um sistema a responder de modo controlado a excitações externas, procurando compensar os efeitos que levariam os níveis de amplitude da resposta a se afastarem de patamares aceitáveis. Nesse contexto, é objetivo deste trabalho realizar o controle da posição de equilíbrio de uma viga em balanço utilizando um atuador de Liga com Memória de Forma (LMF) e extensômetros como sensores, aplicando diferentes técnicas de controle.

Para tal, foi utilizada uma plataforma de testes em que uma viga de aço está simplesmente engastada à uma coluna, enquanto um fio de LMF é conectado na extremidade oposta. Colados nas faces superior e inferior desta viga, estão extensômetros de resistência elétrica unidirecionais, para adquirir dados de deformação da viga. Nas extremidades do fio de LMF, foram conectados terminais elétricos por meio dos quais é possível prover o sinal de atuação.

Para gerar o sinal de atuação, foi necessário realizar o projeto de um sistema de controle. Foram projetados, analisados e implementados dois métodos de controle para a estrutura ativa, fazendo a atuação da LMF por fonte de tensão e por fonte de corrente, para avaliar qual possui melhor viabilidade para controlar este tipo de estrutura. Os critérios utilizados na comparação foram os índices de erro de cada técnica, e a resposta em frequência das mesmas. Como controlador, foi usado o *software* de instrumentação virtual LabView executado num microcomputador pessoal, equipado com uma placa pci-express fabricada pela National Instruments, modelo PCI-6036e, conectada à plataforma por meio de um bloco modelo BNC-2110. Assim, foi desenvolvido um instrumento virtual para implementar as técnicas de controle propostas.

Foi verificado, baseado em resultados gráficos e índices de desempenho calculados, que o controle realizado com fonte de corrente apresentou melhores resultados em relação ao controle com fonte de tensão. Similarmente, foi constatado que a sintonia do controlador usando o método do lugar geométrico das raízes obteve melhores resultados que uma sintonia feita de modo automático pelo LabView. Ainda, foram feitos ensaios comparativos entre um atuador em forma de fio, com seção transversal circular, e um atuador de fio laminado, ou fita, onde a seção transversal é em forma retangular.

**Palavras-chave:** *Instrumentação eletrônica, Estrutura Ativa, Liga com memória de forma, Controle de deformação.*

# Abstract

According to recent studies in the field of smart structures, the integrated use of sensors, actuators and controllers, could enable any system to respond as controlled to external excitations, compensating effects that would take the response amplitude levels away from acceptable. It an objective of this work to control the equilibrium position of a cantilever beam, using samples of SMA as actuators, strain gauges as sensors, and using different control techniques.

For this overview, a studies platform was used, where a steel beam is simply riveted to a column, and secure with the SMA sample at the opposite end. Attached on the top and bottom faces of this beam, we have unidirectional electrical resistance strain gages, so that we can acquire data from the beam deformation. At the SMA both ends, electrical terminals are connected in a way that is possible to provide the signal for action.

To generate this signal operation, it was necessary to design a control system. We designed and implemented two control techniques for this structure, making the acting of the alloy by a voltage source and current source, and evaluate which one has better viability to control this type of structure. The criteria to be used for comparison are the error rates of each technique, and frequency response of the same. As controller, the LabView virtual instrumentation software was used running on a microcomputer equipped with a PCI-Express card manufactured by National Instruments, model PCI-6036e, which must be connected to the platform by means of a block model BNC-2110. So the order is also working to develop a virtual instrument to implement the proposed control techniques.

It was found, based on graphical results and performance indices calculated that the control achieved with current source showed better results compared with the control voltage source. Similarly, it was found that tuning the controller using the root locus obtained better results than a tune done automatically by LabView. Still, comparative tests were made between an actuator in the form of wire with circular cross section, and an actuator wire rod or tape, where the cross section is rectangular in shape.

**keywords:** *Electronic Instrumentation, Cantilever beam, Shape Memory Alloy, Control.*



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	p. 1
1.1	Motivação . . . . .	p. 2
1.2	Objetivos . . . . .	p. 3
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	p. 4
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	p. 10
3.1	Descrição da plataforma de testes . . . . .	p. 10
3.2	Sensores e atuadores . . . . .	p. 12
3.2.1	Sensores de deformação - Extensômetros . . . . .	p. 13
3.2.1.1	Condicionamento de sinal . . . . .	p. 14
3.2.1.2	Calibração . . . . .	p. 17
3.2.1.3	Erro . . . . .	p. 20
3.2.1.4	Sensibilidade . . . . .	p. 21
3.2.1.5	Resolução . . . . .	p. 21
3.2.1.6	Precisão . . . . .	p. 21
3.2.2	Atuador - Fio e Fita de LMF . . . . .	p. 21
3.2.2.1	Ligas com Memória de Forma . . . . .	p. 21
3.2.2.2	Propriedades e comportamento termomecânico . . . . .	p. 22

---

3.2.2.3	Acionamento dos atuadores de LMF . . . . .	p. 24
3.3	Funcionamento do conjunto . . . . .	p. 30
3.4	Bloco de conectores BNC 2110 e Placa PCI 6036E . . . . .	p. 30
3.5	Ferramenta de programação: LabVIEW . . . . .	p. 33
3.5.1	Aquisição de dados e geração de sinais . . . . .	p. 35
3.5.1.1	Aquisição do sinal dos extensômetros . . . . .	p. 35
3.5.1.2	Acionamento do fio de LMF . . . . .	p. 36
3.5.2	Filtragem Digital . . . . .	p. 38
3.6	Integração com MatLab . . . . .	p. 40
<b>4</b>	<b>Controle de deformação</b> . . . . .	<b>p. 41</b>
4.1	Identificação . . . . .	p. 41
4.1.1	Coleta de informações sobre o sistema . . . . .	p. 42
4.1.2	Identificação de um modelo . . . . .	p. 43
4.2	Controle Proporcional, Integral Derivativo (PID) . . . . .	p. 43
4.2.1	Controle Proporcional . . . . .	p. 45
4.2.2	Controle Integral . . . . .	p. 45
4.2.3	Controle Derivativo . . . . .	p. 46
4.2.4	Por quê o controle PID é importante? . . . . .	p. 47
4.2.5	Métodos de Sintonia . . . . .	p. 47
4.2.5.1	Métodos de Ziegler-Nichols . . . . .	p. 47
4.2.5.2	Sintonia pelo método de cancelamento de pólos . . . . .	p. 49
4.2.6	Controle PID auto-sintonizado . . . . .	p. 51
4.3	Critérios de avaliação . . . . .	p. 54
4.3.1	Integral do erro quadrático . . . . .	p. 54
4.3.2	Integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo . . . . .	p. 55
4.3.3	Integral do erro absoluto . . . . .	p. 55

---

4.3.4	Integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo . . . . .	p. 56
<b>5</b>	<b>Experimentos e Resultados</b>	p. 57
5.1	Controle usando fonte de corrente e fonte de tensão . . . . .	p. 57
5.2	Identificação do sistema . . . . .	p. 68
5.3	Controle usando o método de cancelamento de pólos . . . . .	p. 71
5.4	Controle utilizando “fio” e “fita” de LFM . . . . .	p. 81
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	p. 85
6.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	p. 86
	<b>Referências</b>	p. 87
	<b>Anexo A Programação em G</b>	p. 90
A.1	Estruturas de Execução . . . . .	p. 90
A.1.1	Estrutura de repetição <i>While</i> . . . . .	p. 90
A.1.2	Estrutura de execução condicional <i>If</i> . . . . .	p. 92
A.2	Funções DAQmx (Data Acquisition) . . . . .	p. 93
A.2.1	DAQmx <i>Create</i> . . . . .	p. 94
A.2.2	DAQmx <i>Timing</i> . . . . .	p. 94
A.2.3	DAQmx <i>Start</i> . . . . .	p. 95
A.2.4	DAQmx <i>Read</i> . . . . .	p. 96
A.2.5	DAQmx <i>Write</i> . . . . .	p. 96
A.2.6	DAQmx <i>Clear</i> . . . . .	p. 97

## Lista de Figuras

1	Aplicação de uma viga engastada no controle do coeficiente de amortecimento de um amortecedor. Adaptado de Moallem[1]. . . . .	p. 5
2	Sistema de controle de vibração de uma viga usando atuadores diferenciais de LMF. . . . .	p. 6
3	Viga de balanço excitada usando Nitinol como elemento de força. . . . .	p. 6
4	Plataforma de controle de deformação de uma viga. . . . .	p. 7
5	Diagrama esquemático da plataforma experimental proposta por [2]. . . . .	p. 7
6	Viga engastada apoiada por cabos de LMF acoplados a molas. Adaptado de Suzuki e Kagawa[3]. . . . .	p. 8
7	Plataforma experimental em vistas isométrica(a) e lateral(b). . . . .	p. 11
8	Representação de um sistema com sensores e atuadores. . . . .	p. 13
9	Extensômetro de resistência elétrica. . . . .	p. 13
10	Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com dois extensômetros. . . . .	p. 14
11	Diagrama elétrico da placa de circuito impresso do condicionamento de sinal dos <i>Strain-Gauges</i> . . . . .	p. 16
12	Diagrama de blocos representativo do esquema de comunicação entre sensor e microcomputador. . . . .	p. 17
13	Curva de deflexão da viga para verificação do módulo de elasticidade E. . . . .	p. 19
14	Ilustração esquemática da transformação de fase induzida por temperatura entre austenita e martensita maclada na ausência de carga aplicada. . . . .	p. 23

15	Ttransformação de fase induzida por tensão mecânica, correspondente ao comportamento de superelasticidade para $T > A_f$ . . . . .	p. 24
16	Comportamento quase-plástico, com deformação residual gerada quando $T < M_f$ . . . . .	p. 24
17	Efeito de memória de forma em uma LMF em que uma deformação residual é recuperada por meio de aquecimento. . . . .	p. 25
18	Formato dos atuadores de LMF utilizadas neste trabalho: (a) fio; (b) fita. . . . .	p. 25
19	Diagrama de blocos representativo do esquema de comunicação entre microcomputador e atuador. . . . .	p. 26
20	Diagrama elétrico de ligação para acionamento do atuador linear por fonte de tensão. . . . .	p. 27
21	Diagrama elétrico da fonte de corrente utilizada para acionar o atuador. . . . .	p. 29
22	Representação do fluxo de dados, expondo como os elementos do sistema estão ligados entre si. . . . .	p. 31
23	Fluxograma representativo do sistema como um todo. . . . .	p. 31
24	Janela de um programa básico em LabVIEW, que faz leituras de todos os sensores e é capaz de acionar qualquer dos atuadores. . . . .	p. 34
25	Diagrama de blocos para aquisição da deformação da viga de aço. . . . .	p. 35
26	Sinal da deformação linear vista na janela de usuário. Neste caso, ilustrando a viga voltando à posição de equilíbrio após sofrer uma perturbação. . . . .	p. 36
27	Parte do VI que gera o sinal PWM e o envia para o fio ou fita de LMF. . . . .	p. 37
28	Barra deslizante que configura o <i>duty cycle</i> do PWM. . . . .	p. 38
29	Filtro Digital FIR. . . . .	p. 38
30	Campos para especificações do filtro digital. . . . .	p. 39
31	VI para filtragem digital de um sinal. Janela GUI e janela de programação. . . . .	p. 39
32	Construção de três vetores a partir de dados vindos das leituras dos sensores. . . . .	p. 40
33	Bloco para estimar um modelo de função de transferência. . . . .	p. 43
34	Malha de controle do sistema estudado. . . . .	p. 44

35	Malha de controle detalhada do sistema estudado. . . . .	p. 44
36	Representação de um bloco de controle PID. . . . .	p. 44
37	Diagramas de blocos: termo de controle proporcional. . . . .	p. 45
38	Diagramas de blocos: termo de controle integral. . . . .	p. 46
39	Diagramas de blocos: termo de controle derivativo. . . . .	p. 47
40	Curva de reação de processo. . . . .	p. 48
41	Auto-tuning PID. . . . .	p. 52
42	Janella de usuário (GUI) de um VI elaborado para realizar controle PID.	p. 52
43	Auxiliar de sintonia automática dos parâmetros do controlador PID. . .	p. 53
44	Processo de sintonia dos parâmetros do controlador PID. . . . .	p. 54
45	Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Quadrada; Frequência: 30 mHz; Carga: 0 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 58
46	Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Quadrada; Frequência: 50 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 59
47	Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Senoidal; Frequên- cia: 30 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 60
48	Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Senoidal; Frequên- cia: 70 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 61
49	Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Triangular; Frequência: 30 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 62
50	Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Triangular; Frequência: 50 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 63
51	Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Nenhuma aplicação de carga na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF. . .	p. 66
52	Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Aplicação de uma carga de 1 N na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF. . .	p. 67
53	Ensaio de identificação do sistema acionado por fonte de corrente. . . .	p. 69
54	Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Quadrada; Frequên- cia: 30 mHz; Carga: 0 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 72

55	Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Quadrada; Frequência: 50 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 73
56	Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Senoidal; Frequência: 30 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 74
57	Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Senoidal; Frequência: 50 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 75
58	Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Triangular; Frequência: 30 mHz; Carga: 0 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 76
59	Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Triangular; Frequência: 50 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF. . . . .	p. 77
60	Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Nenhuma aplicação de carga na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF. . .	p. 79
61	Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Aplicação de uma carga de 1 N na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF. . .	p. 80
62	Ensaio de identificação do sistema acionado por atuador de LMF em forma de fio. . . . .	p. 82
63	Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Atuador: amostra de LMF em forma de fio. . . . .	p. 84
64	Diagrama de Blocos G. . . . .	p. 91
65	Interface de Usuário. . . . .	p. 91
66	Bloco referente a uma estrutura de repetição While. . . . .	p. 92
67	Bloco referente a uma estrutura de condição If. . . . .	p. 93
68	Conjunto de funções DAQmx. . . . .	p. 94
69	Bloco para criação de um canal virtual. . . . .	p. 95
70	Bloco para temporização de um canal virtual. . . . .	p. 95
71	Bloco para iniciar o funcionamento de um canal virtual. . . . .	p. 96
72	Bloco de leitura de amostras em um canal virtual. . . . .	p. 96
74	Bloco de fechamento de comunicação e limpeza de dados de um canal virtual. . . . .	p. 97

---

73	Bloco de escrita de dados em um canal virtual. . . . .	p.97
----	--------------------------------------------------------	------



## Lista de Tabelas

1	Calibração sem o atuador de LMF. . . . .	p. 19
2	Parâmetros PID de Ziegler-Nichols usando o método de reação do processo. . . . .	p. 48
3	Parâmetros PID de Ziegler-Nichols usando o método de ciclo contínuo. . . . .	p. 49
4	Erros médios absolutos (%). . . . .	p. 64
5	Resultados dos cálculos dos índices de erro para controle com parâmetros sintonizados automaticamente. . . . .	p. 66
6	Erros médios absolutos (%). . . . .	p. 78
7	Resultados dos cálculos dos índices de erro. Acionamento usando fonte de corrente. . . . .	p. 80

# Nomenclatura

A Ampére

Af Temperatura final da transformação para fase Austenita

As Temperatura inicial da transformação para fase Austenita

CC corrente contínua

cm centímetro

EMFS Efeito de Memória de Forma Simples

FSO full-scale output

GUI G User Interface

IAE integral absolute-error

ISE Integral Square-Error

ITAE integral-of-time-multiplied absolute-error

ITSE integral-of-time-multiplied square-error

LabVIEW Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

LaMMEA Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas

LMF Liga com Memória de Forma

M+ Fase Martensita demaçada

MatLab Matrix Laboratory

Mf	Temperatura final da transformação para fase Martensita
mm	milímetro
Ms	Temperatura inicial da transformação para fase Martensita
PC	Personal Computer
PRBS	Pseudo-Random Binary Signal
PWM	Pulse Wide Modulation
SMA	Shape Memory Alloy

## Introdução

Recentemente, um novo enfoque no controle de vibrações em estruturas flexíveis tem sido alvo de estudos de vários pesquisadores. Segundo esse enfoque, o uso integrado de sensores, atuadores e controladores, capacitaria um sistema a responder de modo controlado a excitações externas, procurando compensar os efeitos que levariam os níveis de amplitude da resposta a se afastarem de patamares aceitáveis. Atualmente, tem-se convencionado chamar esses sistemas, que integram estrutura, sensores, atuadores e controladores de Estruturas Inteligentes. Várias tecnologias e materiais têm sido investigados e propostos no desenvolvimento destas estruturas [4].

Uma dessas estruturas pode ser uma viga simplesmente engastada, ou uma viga em balanço. Uma tecnologia que, segundo Lima [2], vem sendo utilizada por mais de 10 anos nos problemas mecânicos de deformação e/ou vibração em sistemas estruturais, é a adição de atuadores de força conhecidos como ligas de memória de forma às técnicas convencionais de controle.

As Ligas com Memória de Forma (LMF), também conhecidas como SMA (do inglês *Shape Memory Alloy*) constituem um grupo distinto de materiais metálicos, que demonstram a capacidade de regressar à forma original após sofrer uma deformação plástica seguida de um aquecimento subsequente. Essa capacidade de recuperar a forma foi denominada por Efeito Memória de Forma Simples (EMFS) [5].

Em baixas temperaturas, a LMF apresenta a estrutura cristalina monocíclica ou ortorrômbica chamada de martensita. Nesta fase, o limite elástico do material é mais baixo, apresentando uma maior facilidade de deformação. Aquecendo-se a LMF até uma determinada temperatura, ocorre uma mudança de fase na estrutura cristalina do material,

transformando em uma estrutura de forma cúbica de corpo centrado. Esta fase, chamada de austenita, possui limite elástico elevado e uma grande porção da deformação na LMF é recuperada, ocorrendo assim uma contração [6].

Devido a esse fenômeno, as LMF podem ser utilizadas como sensores e/ou atuadores na indústria aeroespacial, petrolífera, automobilística, em aplicações ortodônticas, ortopédicas, robóticas ou controle da vibração e forma. Quando utilizadas como atuadores termomecânicos, no qual o aquecimento é realizado por efeito joule, aplicando-se certa intensidade de corrente, as LMF tem se revelado como uma alternativa atrativa, devido à sua grande deformação e boa recuperação, em sistemas onde grandes forças, grandes deformações e baixas frequências são requeridas [2].

Neste contexto, propõe-se neste trabalho projetar e implementar os controladores necessários para controlar parte de uma estrutura, mais especificamente a posição de equilíbrio de uma viga de aço, engastada, usando um fio atuador de LMF. São usados extensômetros colados nas faces da barra de aço como sensores de deformação e um controlador, para manter o equilíbrio da viga.

Para controlar a estrutura ativa foi usado um microcomputador pessoal (ou *Personal Computer*, PC), equipado com uma placa de comunicação PCI-express fabricada pela National Instruments, modelo NI PCI-6036e [7]. Para conectar os sensores e atuador da estrutura ao PC, foi empregado um bloco de conectores BNC, produzido pela National Instruments, modelo BNC-2110 [8]. O *software* utilizado foi o LabView (acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), desenvolvido pela mesma empresa, que é um ambiente de programação gráfica usado para desenvolver sistemas de medição, testes e controle usando ícones gráficos e conectores que lembram um fluxograma [9]. Assim, foi necessário elaborar leis de controle e, utilizando o LabView, aplicar tais leis para determinar as ações a serem executadas pelo atuador, a partir das informações adquiridas por meio dos extensômetros.

## 1.1 Motivação

O uso de materiais inteligentes em sistemas de monitoramento das condições de máquinas e estruturas já possui grande impacto nos setores aeroespacial e da construção civil. Naves, lasers e radares espaciais são projetados com exigências de precisão na estrutura, assim, a necessidade de controle da forma torna-se bastante importante [4]. A motivação inicial para este trabalho vem dos efeitos e fenômenos observados na LFM,

capaz de sofrer deformações e retornar ao estado inicial a partir de excitações térmicas, podendo esta excitação ser provocado por efeito Joule.

Este trabalho surgiu da necessidade em dar continuidade aos estudos envolvendo Ligas com Memória de Forma e suas aplicações como atuador na área de controle, utilizando instrumentação eletrônica como ferramenta principal. Em termos mais específicos, continua-se um trabalho iniciado por Lima[2] em 2006, que envolveu o projeto e a montagem de uma plataforma de testes, que foi em parte utilizada no desenvolvimento desta pesquisa.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar o controle da posição de equilíbrio de uma estrutura do tipo viga em balanço, utilizando um atuador LMF, extensômetros como sensores, e aplicando técnicas de controle para avaliar a melhor maneira para se controlar esta estrutura.

Em termos específicos, tem-se como objetivos:

- Controlar a posição de equilíbrio de uma viga em balanço;
- Utilizar liga com memória de forma como atuador;
- Identificar um modelo para o sistema construído;
- Projetar um sistema de controle PID, e implementá-lo usando o software LabView;
- Acionar o atuador usando fonte de tensão, e também fonte de corrente, analisando os comportamentos em ambos os casos;
- Como atuadores, utilizar tanto fita quanto fio de LMF, verificando as vantagens de se utilizar a fita laminada;
- Aprofundar conhecimentos nos conceitos de instrumentação eletrônica, ligas com memória de forma e controle.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Para ressaltar a importância de estruturas do tipo ‘Vigas Engastadas’, Rahman[10] baseia-se em uma grande quantidade de estudos direcionados a este assunto encontrados na literatura. Existem diversas aplicações onde pode ser necessário controlar a posição da extremidade livre de uma viga flexível.

De forma semelhante, nos últimos 15 anos vários trabalhos com foco na aplicação de LMF para controle de vibração em máquinas e estruturas têm sido desenvolvidos [11]. Naves, lasers e radares espaciais são projetados com exigências de precisão na estrutura, e assim a necessidade de controle da forma torna-se bastante importante [2]. Em um de seus trabalhos, Suzuki e Kagawa[3] afirmam que nos últimos anos, sistemas de controle de forma e vibração que usam ligas com memória de forma têm sido alvo de vários estudos, e divididos em duas tendências: controle passivo, onde são exploradas as características pseudo-elásticas da LMF, e no controle ativo, onde são projetados sistemas de controle para amortecer a vibração de estruturas usando atuadores de LMF.

Em seu trabalho, Silva[12] destaca que, em aplicações onde são necessárias grande força e grande deformação, a baixas frequências, a atuação por via de LMF é uma solução promissora. O autor exemplifica esse fato com uma viga engastada que precisa ter sua forma modificada de acordo com as condições ao seu redor, que não mudam abruptamente.

Outras aplicações onde atuadores de LMF são usados no controle de flexão são na superfície sem dobradiças da asa de aeronaves inteligentes e em mecanismos atuadores para contrabalançar efeitos aeroelásticos e vibratórios em lâminas da hélice de helicópteros [1]. Nessas aplicações, a preocupação principal é regular a posição de uma estrutura flexível, como uma asa ou uma lâmina de hélice, ao mesmo tempo em que reduz efeitos

de vibrações indesejadas.

Um exemplo deste tipo de sistema é ilustrado na Figura 1, tendo sido estudado por Moallem[1]. Um módulo controlador foi desenvolvido para ajustar continuamente o diâmetro do orifício de um cilindro amortecedor, de forma tal que o coeficiente de amortecimento desejado seja atingido. Para ajustar esse orifício, são utilizados dois atuadores de LMF para posicionar a extremidade livre de uma viga engastada. Quando não há corrente passando pelos fios de LMF, a viga permanece em sua posição de repouso, e o orifício alcança diâmetro máximo. Atuando os fios, apenas um por vez, é possível mudar o diâmetro do orifício, alterando assim o coeficiente de amortecimento do cilindro amortecedor. O objetivo é manter a posição da ponta no local desejado, mesmo na presença de distúrbios provenientes do fluxo de ar, através do ajuste no orifício, localizado na extremidade livre da viga. Uma desvantagem neste caso é a utilização de dois fios de LMF, o que requer mais material, além de exigir maior corrente para a atuação simultânea dos dois atuadores. Percebe-se também que são utilizados dois extensômetros, o que é desvantajoso no sentido de necessitar de maior investimento, além de dois circuitos de condicionamento de sinal para a leitura destes sensores.

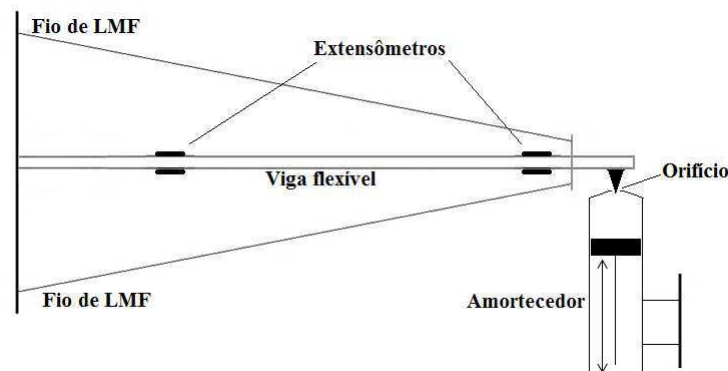


Figura 1: Aplicação de uma viga engastada no controle do coeficiente de amortecimento de um amortecedor. Adaptado de Moallem[1].

No trabalho de Moallem[1], cujo sistema está ilustrado na Figura 2, foi analisada a viabilidade de utilizar fios de LMF para o controle ativo, utilizando o efeito de memória de forma, e passivo, utilizando o efeito pseudoelástico, de vibração de uma viga flexível. O uso de dois atuadores tem as mesmas desvantagens mencionadas anteriormente. Uma diferença do trabalho de Moallem para o que está sendo abordado neste texto está nos sensores de deformação, onde aqui usam-se extensômetros de resistência elétrica, enquanto observa-se na Figura 2 a utilização um sensor de deslocamento a *laser*.



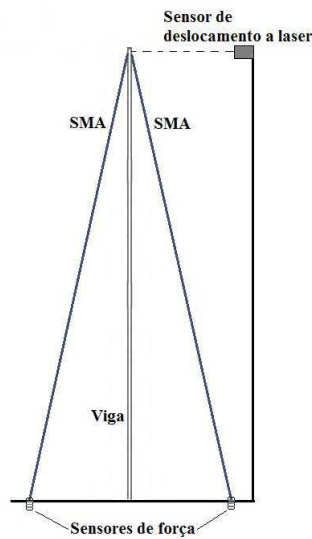


Figura 2: Sistema de controle de vibração de uma viga usando atuadores diferenciais de LMF.

No livro organizado por Srinivasan e McFarland[13], alguns experimentos foram descritos para explorar as características do LMF como atuador no controle de vibração em sistemas. Na Figura 3, ilustra-se uma estrutura composta de uma viga em balanço de aço, com uma extremidade fixa e outra livre. Na face superior desta viga foi fixado um fio de Nitinol numa configuração em V, que foi eletricamente excitado por um gerador de onda com frequência variável. No entanto, não há um controle utilizando sensores e um controlador; o estudo é feito baseado apenas na reação da viga em função da ação da LMF.

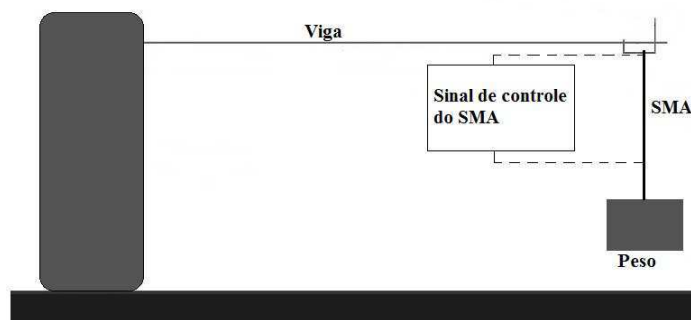


Figura 3: Viga de balanço excitada usando Nitinol como elemento de força.

No trabalho desenvolvido por Silva[12], a deformação de uma viga é controlada por meio de um fio de Nitinol instalado diretamente na superfície da viga. O controle é feito usando o fio de LMF como atuador, alimentado por uma fonte de tensão e um extensômetro como sensor. O esquema é ilustrado na Figura 4. Como o atuador de

LMF é montado paralelamente à viga, a configuração exige maior força para atingir a mesma deformação da viga, em relação a outros trabalhos em que o atuador é montado inclinadamente à viga. Mais força significa que será necessário mais corrente, o que resulta num maior consumo de energia.

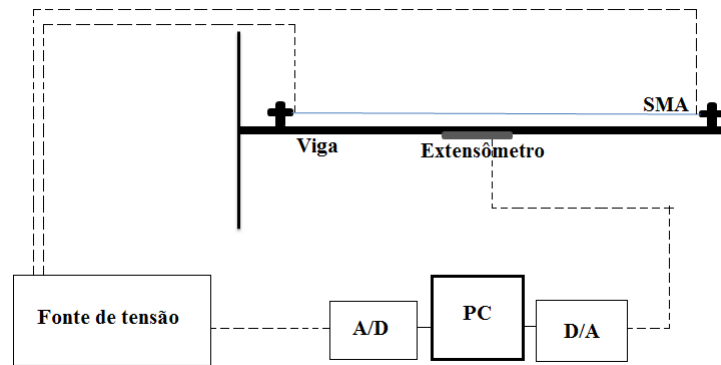


Figura 4: Plataforma de controle de deformação de uma viga.

Em um outro trabalho, Lima[2] utiliza um fio de material com memória de forma para controlar a deformação de uma viga flexível de alumínio simplesmente engastada, em uma estrutura ilustrada na Figura 5. Nesta configuração, uma extremidade do fio de LMF foi fixada em uma chapa na coluna de fixação, e a outra na extremidade livre da viga. Sensores de temperatura e de deformação foram utilizados para a coleta de dados do fio de LMF e da deformação da barra. O fio é aquecido por meio de corrente elétrica, controlada por um microcontrolador.

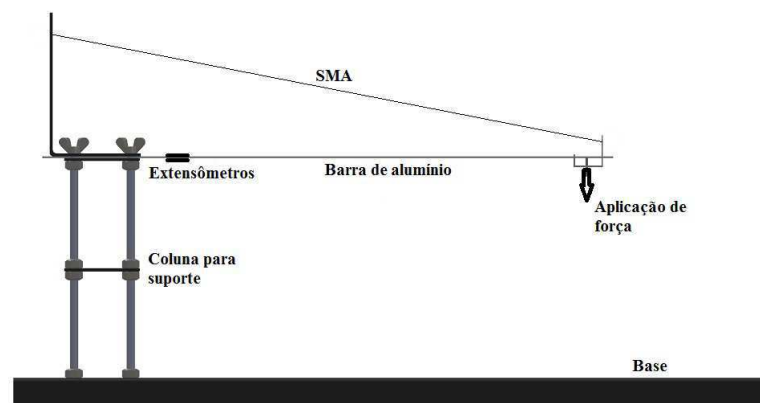


Figura 5: Diagrama esquemático da plataforma experimental proposta por [2].

De acordo com Suzuki e Kagawa[3], uma restrição no uso de um fio de LMF como atuador em controle de vibrações é a lentidão de resposta às variações de temperatura geradas pela tensão aplicada nos seus terminais. Por isso, afirma-se que a LMF é mais

adequada para atenuação de vibrações de baixa frequência (de até 0,1 Hz). Porém, a expectativa é de que esse material pode ser usado para implementar sistemas de controle de estruturas do tipo vigas engastadas com a menor manutenção necessária possível. No trabalho de Suzuki e Kagawa[3], foi montada uma estrutura de viga engastada onde os fios de LMF são ligados à parte fixa da estrutura por meio de molas, como ilustrado na Figura 6. A utilização de três atuadores resulta numa maior quantidade de corrente necessária para atuação, resultando em maior gasto de energia. Um diferencial aqui é a inserção de molas entre a LMF e o ponto de fixação, fazendo com que o amortecimento da estrutura seja favorecido. Entretanto, é provável que isto eleve a constante de tempo do sistema, o que pode ser um problema quando é necessário controlar três atuadores, com três sinais diferentes, exigindo um núcleo de controle com maior velocidade.

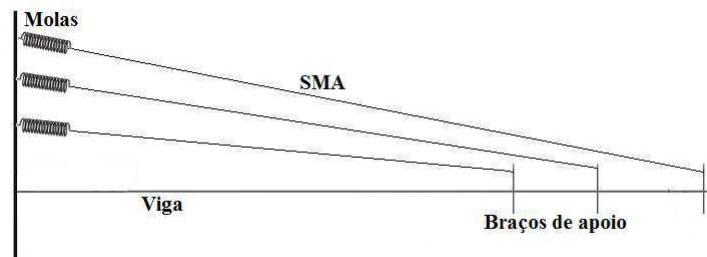


Figura 6: Viga engastada apoiada por cabos de LMF acoplados a molas. Adaptado de Suzuki e Kagawa[3].

É informado ainda que a LMF pode ser usada em frequências maiores, desde que sejam respeitados certos limites de funcionamento. Os autores afirmam que: “Se a LMF for usada em um intervalo de força onde sua dinâmica é linear, é possível esperar uma resposta rápida para deformações pequenas. Ainda, se a liga for operada num regime onde os fenômenos de contração sejam gerados apenas em temperaturas inferiores à temperatura de transformação de fase, então a liga com memória de forma pode ser considerado um atuador linear” [3]. Para limitar a força exercida pelos atuadores, foram acopladas células de carga como sensores, uma em cada braço de LMF.

São muitos os casos onde a liga com memória de forma é utilizada em conjunto com uma viga em balanço, seja no âmbito do controle de posição da extremidade livre, seja no controle de vibrações. Nos trabalhos pesquisados, não é evidenciado a forma de acionamento dos fios, se utilizando a tensão elétrica aplicada como variável de controle, ou se esta variável é a corrente que atravessa os fios. Neste trabalho, objetiva-se utilizar as duas formas, realizando diferentes tipos de ensaios com uma fonte de tensão e os mesmos ensaios com uma fonte de corrente, expondo e analisando os resultados.

Outro fator interessante a estudar é o formato do atuador linear de LMF. Neste estudo foi utilizada uma fita laminada, fazendo um estudo comparativo com um atuador convencional em forma de fio. No próximo capítulo, Materiais e Métodos, são explicados com maior detalhamento as diferenças entre essas formas do atuador.

Tendo este trabalho nascido da ideia de dar continuidade ao trabalho de Lima [2], mencionado anteriormente, foi realizado um estudo comparativo entre uma técnica de controle com sintonia feita automaticamente pelo *software*, e a implementação de um segundo controlador, projetado a partir de um modelo identificado do sistema. Esta comparação é feita a partir de uma série de ensaios, sob diversas condições de carga e frequência de operação, repetidos para cada um dos controladores.

# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

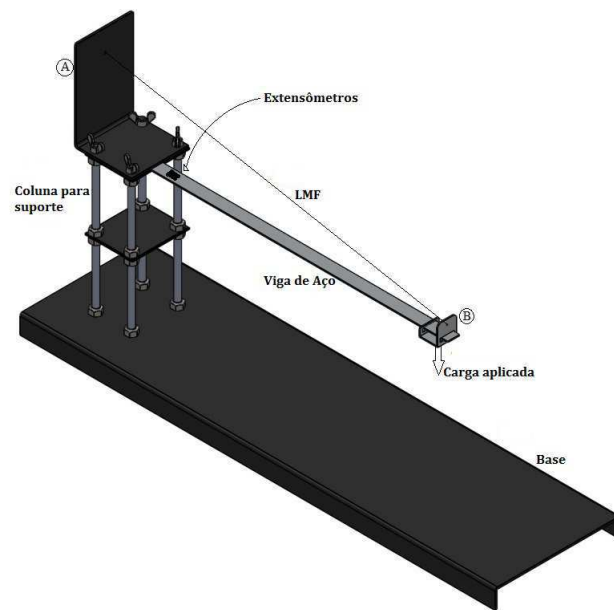
Neste capítulo, apresenta-se a metodologia e os materiais que foram utilizados para alcançar os objetivos propostos. Trata-se da plataforma de estudos e sua estrutura, dos sensores de deformação, da forma como utilizá-los para aquisição dos dados necessários e da geração do sinal adequado para a excitação do fio/fita de LMF como atuador. São expostos também os elementos de aquisição de dados, e as ferramentas de *software* utilizadas no trabalho. Adicionalmente, são apresentados alguns diagramas de blocos no intuito de deixar claro o fluxo de dados do sistema como um todo.

### 3.1 Descrição da plataforma de testes

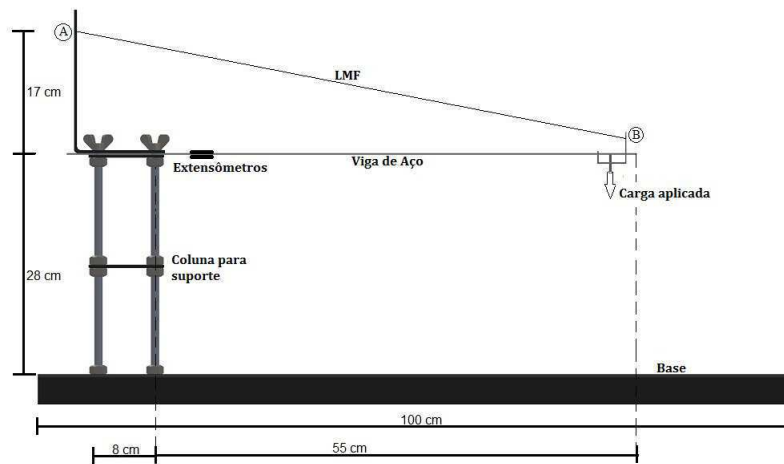
Uma representação da estrutura geral da plataforma utilizada está ilustrada na Figura 7. Uma viga de aço está simplesmente engastada à uma coluna, e minimamente apoiada por um fio/fita de LMF na extremidade oposta. Colados nas faces superior e inferior da viga estão extensômetros de resistência elétrica unidirecionais, para que se possa adquirir dados de deformação da viga. Nas extremidades do fio/fita de LMF, são conectados terminais elétricos por meio dos quais é provido o sinal de atuação.

A estrutura da plataforma é composta, basicamente, de três partes:

- Base rígida: Uma base retangular, plana, de ferro, com comprimento de 100 cm, largura de 25,7 cm e altura de 3,5 cm;
- Coluna de suporte: Uma coluna erguida com origem na base, composta por 4 parafusos de 28 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, dispostos em quatro cantos que formam um retângulo; duas placas de fixação retangulares medindo 10 cm x 12



(a) Vista Isométrica



(b) Vista Lateral

Figura 7: Plataforma experimental em vistas isométrica(a) e lateral(b).

cm e uma terceira placa de fixação para o LMF, como pode ser visto no detalhe A da Figura 7, com altura de 22 cm;

- Viga: Uma viga de aço com 55 cm de comprimento, 2,6 cm de largura e 2 mm de espessura, tendo uma das extremidades presa entre duas placas de fixação na coluna de suporte, e a outra extremidade livre, onde é fixado o atuador de LMF.

Além das peças citadas, tem-se uma pequena peça feita para fixar a LMF à viga de aço, como pode ser visto no detalhe B da Figura 7.

Como mencionado anteriormente, o LMF servirá como atuador nessa configuração, podendo tracionar a viga ou liberá-la. Porém, para que seja possível implementar algum controle sobre este sistema, é necessário também um elemento que permita conhecer a deformação sofrida pela viga. Para isto, foram colados dois sensores de deformação nas faces opostas da barra, que são os extensômetros também ilustrados na Figura 7. É por meio destes sensores que é possível obter a informação do quão deformada a viga se encontra. Mais detalhes sobre o atuador e sensores envolvidos neste trabalho são expostos a seguir.

## 3.2 Sensores e atuadores

O sistema proposto tem seu funcionamento baseado em elementos capazes de perceber e atuar sobre o meio em que estão colocados. São dispositivos que possuem a propriedade de transformar uma forma de energia em outra diferente. Esses tipos de dispositivos são chamados de transdutores. Sensores e atuadores são tipos específicos de transdutores.

Sensores são elementos capazes de sentir uma determinada grandeza física, alterando alguma de suas características à medida em que varia a grandeza a qual eles são sensíveis. Para engenheiros eletricitas, pode-se chamar de sensor todo e qualquer dispositivo que tenha a capacidade de perceber uma forma de energia qualquer e transformá-la em energia elétrica. Exemplificando, um sensor pode ser um dispositivo capaz de sentir a temperatura de um local, e transformar esta temperatura em tensão elétrica.

Um dispositivo capaz de realizar a transformação de energia elétrica em outra forma qualquer de energia é chamado de atuador. Um exemplo simples de atuador seria um fio de material com memória de forma, onde a energia elétrica é transformada em calor e conseqüentemente em contração, que pode resultar em deslocamento e força. Na Figura 8, é possível visualizar um esquema que representa o uso de um sensor e de um atuador

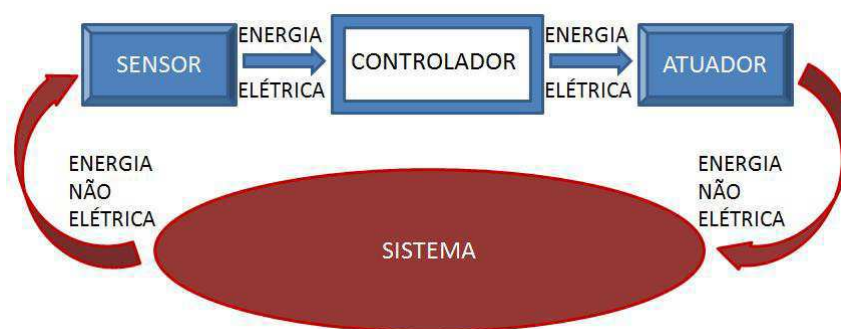


Figura 8: Representação de um sistema com sensores e atuadores.

agindo sobre um sistema.

### 3.2.1 Sensores de deformação - Extensômetros

Conforme mencionado, dois extensômetros de resistência elétrica são colados nas faces opostas da viga da Figura 7, para que se possa ter um sinal de deformação da mesma.

Os modelos de extensômetros utilizados neste trabalho são fabricados pela Excel Sensores, mais especificamente o modelo: PA - 06 - 125BA - 350 - LEN [14]. Trata-se de um extensômetro colável de resistência elétrica unidirecional simples com forma tradicional, resistência nominal de 350 ohms, recomendado para colagem em superfícies de aço, como é o caso da viga utilizada na plataforma de testes.

O extensômetro de resistência elétrica, também conhecido como *strain gauge*, como ilustrado na Figura 9, é uma pequena grade formada por finas lâminas metálicas, devendo ser colado à superfície da estrutura desejada, com uma fina camada de adesivo, que serve para transmitir as deformações da estrutura ao *strain gauge*, além de servir de isolante entre os dois. O *strain gauge* transforma pequenas variações de dimensões da estrutura em que está colado em variações equivalentes de sua resistência elétrica, sendo portanto considerado um transdutor [2].

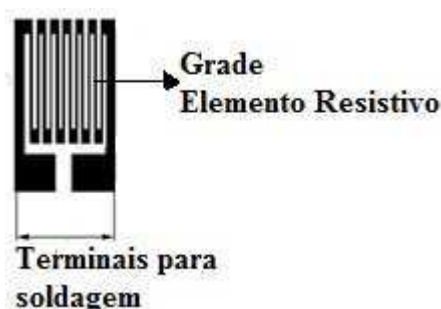


Figura 9: Extensômetro de resistência elétrica.



### 3.2.1.1 Condicionamento de sinal

Para traduzir a variação de resistência elétrica do extensômetro em um sinal de tensão elétrica, é necessário utilizar uma ponte de Wheatstone.

O circuito de ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura 10, é utilizado para medir variações relativas que ocorrem em suas impedâncias, em um só dos elementos da ponte, ou simultaneamente em dois elementos, por meio da medição da variação da tensão de saída  $V_0$  (diferente de zero) por unidade da tensão de excitação. No primeiro caso, a ponte denomina-se de “ponte de um elemento ativo” ou “1/4 de ponte”, no segundo caso “ponte de dois elementos ativos” ou “1/2 de ponte”.

Como mencionado no início da seção, neste trabalho utilizam-se dois *Strain-Gauges*, fazendo uma “ponte de dois elementos ativos”, de modo que a ponte compõe-se de duas resistências equivalentes  $R_i$  ( $i = 1$  e  $2$ ) e de dois extensômetros de resistência, representados por  $(R_G + \Delta R)$  e  $(R_G - \Delta R)$ . Os extensômetros devem ser colados nas faces do corpo de prova que sofrem deformações opostas, de maneira que, enquanto um se contrai, o outro se estende na mesma proporção. Desta forma, as resistências sofrerão as mesmas alterações, além de minimizar o efeito da temperatura, pois as variações da temperatura local serão sensibilizados pelas duas grades resistivas dos extensômetros, de modo que se obtém uma maior precisão.

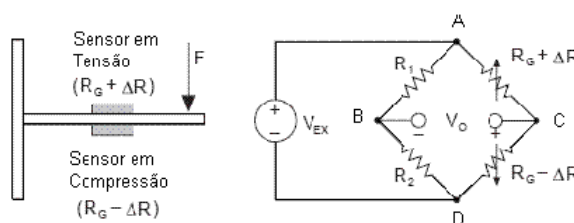


Figura 10: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com dois extensômetros.

Neste caso, tem-se então:

$$V_0 = \left[ \left( \frac{R_3}{R_4 + R_3} \right) - \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \right] \cdot V_{EX} \quad (3.1)$$

Assumindo-se que:

$$R_1 = R_2 = R_G$$

$$R_3 = R_G - \Delta R$$

$$R_4 = R_G + \Delta R$$

Além disso, a literatura indica [2] que:

$$\Delta R = K\varepsilon R_G \quad (3.2)$$

onde  $K$  é o fator de sensibilidade do extensômetro e  $\varepsilon$  é a deformação sofrida.

Pela Equação 3.2, deduz-se que a deformação, dentro de certo limite, é diretamente proporcional a uma variação relativa da resistência do extensômetro. Sendo o fator de sensibilidade ( $K$ ) for conhecido e medindo-se a variação relativa da resistência, obtém-se a medida da deformação ( $\varepsilon$ ) no ponto onde foi colado o extensômetro. A magnitude da deformação é muito pequena. Por isto, o valor medido é freqüentemente multiplicado por  $10^6$  e expressa em unidade de  $\mu m/mm$ . Esta unidade é também grafada como  $\mu\varepsilon$  [2].

Segundo o fabricante, o valor teórico do fator de sensibilidade da linha de extensômetros usada neste trabalho é  $K = 2,1$ . O valor real de  $K$  apresenta pequenas variações, de lote para lote, em torno do valor teórico[14].

Assim, combinando-se as Equações 3.2 e 3.1, resulta:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{K\varepsilon}{2} \quad (3.3)$$

É possível notar da Equação 3.3, que esta configuração apresenta, além da linearidade, um valor duas vezes maior na tensão elétrica medida em relação a deformação no corpo de prova do que em um circuito com apenas um extensômetro, ou seja, a utilização de dois extensômetros faz com que a sensibilidade da ponte seja dobrada. Entretanto, alguns erros de leitura podem ser introduzidos devido ao auto-aquecimento dos elementos da ponte (extensômetros e resistores). Para que os valores medidos de deformação sejam coerentes com as expressões apresentadas, é muito importante que a tensão elétrica de excitação seja estável e precisa.

O valor da tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone com extensômetros é relativamente pequeno, da ordem de dezenas de  $\mu V$ , razão pela qual as aplicações com estes sensores necessitam de uma amplificação para aumentar o nível da tensão de saída. Isto, por sua vez, aumenta a resolução de leitura e deve melhorar a relação sinal-ruído. Para implementar a amplificação, utiliza-se um componente de amplificação de precisão, o CI INA 101. Entretanto, de acordo com as especificações de uso deste componente, o ganho máximo aplicado deve ser de  $G = 1000$ . Isto faz com que a leitura de tensão continue ainda com valores relativamente baixos, da ordem de centenas de  $mV$ . Portanto, foi feita

amplificação em cascata, de modo que, ao fim do circuito de amplificação, obteve-se um ganho de aproximadamente  $G = 2000$ .

Ao se instalar uma ponte de medição, espera-se que a tensão elétrica de saída da ponte seja exatamente zero quando nenhuma deformação esteja sendo aplicada ao corpo. Mas, a resistência de conexão dos fios e as variações dos valores das resistências produzem uma tensão elétrica inicial não nula. Por isto, será utilizado um circuito de regulação de *offset* junto com a amplificação do sinal.

Para adquirir o sinal de deformação da viga a partir da variação de resistência elétrica dos extensômetros, foi montado um circuito de condicionamento de sinal projetado em uma placa de circuito impresso, cujo esquema elétrico é ilustrado na Figura 11

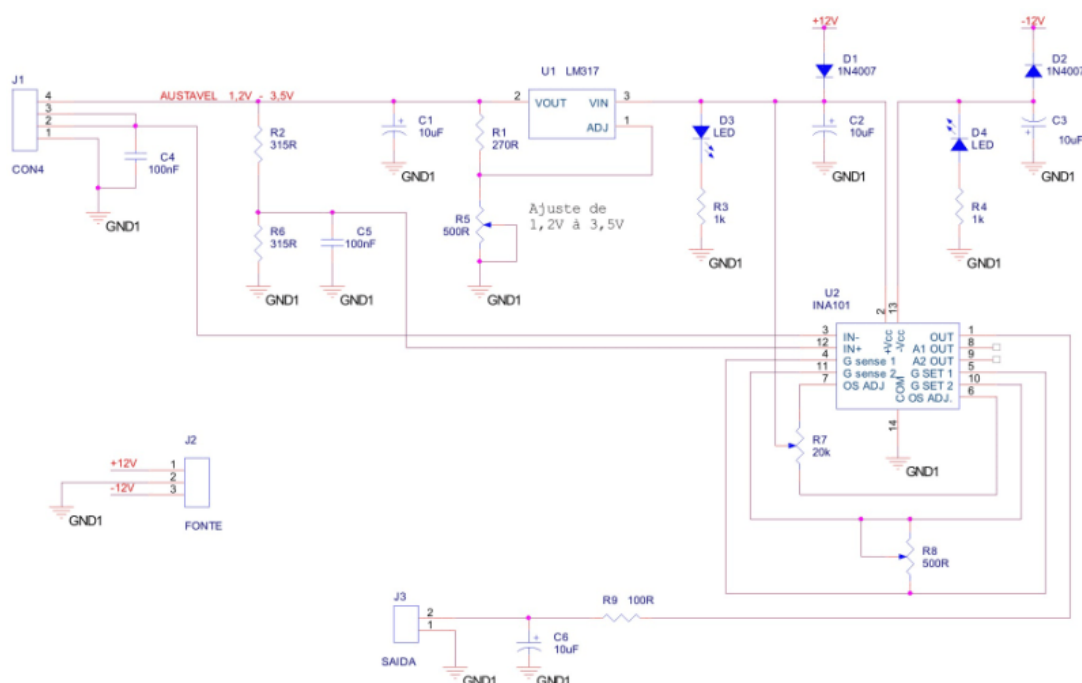


Figura 11: Diagrama elétrico da placa de circuito impresso do condicionamento de sinal dos *Strain-Gauges*.

Os dois *strain-gauges* são ligados em ponte através de J1 com os resistores R2 e R6, ambos de 315 ohms. O circuito fornece 12 V ao regulador de tensão LM317, sua saída é colocada em um divisor de tensão (R5 e R7) de maneira que se possa ajusta-la entre os valores de 1,2 e 3,5 V. Esse sinal é utilizado para alimentar a ponte de Wheatstone. Os sinais de saída da ponte, Figura 11, foram conectados a entrada diferencial em um amplificador de instrumentação, o INA 101 (pinos 3 e 12). O potenciômetro R7 é utilizado para ajuste de *off-set*, enquanto o R8 é utilizado para ajustar o ganho. Os capacitores são utilizados como filtros, e dois *LED's* (D3 e D4) são empregados para indicar que a placa esta sendo alimentada.

Na Figura 12 é apresentado um diagrama de blocos onde se representa o esquema de comunicação entre o sensor e o microcomputador, passando por todas as fases necessárias ao condicionamento do sinal.



Figura 12: Diagrama de blocos representativo do esquema de comunicação entre sensor e microcomputador.

Com essa configuração tem-se a informação necessária a respeito da deformação da viga, informação esta que deve ser interpretada no microcomputador, para que, a partir desta interpretação, sejam tomadas decisões de atuação de modo a manter o ponto de equilíbrio da viga em balanço.

A saída deste sistema é então ligada a um computador pessoal, onde é realizado o processamento do sinal de deformação e de onde parte o sinal de atuação do Nitinol.

### 3.2.1.2 Calibração

A exatidão de um sensor é uma qualidade que caracteriza a capacidade do sensor de fornecer resultados próximos ao valor real da grandeza medida. O valor real, exato ou ideal de uma grandeza é o valor que seria obtido ao se fazer uma medição perfeita. Porém, ocorre que este valor é, naturalmente, indeterminado. O valor real convencional de uma grandeza passa a ser um valor adotado por convenção, de acordo com o propósito da medição [15].

Para se alcançar a exatidão do sensor, é necessário fazer a calibração estática do mesmo. A calibração é feita alterando a entrada do sensor lentamente, de modo que esta assuma valores constantes sucessivamente, enquanto a saída do sensor é gravada. A curva de calibração é obtida traçando os valores de saída em função dos valores de entrada. É necessário saber o valor real de cada entrada.

Assim, é necessário então medir os valores de entrada do sensor, ou seja, a deformação da viga. Na ausência de um outro sensor para fazer essa medição, pode-se fazer uma estimativa dos valores de deformação, baseados nos valores de deflexão da ponta da viga.

O deslocamento  $y_f$  do extremo livre ( $x = L$ ) de uma viga engastada é proporcional à

força  $F$  aplicada [16], como segue:

$$y_f = \frac{FL^3}{3EI} \quad (3.4)$$

onde:

- $E$  é o módulo de Young do material
- $I$  se denomina momento de inércia da secção transversal relativo a fibra neutra

$$I = \frac{ab^3}{12} \quad (3.5)$$

onde  $a$  e  $b$  são as dimensões de largura e altura da secção transversal da viga. Nesta equação,  $F$  é a força aplicada na viga,  $L$  é o comprimento do ponto de aplicação da força até o ponto onde foram colados os extensômetros,  $a$  é a largura da viga,  $b$  é a espessura e  $E$  é o módulo de elasticidade do material.

Para determinar o módulo de elasticidade da viga utilizada, foi feito um ensaio específico onde a viga foi deixada livre, sem o apoio da LMF, e aplicou-se uma carga na extremidade livre gradativamente, ao tempo que foi feita uma leitura da deflexão da ponta da viga. Para a aplicação da carga, foram utilizados pesos de precisão, variando de 10  $g$  a 300  $g$ . Para a verificação da deflexão foi utilizada uma régua fixa com suporte perpendicularmente à posição da viga. Os resultados desse ensaio são mostrados na Tabela 1, e a reta de calibração na Figura 13.

Podemos reescrever a equação 3.4 da seguinte maneira:

$$E = \frac{L^3 F}{3I y_f} \quad (3.6)$$

Aplicando  $L = 55\text{cm}$ ,  $a = 26\text{mm}$ ,  $b = 2\text{mm}$  e  $F/y_f$  como sendo a inclinação da reta apresentada na Figura 13, foi obtido  $E = 20,59 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ , muito próximo do valor encontrado na literatura para o aço comum, que é  $E = 20,7 \times 10^{10} \text{N/m}^2$  [16].

Admitindo-se então o módulo de elasticidade como calculado de maneira correta, e utilizando este valor aplicado à equação de deformação em função da força aplicada e do módulo de elasticidade de uma viga:

$$\varepsilon = \frac{6FL}{ab^2E} \quad (3.7)$$

Tensão elétrica medida (V)	Carga aplicada (N)	Deflexão da ponta (mm)
0	0	0
1,23	1,176	27
1,31	1,274	28
1,43	1,372	31
1,52	1,470	33
1,61	1,568	36
1,71	1,666	38
1,81	1,764	40
1,92	1,862	43
2,01	1,960	45
2,12	2,058	47
2,23	2,156	50
2,33	2,254	52
2,44	2,352	54
2,55	2,450	56
2,65	2,548	59
2,75	2,646	61
3,28	3,136	73

Tabela 1: Calibração sem o atuador de LMF.

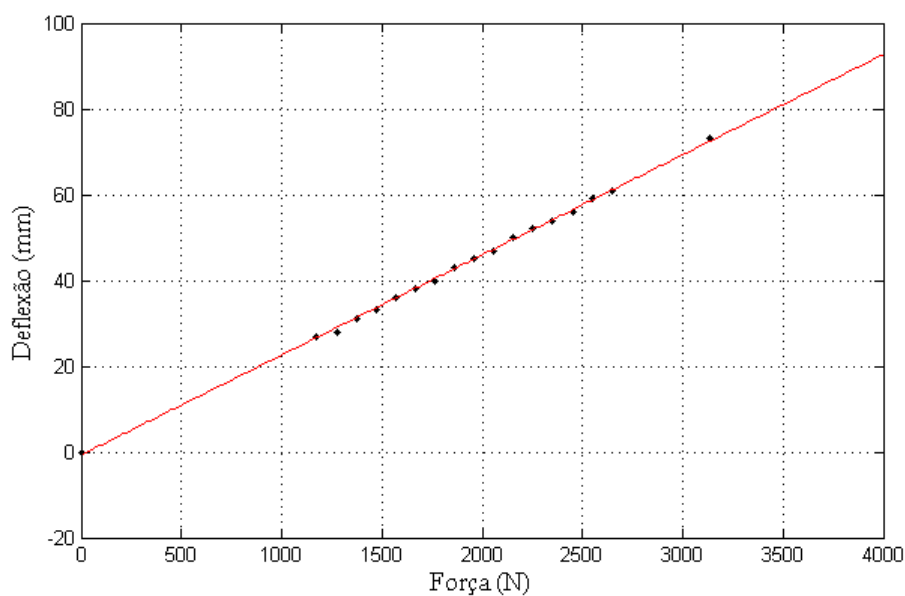


Figura 13: Curva de deflexão da viga para verificação do módulo de elasticidade E.

A Equação 3.3 pode ser reescrita, de forma a exprimir a deformação sofrida pelos extensômetros em função das tensões  $V_{ex}$  (tensão de excitação da ponte de Wheatstone) e  $V_0$  (tensão de saída da ponte), como mostrado na Equação 3.8:

$$\varepsilon = \frac{2V_0}{KV_{ex}} \quad (3.8)$$

Lembrando que a tensão  $V_0$  apresentada na Equação 3.8 é a tensão de saída na ponte, e a tensão medida  $V_{IN}$  está amplificada, então:

$$V_0 = \frac{V_{IN}}{G} \quad (3.9)$$

Para a tensão de excitação usada de 3,6 V, um ganho medido  $G = 1962,6$ , e *offset* de -3,82 V, foi obtido:

$$\varepsilon_{(mm/mm)} = 1,5 \times 10^{-4} V_{IN} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{(\mu m/mm)} = 150,0706 \times V_{IN} \quad (3.11)$$

Tendo assim sido feita a transformação de unidades, decorrente da calibração do sensor.

### 3.2.1.3 Erro

Qualquer discrepância entre os valores reais de uma medição e os valores obtidos na leitura do instrumento são chamadas de erro. A diferença entre o resultado da medição e o valor real é chamada de erro absoluto. Em alguns casos, é interessante apresentar o erro absoluto como um percentual do valor máximo que o instrumento é capaz de medir (*full-scale output*, FSO).

$$Erro_{abs} = Resultado_{medido} - Valor_{real} \quad (3.12)$$

É comum também apresentar o erro como um quociente entre o erro absoluto e o

valor real. Este quociente é chamado de erro relativo.

$$Erro_{rel} = \frac{Erro_{abs}}{Valor_{real}} \quad (3.13)$$

#### 3.2.1.4 Sensibilidade

A sensibilidade é a variação mínima da entrada do sensor, necessária para produzir uma uma variação detectável na saída. Neste caso, pode-se verificar alterações no sinal de saída do sensor com deformações a partir de unidades de  $\mu m/mm$ . Dizemos então que a sensibilidade dos extensômetros é de unidades de  $\mu m/mm$ .

#### 3.2.1.5 Resolução

A resolução, ou fator de escala, é a inclinação da curva de calibração do sensor. É recomendável que o sensor tenha uma resolução alta e, se possível, constante. Como apresentado na calibração do sensor, temos a resolução, usando essa configuração dos extensômetros, com os parâmetros mencionados, de  $1/150 \frac{\mu m}{mm}$ .

#### 3.2.1.6 Precisão

Precisão é a qualidade que caracteriza a capacidade de um instrumento de medição de fornecer a mesma leitura quando repetidas medições são feitas para uma mesma quantidade de uma grandeza, sob as mesmas condições ambientais e operacionais. O conceito de uso de um instrumento preciso, na prática, está ligado a um alto numero de algarismos significativos no resultado, dado que sucessivas leituras devem retornar sucessivos valores iguais nos primeiros algarismos significativos. Para efeitos de leitura da deformação usando essa configuração de extensômetros, tem-se uma precisão de  $1 \mu m/mm$ .

### 3.2.2 Atuador - Fio e Fita de LMF

#### 3.2.2.1 Ligas com Memória de Forma

As Ligas com Memória de Forma - LMF ou LMF (*Shape Memory Alloy*) constituem uma classe de compostos metálicos que possuem a capacidade de desenvolver e recuperar deformações relativamente grandes, podendo alcançar em torno de 8% sem apresentar deformações plásticas. Esta característica é devido, em grande parte, à capacidade que



estes materiais possuem de desenvolver transformações de fase na presença de tensões mecânicas aplicadas e/ou variações de temperatura [17].

Em 1938, um físico sueco chamado Arne Olander observou comportamentos interessantes em ligas de ouro-cádmio (Au-Cd), as quais podiam ser deformadas enquanto numa baixa temperatura, e quando aquecidas recuperar suas formas originais. Porém, o conceito de LMF ficou mais difundido apenas na década de 60, quando um grupo de pesquisadores liderados por William J. Buehler observou que uma liga de níquel-titânio (Ni-Ti) também apresentava características de memória de forma. Tendo sido esta descoberta feita em um instituto americano chamado Naval Ordnance Laboratory, o material ficou conhecido como Nitinol (**N**ickel **T**itanium **N**aval **O**rdinance **L**ab). A descoberta do Nitinol fez ressurgirem os interesses e pesquisas em LMF por serem mais baratas, mais fáceis de se trabalhar e menos prejudiciais à saúde que as conhecidas ligas de ouro-cádmio [18, 19].

Porém estas composições mencionadas acima não são as únicas que caracterizam as ligas com memória de forma. Outros exemplos são Ag-Cd, Cu-Al-Ni, Cu-Sn, Cu-Zn- (X), In-Ti, Ni-Al, Fe-Pt, Mn-Cu e Fe-Mn-Si. Algumas diferenças entre as várias composições de ligas são a deformação máxima reversível, a resistência mecânica e elétrica, a facilidade ou dificuldade de transformação de fase, as temperaturas nas quais as transformações ocorrem, entre outras. Ligas produzidas com Ni-Ti são presumidamente as mais flexíveis e com maior capacidade de deformação recuperável. A liga mais facilmente encontrada no mercado é o Nitinol, basicamente por apresentar um preço mais acessível, e é este material que foi utilizado neste trabalho. Ligas de Cu-Al-Ni e Cu-Zn Al também são bastante utilizadas na pesquisa sobre memória de forma.

Embora estes materiais possam ser considerados como uma tecnologia emergente, alguns deles já são comercialmente disponíveis na forma de fios, tubos, chapas e barras e têm sido usados em aplicações diversas na engenharia e biomédica [17]. As Ligas com Memória de Forma produzidas na forma de fios e fitas delgadas são consideradas atuadores lineares por natureza e apresentam grande possibilidade de aplicação na robótica, na odontologia, na produção de atuadores miniaturizados, de sensores, antenas para celulares e de músculos artificiais, devido a sua grande capacidade de carga quando confrontados com as suas dimensões[20].

### 3.2.2.2 Propriedades e comportamento termomecânico

Como se sabe, a maioria dos metais dilatam quando aquecidos e contraem-se quando resfriados. O oposto pode ocorrer com as LMF, que podem ser deformadas enquanto

frias, e posteriormente contrair-se quando aquecidas, retornando à sua forma original. Isto ocorre graças às transformações em sua estrutura cristalina, que podem ser causadas por meio de variações de temperatura e/ou tensão mecânica.

### *Efeitos de Memória de Forma e Superelasticidade*

A temperatura é uma das grandezas capazes de provocar as transformações de fase em Ligas com Memória de Forma. Na ausência de uma tensão mecânica aplicada, o material transforma-se de austenita à martensita maclada, quando resfriado, e ao ser reaquecido retorna para a fase austenita. As temperaturas em que as transformações das fases martensita e austenita se iniciam são respectivamente  $M_s$  e  $A_s$  e as temperaturas em que as transformações estão completas são  $M_f$  e  $A_f$ , respectivamente. Na Figura 14 ilustra-se essas transformações e ao observá-la é possível ter uma idéia das temperaturas críticas de transformação.

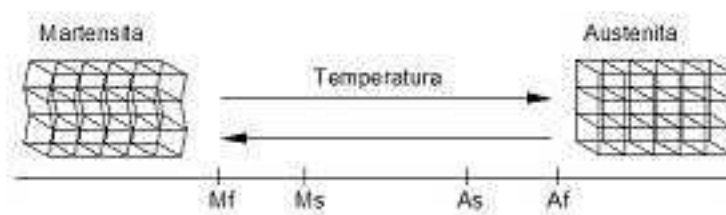


Figura 14: Ilustração esquemática da transformação de fase induzida por temperatura entre austenita e martensita maclada na ausência de carga aplicada.

As transformações de fase podem também ser induzidas por meio de uma carga aplicada, como ilustrado nas Figuras 15 e 16. Na Figura 15, a temperatura do material está acima de  $A_f$ , o material exibe uma relação tensão-deformação quase linear à medida que a tensão é elevada até  $\sigma_{M_s}$ , quando começa a transição da fase austenita para a fase martensita demaçada  $M+$ . Com a redução da tensão mecânica, o material novamente exibe comportamento quase linear na fase martensita até a tensão mecânica alcançar  $\sigma_{A_s}$ , quando começa o processo reverso. No regime de alta temperatura é observada a completa recuperação da forma sob descarregamento. Esse fenômeno é chamado de superelasticidade [21]. Para temperaturas abaixo de  $M_f$ , como ilustrado na Figura 16, o material conserva uma deformação residual  $\varepsilon_r$ , quando descarregado. Se aquecido acima da temperatura  $A_f$  a deformação é recuperada e o material retorna para sua forma original, como ilustrado na Figura 17. O comportamento nessa temperatura mais baixa é chamado de quase plástico e a recuperação, por meio de aquecimento, da deformação mecânica residual induzida por tensão mecânica representa o efeito de memória de forma

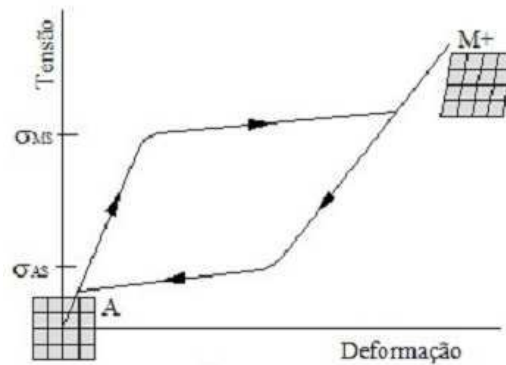


Figura 15: Transformação de fase induzida por tensão mecânica, correspondente ao comportamento de superelasticidade para  $T > A_f$ .

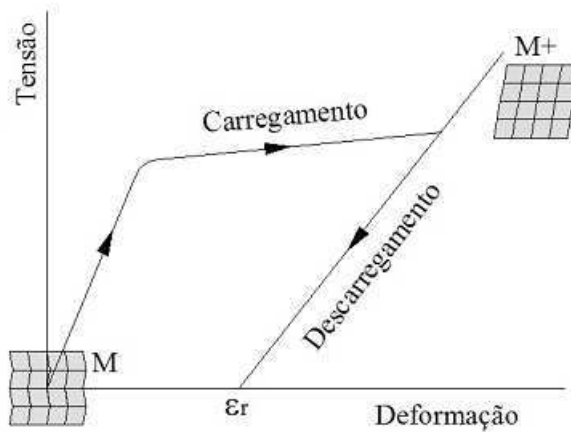


Figura 16: Comportamento quase-plástico, com deformação residual gerada quando  $T < M_f$ .

[21].

### 3.2.2.3 Acionamento dos atuadores de LMF

Como foi mencionado na introdução deste trabalho, duas formas de atuador são utilizadas, sendo feitas do mesmo material com memória de forma. A primeira é uma fita, ou seja, a secção transversal é retangular, e a segunda é um fio, cuja secção transversal é de forma circular, como ilustrado na Figura18.

O primeiro material a ser usado como atuador é uma fita de Liga com Memória de Forma que foi laminado no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), na Universidade Federal de Campina Grande. O atuador em questão possui

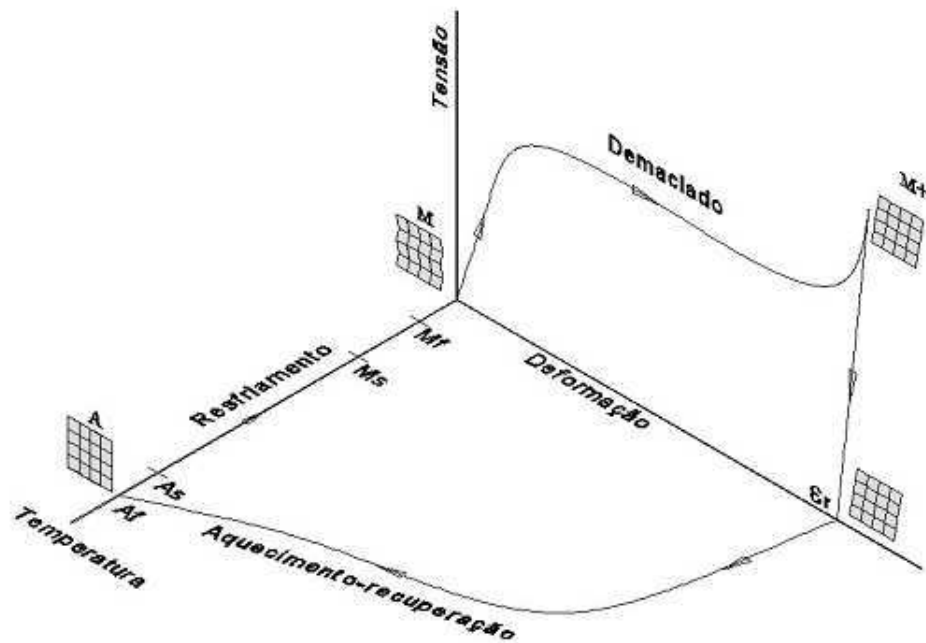
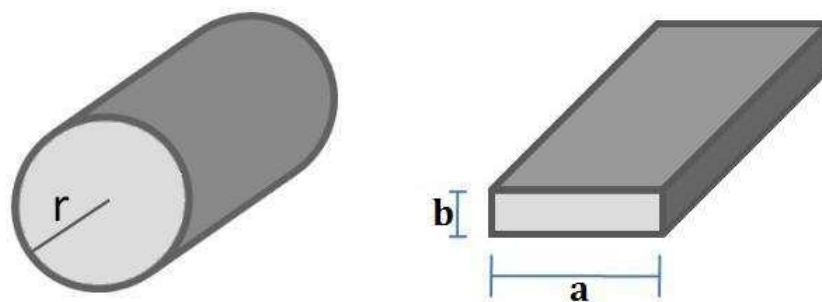


Figura 17: Efeito de memória de forma em uma LMF em que uma deformação residual é recuperada por meio de aquecimento.



(a) Atuador em forma de fio: seção circular. (b) Atuador em forma de fita: seção retangular.

Figura 18: Formato dos atuadores de LMF utilizadas neste trabalho: (a) fio; (b) fita.

68 cm de comprimento, 0,7 mm de largura e 0,04 mm de espessura. Utiliza-se corrente elétrica e o efeito Joule para induzir calor na fita, provocando suas transformações de fase e conseqüentemente fazendo com que se contraia ou se expanda. O segundo atuador, em forma de fio, foi utilizado com o mesmo comprimento da anterior, possuindo um raio de 0,095 mm. A área de secção transversal de ambas as amostras é de 0,028 mm<sup>2</sup>. Maior detalhamento a respeito destes atuadores é feito no próximo capítulo deste texto.

Para acionar a LMF basta que uma tensão elétrica seja aplicada aos seus terminais de modo que seja atravessada por uma determinada corrente. Porém é importante atentar à capacidade máxima de deformação elástica do fio, para que o material não entre na zona plástica, perdendo assim algumas de suas propriedades essenciais. Por isso é necessário dimensionar a corrente a ser usada de maneira a não danificá-lo.

Para tal, é possível usar o princípio de atuação via PWM (do inglês *Pulse Wide Modulation*), de modo que o *duty cycle* varie de 0 a 100% para aplicar a tensão ou a corrente proporcional de zero ao valor máximo. A atuação é feita por PWM para que a corrente elétrica não seja aplicada à LMF continuamente, mas sim em pulsos, o que deve deteriorar menos o material.

Um possível esquema que deve existir para que a ordem de excitação seja enviada do microcomputador ao atuador de LMF é ilustrado na Figura 19.

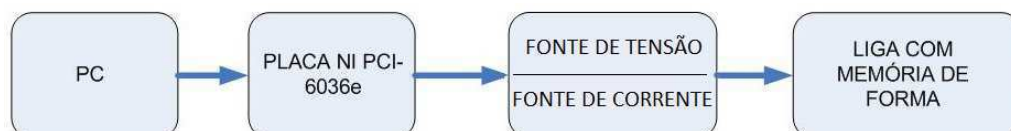


Figura 19: Diagrama de blocos representativo do esquema de comunicação entre microcomputador e atuador.

O acionamento do atuador foi feito de duas formas: uma utilizando uma fonte de tensão controlada, e outra utilizando uma fonte de corrente controlada. A intenção é analisar a melhor maneira de acionar este tipo de atuador nas condições descritas neste trabalho.

Utilizando uma fonte de tensão para acionar o fio/fita, o princípio é controlar a tensão RMS aplicada nos terminais da LMF. Naturalmente, variações de tensão elétrica vão provocar variações na corrente que atravessa o fio, provocando então variações na temperatura e as transformações de fase. Como foi mencionado, esta variação dos valores de tensão é proporcional à variação do ciclo de trabalho de um sinal PWM gerado no microcomputador, de modo então que o controle de tensão é feito no microcomputador.

O diagrama elétrico da fonte de tensão utilizada está apresentado na Figura 20.

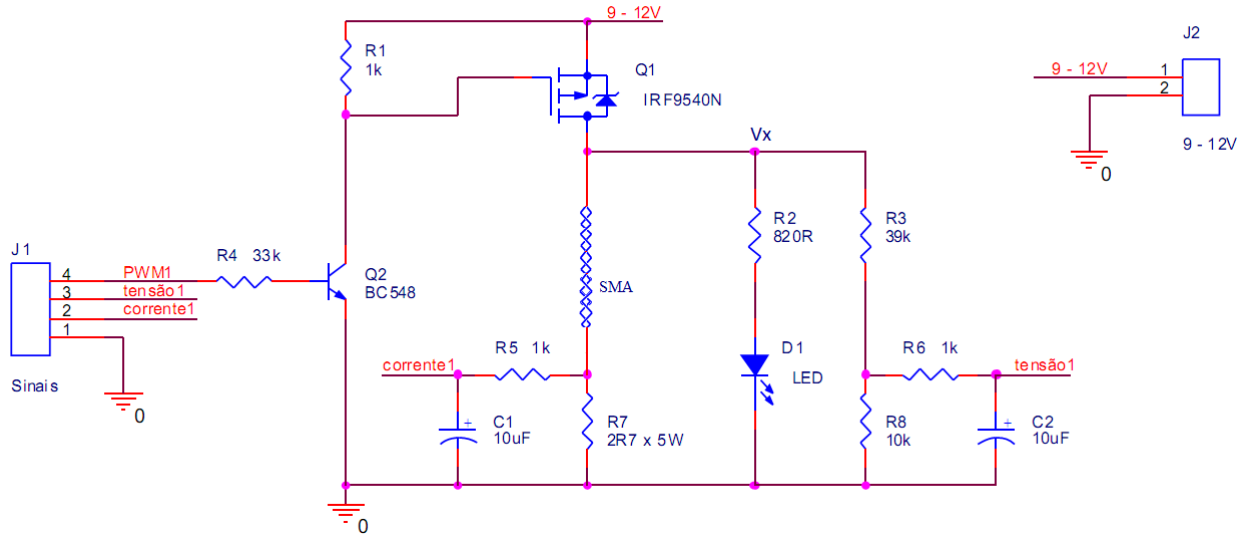


Figura 20: Diagrama elétrico de ligação para acionamento do atuador linear por fonte de tensão.

A alimentação do circuito vem de uma fonte de 12 V. Os transistores Q1 e Q2 garantem que haverá corrente passando pela LMF se, e somente se, o PWM estiver em nível alto. O LED D1 serve como sinalizador de funcionamento, ficando aceso apenas se o circuito estiver alimentado. Os pontos “corrente 1” e “tensão 1” servem para que se possa estimar, respectivamente, a corrente e a tensão elétrica às quais a LMF está submetida. Em ambos os casos tem-se divisores de tensão para possibilitar essa estimativa. Os filtros formados pelo resistor R5 com o capacitor C1, e pelo resistor R6 com o capacitor C2, servem como passa-baixas para os sinais de corrente e tensão, respectivamente.

Para medir a tensão  $V_{LMF}$  a qual a LMF está submetida, faz-se:

$$V_{LMF} = V_x - V_{02} \quad (3.14)$$

onde  $V_{02}$  é a tensão medida no ponto “corrente 1”. Pelo princípio do divisor de tensão, tem-se a expressão de  $V_x$  em função de  $V_{01}$  (tensão medida no ponto “tensão 1”):

$$V_{01} = \frac{R_8}{R_8 + R_3} V_x \quad (3.15)$$

$$V_x = V_{01} \frac{R_8 + R_3}{R_8} = V_{01} \frac{10k + 39k}{10k} = 4,9V_{01} \quad (3.16)$$

Finalmente, para estimar a tensão aplicada na LMF, obtém-se:

$$V_{LMF} = 4,9V_{01} - V_{02} \quad (3.17)$$

Sabe-se que a corrente que atravessa a LMF é a mesma corrente que passa pelo resistor R7. Então, pode-se escrever:

$$I_{LMF} = \frac{V_{02}}{R_7} \quad (3.18)$$

Assim, é possível medir a tensão e a corrente as quais a LMF está submetida, ao tempo que se faz o acionamento por fonte de tensão.

Sabe-se que a potência fornecida pela fonte para o atuador é dada pela expressão:

$$P_{LMF} = \frac{V_{LMF}^2}{R_{LMF}} \quad (3.19)$$

Porém, objetiva-se verificar se o uso de uma fonte de corrente para acionar a LMF apresenta resultados melhores no âmbito do controle do processo, de forma geral. A resistência da LMF é um fator não-linear, e na expressão da potência fornecida pela fonte de tensão, este fator encontra-se no denominador da equação. A expressão de potência fornecida por uma fonte de corrente seria escrita como a seguir:

$$P_{LMF} = R_{LMF}I_{LMF}^2 \quad (3.20)$$

Neste caso, a não-linearidade encontra-se no numerador da expressão. É esperado que esse fato seja favorável no que diz respeito ao controle do sistema envolvendo ligas com memória de forma. Para tanto, foi feito o acionamento também por fonte de corrente, cujo diagrama de ligação é apresentado na Figura 21.

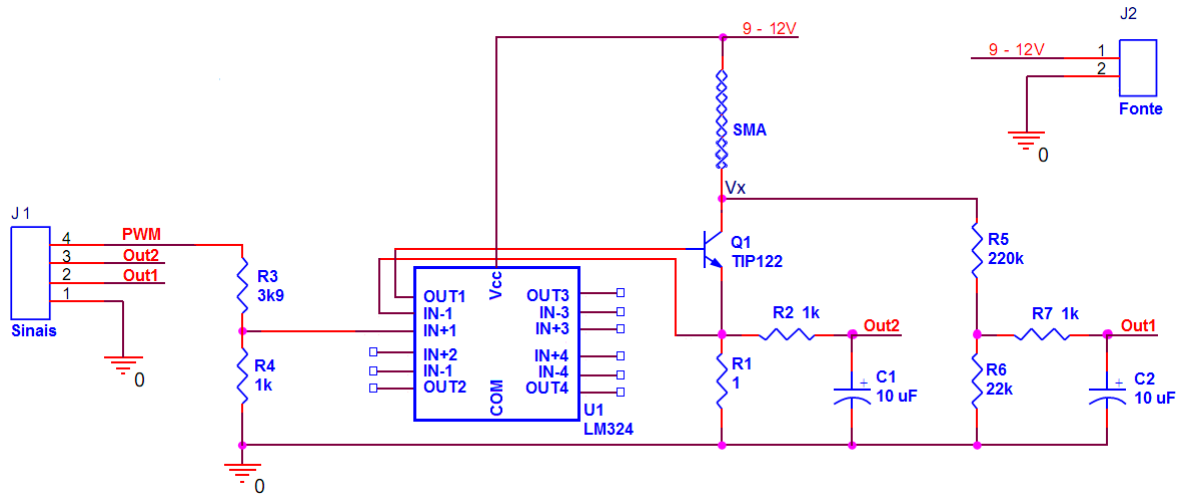


Figura 21: Diagrama elétrico da fonte de corrente utilizada para acionar o atuador.

A alimentação do circuito vem de uma fonte de 12 V. A configuração usando um amplificador operacional e um transistor é feita de modo a transferir o sinal aplicado na entrada positiva do amplificador para o emissor do transistor, sendo possível controlar a tensão aplicada sobre o resistor R1. Como o resistor R1 é fixo, controla-se então a corrente que passa por esse resistor, que é exatamente a mesma corrente que atravessa a LMF, sendo fornecida pela fonte de alimentação do circuito. A entrada é dada pelo sinal PWM vindo da placa PCI6036e, e a corrente passa pela LMF apenas quando o sinal está em nível alto. As saídas “Out1” e “Out2” são inseridas para que seja possível medir a tensão e a corrente às quais a LMF está submetida. Da mesma forma como na fonte de tensão, foram colocados filtros passa-baixas para fazer as medições de tensão e corrente.

Para medir a tensão  $V_{LMF}$  aplicada na liga, faz-se:

$$V_{LMF} = V_+ - V_x \quad (3.21)$$

Pelo princípio do divisor de tensão, temos a expressão de  $V_x$  em função de  $V_{out1}$  (tensão medida no ponto “Out1”):

$$V_{out1} = V_x \frac{R6}{R5 + R6} = V_x \frac{22k}{22k + 220k} = V_x \times 0,09091 \quad (3.22)$$

E para uma alimentação de 12 V, tem-se a expressão:

$$V_{sma} = 12 - \frac{V_{out1}}{0,09} \quad (3.23)$$



Como a corrente que atravessa a LMF é a mesma que passa pelo resistor R1, pode-se escrever:

$$I_{sma} = \frac{V_{out2}}{R_1} \quad (3.24)$$

Desta maneira controla-se a tensão ou a corrente aplicada ao LMF, conseqüentemente a contração do fio, e conseqüentemente o quanto de tração o fio exercerá sobre a viga, fazendo com que esta deforme de acordo com o sinal de comando enviado pelo microcomputador.

### 3.3 Funcionamento do conjunto

No sistema estudado, os sensores e o atuador de LMF são conectados a um computador pessoal por meio de um bloco de conexão BNC fabricado pela National Instruments, modelo NI BNC 2110, que por sua vez foi ligado ao PC via uma placa PCI interna modelo NI PCI 6036 - E. Estes dois elementos são ligados um ao outro por um cabo NI SH6868 EP, de 68 pinos, também fabricado pela National Instruments. No PC as informações são vistas pelo usuário, de modo que este possa tomar decisões e enviar ordens de atuação sobre o sistema. É também do PC que partem as ordens de acionamento do atuador (fio ou fita), ordens estas que são refletidas em atuação sobre o sistema. Observando a Figura 22 é possível ter um entendimento mais claro do fluxo de dados que ocorre no sistema. O fluxograma representativo do sistema é apresentado na Figura 23.

Ao analisar as Figuras 22 e 23, torna-se mais simples entender como cada elemento está conectado às placas NI BNC 2110 e NI PCI 6036E, bem como a conexão das placas com o PC, e ainda fica mais evidente o sentido do fluxo de informações durante o funcionamento conjunto de todos.

No PC fica sendo executado o *software* LabView. É a partir deste *software* que são implementados todos os algoritmos de controle sobre o sistema, e é extamante das técnicas de controle implementadas que trata o capítulo a seguir.

### 3.4 Bloco de conectores BNC 2110 e Placa PCI 6036E

Para estabelecer a comunicação entre o PC e os sensores e atuador presentes na plataforma, foram utilizados dois elementos: a placa NI PCI6036E que foi ligada na porta

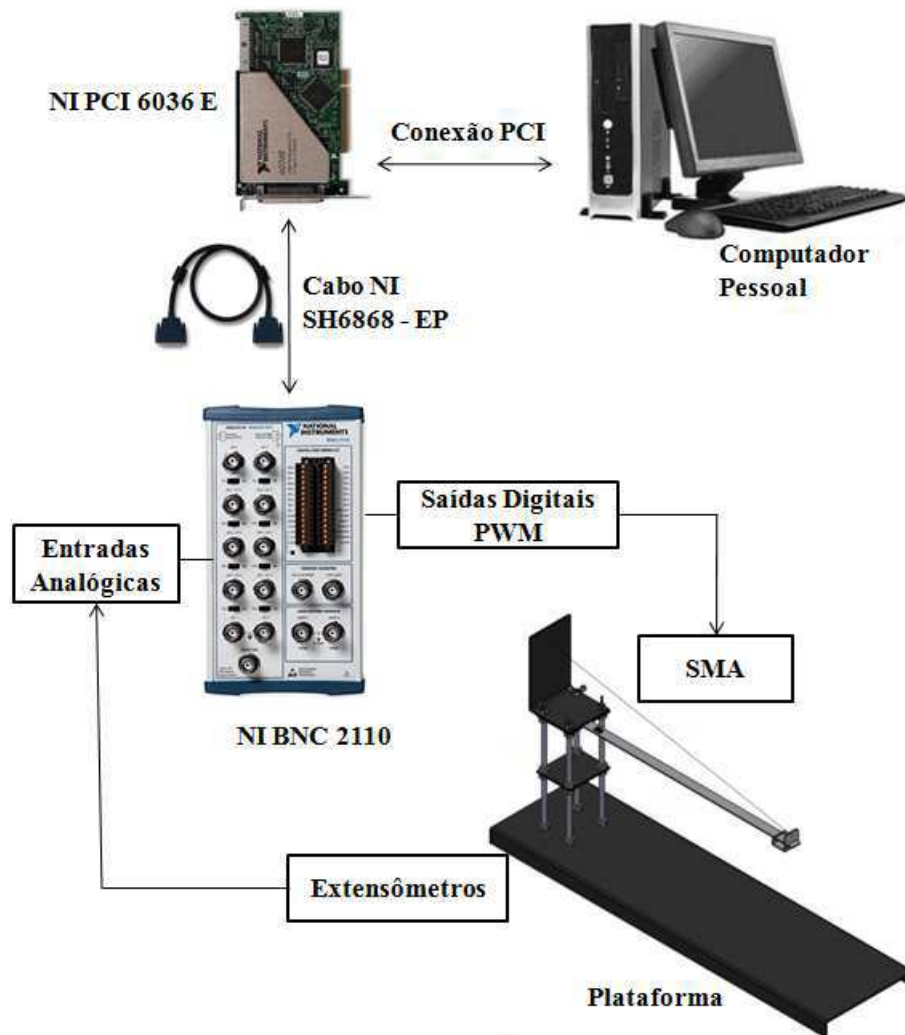


Figura 22: Representação do fluxo de dados, expondo como os elementos do sistema estão ligados entre si.

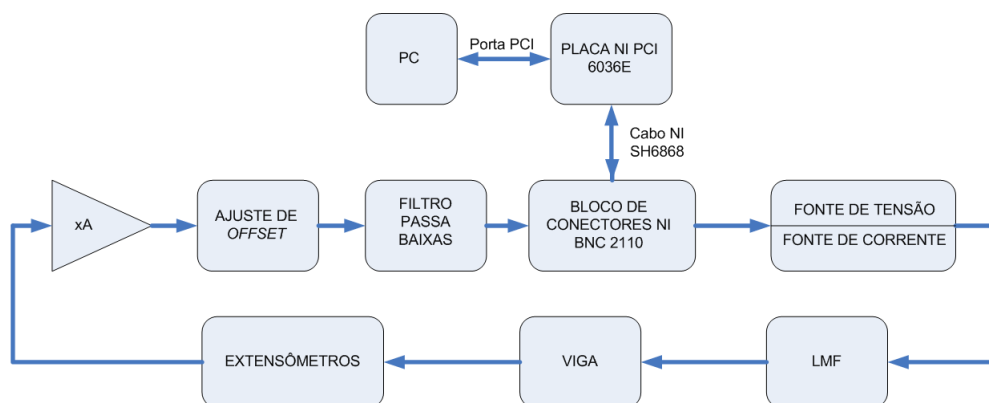


Figura 23: Fluxograma representativo do sistema como um todo.

PCI-e do microcomputador, e um bloco de conectores BNC 2110. Foram empregados os conectores BNC para ligar os sensores ao bloco. A placa 6036E oferece as seguintes funcionalidades:

- 16 entradas analógicas com taxa de até 200 kS/s (mil amostras por segundo), com resolução de 12 ou 16 bits;
- Até 2 saídas analógicas com taxa de até 10 kS/s , com resolução de 12 ou 16 bits;
- 8 linhas de E/S digital (TTL/CMOS);
- 2 timers de 24 bits;
- Intervalo máximo de tensão: -10 V à 10 V;
- Memória interna para 512 amostras;
- Taxa de atualização: 10 kS/s;
- Sincronização via software;
- Frequência máxima da fonte: 20 MHz;
- Gerador de pulso com duração mínima de 10 ns;
- Triggering digital;
- 4 intervalos de sinal nas entradas analógicas;
- Integração com LabVIEW, LabWindows/CVI, and Measurement Studio for Visual Basic [7].

O bloco de conectores simplifica a conexão de sinais analógicos, alguns sinais digitais e com a placa PCI 6036 enquanto mantém a integridade das medições com um invólucro blindado. O modelo do bloco é NI BNC 2110, fabricado pela National Instruments, com as seguintes características [8]:

- Conectores BNC para entradas e saídas analógicas;
- Bloco de conexões para entradas e saídas/digitais e contadores/temporizadores;
- *Interface* para dispositivos analógicos National Instruments da séries: X Series, M Series, E Series e S Series;
- Invólucro blindado.

## 3.5 Ferramenta de programação: LabVIEW

O terceiro elemento, que completa a interface descrita nesta seção, é um *software* de instrumentação virtual, desenvolvido pela National Instruments, chamado LabVIEW. Esta foi uma ferramenta bastante utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho. Este *software* deve permanecer sendo executado em um computador, ligado à placa 6036 usando a porta de comunicação PCI-e.

As aplicações desenvolvidas utilizando este *software* são chamadas de VIs. Um VI pode conter inúmeras instruções, que permitem realizar diversas operações e funções. A programação de um VI é feita em linguagem ‘G’, a qual é uma linguagem gráfica de programação de fluxo de dados de alto nível. O fabricante aponta algumas vantagens da instrumentação virtual, relacionada com instrumentos tradicionais: melhor performance, menor custo e maior flexibilidade [22][23]. Maiores informações sobre a programação em G estão apresentadas no Anexo A deste trabalho.

Um programa feito em LabVIEW é dividido em duas partes: um diagrama de blocos e uma janela de interface de usuário (*G User Interface* - GUI). A GUI é a janela onde o usuário final irá trabalhar, inserir e extrair dados. É a janela que fica exibida na tela enquanto o programa é executado, onde são mostradas as entradas e saídas, sejam na forma de campos, barras deslizantes ou gráficos. O diagrama de blocos é a janela de programação, onde serão definidas todas as relações entre as entradas e as saídas do VI. Na janela de diagrama de blocos é feita a programação propriamente dita, podendo incluir laços de repetição *for* ou *while*, estruturas de decisões, como *if*, entre outras opções.

Um VI básico que foi desenvolvido para experimentar as funções da plataforma desta pesquisa trabalha com um recurso do LabVIEW chamado “DAQ”, que permite leitura e escrita de dados através das placas de comunicação citadas acima. É através destes recursos que é feita a leitura dos dados dos sensores, bem como a escrita de ordens de acionamento dos atuadores. No Anexo A também são apresentados detalhes acerca de todas as funções “DAQ” utilizadas neste trabalho.

Na Figura 24 está ilustrada a janela GUI de um programa básico que pode fazer a leitura de todas as grandezas envolvidas, bem como acionar o atuador de liga com memória de forma.

No campo de entrada ‘A’ deve ser informada a frequência desejada dos pulsos de PWM gerados; a entrada deslizante ‘B’ representa o valor do *duty cycle* desejado para acionar o fio/fita de LMF; o botão ‘C’ pára a execução do programa. A área ‘D’ permite

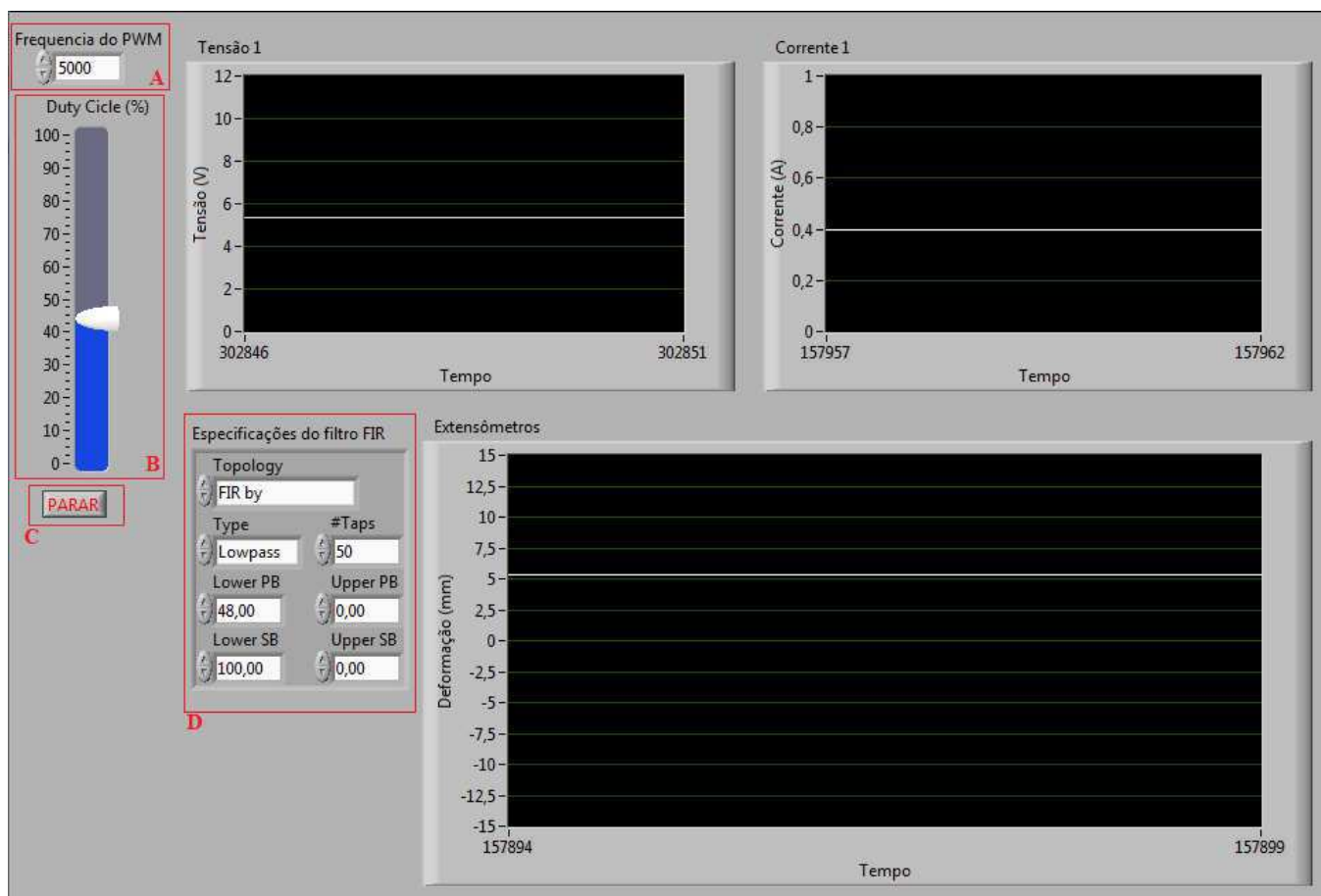


Figura 24: Janela de um programa básico em LabVIEW, que faz leituras de todos os sensores e é capaz de acionar qualquer dos atuadores.

especificar os parâmetros usados no projeto do filtro digital pelo qual está passando o sinal dos extensômetros. Os gráficos mostram a evolução das grandezas medidas ao longo do tempo.

Fica claro que VIs bem mais elaborados podem ser criados nesse *software*. É possível criar VIs para controlar um determinado processo, VIs que tracem outros tipos de gráficos, relacionando as grandezas entre si e até VIs que estabeleçam comunicação com outros softwares. As possibilidades seguem as idéias do desenvolvedor.

### 3.5.1 Aquisição de dados e geração de sinais

#### 3.5.1.1 Aquisição do sinal dos extensômetros

Para adquirir dados sobre a deformação sofrida pela viga de aço foi usada a informação fornecida pelos extensômetros colados na mesma. Essa informação é recebida do circuito de condicionamento de sinal mencionado na seção anterior. Para que essa informação chegue ao PC, é necessário que haja um “pedido” por parte do LabVIEW, por meio da placa PCI. A placa recebe esse “pedido” e retorna um valor em milivolts ( $mV$ ) correspondente à leitura do sensor no bloco de conexões BNC. Cabe ao programador do VI interpretar esse valor em milivolts e traduzí-lo na unidade de grandeza desejada. O diagrama de blocos mostrado na Figura 25 representa a parte da programação em que o sinal de tensão é adquirido em  $mV$ , e faz-se a transformação de unidades para  $\mu m/mm$ , como já mencionado e descrito na Equação 3.11.

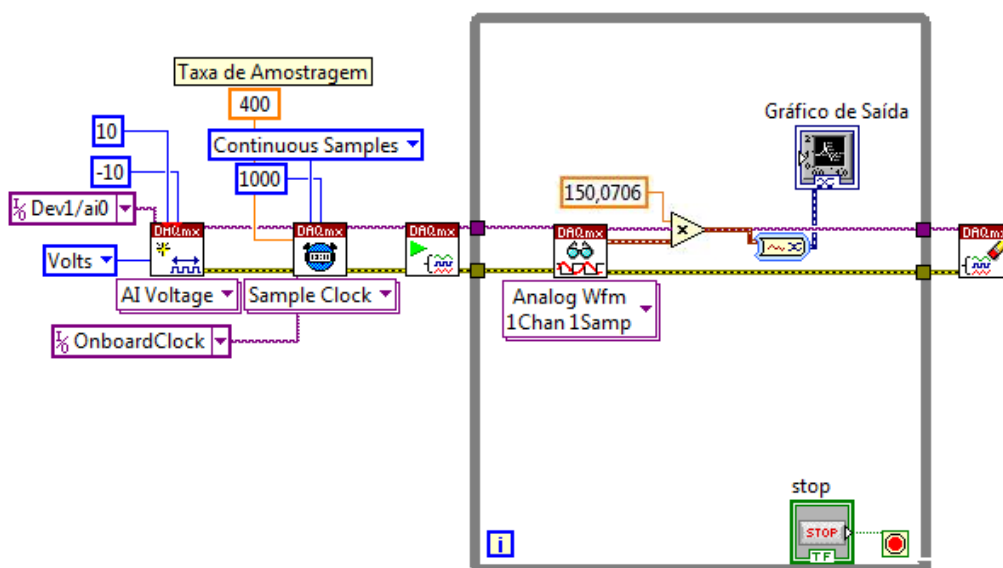


Figura 25: Diagrama de blocos para aquisição da deformação da viga de aço.

Como pode ser observado, existe um bloco DAQmx *Create*, usando como entrada o canal “Dev1/ai0”, que significa que o canal criado irá ler amostras do *Device 1* (Dispositivo 1, neste caso o único conectado à placa é o bloco de conectores BNC), terminal **ai0**, que é o primeiro terminal BNC disponível no bloco. O segundo bloco é um DAQmx *Timing*, especificando qual o *clock* que deve ser usado, no caso o próprio *clock onboard* da placa, definindo que as amostras devem ser lidas continuamente, e que deve ser usada uma taxa de amostragem de 400 *Hz*. O terceiro bloco é um DAQmx *Start*, que irá iniciar o funcionamento do canal e disponibilizá-lo para leituras de amostras.

A estrutura seguinte é um *while loop*, de modo que as instruções em seu interior repetir-se-ão continuamente até que o usuário dê o comando *stop* na tela GUI. O primeiro bloco no interior do *while* é um DAQmx *Read*, configurado para fazer a leitura de uma única amostra em um único canal (canal este especificado no primeiro bloco do VI, DAQmx *Create*). O bloco seguinte é um bloco de exibição das amostras lidas, em forma de gráfico, como mostrado na Figura 26. Fazendo apenas uma leitura, a tarefa é executada rapidamente e o *loop* repete-se, criando um sinal de tensão que representa a deformação da viga de aço.

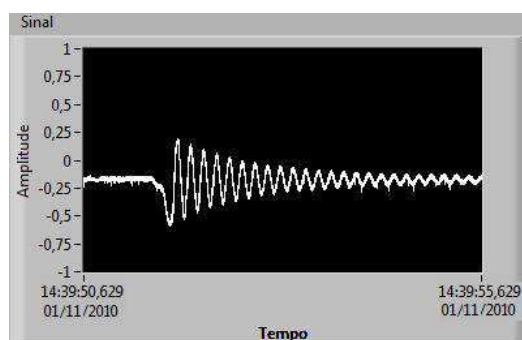


Figura 26: Sinal da deformação linear vista na janela de usuário. Neste caso, ilustrando a viga voltando à posição de equilíbrio após sofrer uma perturbação.

### 3.5.1.2 Acionamento do fio de LMF

O fio/fita de LMF deve ser acionado nas condições descritas anteriormente. Ou seja, na entrada no circuito de acionamento, deve haver um sinal PWM com ciclo de trabalho variável, onde o percentual do ciclo corresponderá ao percentual da corrente máxima a ser aplicada no fio ou na fita. O processo como um todo ocorre então da seguinte maneira:

- Um valor de *duty cycle* é gerado no software LabView;
- Este valor é passado para a placa PCI6036, que disponibiliza o sinal no bloco de

conectores BNC 2110;

- O sinal no bloco de conectores tem seu *duty cycle* atualizado de acordo com o valor gerado;
- O fio ou fita de LMF contrai-se ou estende-se de acordo com os comandos dados pelo VI do LabView;

Para gerar estes valores, pode ser usado o trecho de programação mostrado na Figura 27.

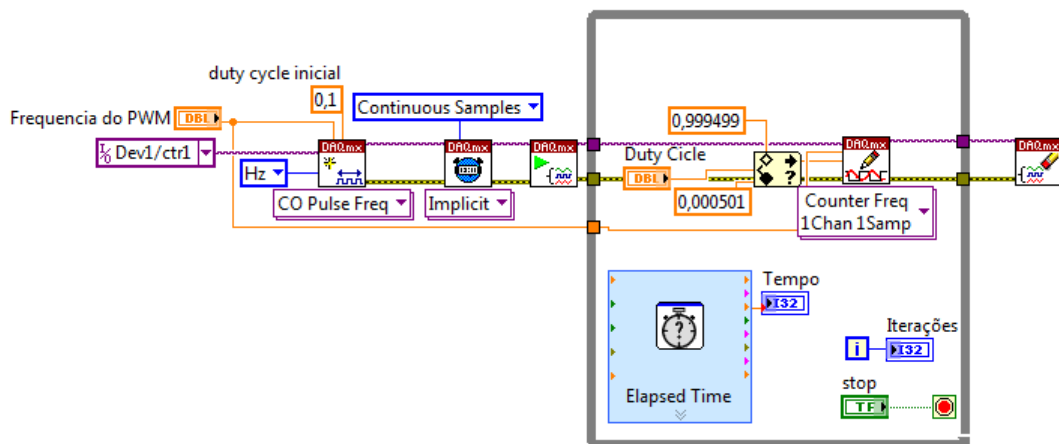


Figura 27: Parte do VI que gera o sinal PWM e o envia para o fio ou fita de LMF.

O primeiro bloco na Figura 27 é um DAQmx *Create*, usado para criar um canal virtual de escrita de dados. A configuração usada é como gerador de pulsos com frequência definível pelo usuário. A entrada **Dev1/ctrl1** significa que o canal será criado utilizando o dispositivo 1 (a placa PCI acoplada ao bloco BNC), especificamente o terminal **ctrl1** (primeiro terminal de saídas digitais reservado para funções que utilizam o relógio). É necessário também especificar neste bloco o valor inicial do ciclo de trabalho do PWM. O bloco seguinte é um DAQmx *Timing*, para configurar a geração como sendo de modo contínuo. Logo após, temos o bloco DAQmx *Start* que dá início ao funcionamento do canal, seguido de um laço *while*.

É importante atentar a um fato em relação aos limites superior e inferior do *duty cycle* do sinal PWM que aciona a fita/fio. Existe uma duração mínima do pulso gerado na saída da placa PCI-6036e, sendo impossível gerar um pulso com duração menor que 10 ns. Isso acarreta um limite dos valores de *duty cycle* que vão variar de acordo com a frequência desejada do sinal. Neste caso, para uma frequência de 5 kHz, o pulso de 10 ns equivale a um *duty cycle* mínimo de 0,00051 %. O mesmo ocorre para o limite superior, onde a



duração máxima do pulso em nível baixo de 10 ns equivale a um *duty cycle* máximo de 99,99949 %. É importante ter conhecimento desse fato, de modo a evitar tentativas de gerar valores de *duty cycle* de 0% ou de 100%, onde ocorreriam erros internos tanto na execução do VI quanto na geração do sinal PWM na saída digital da placa PCI6036e.

Por esta razão, o bloco DAQmx *Write*, visto dentro do laço *while*, responsável pela escrita do *duty cycle* a cada iteração, está precedido por um bloco de limitação de valores. A barra deslizante que representa essa entrada pode ser visualizada na Figura 28, onde pode ser visto o conjunto de entradas que configuram a geração do sinal PWM na janela GUI.

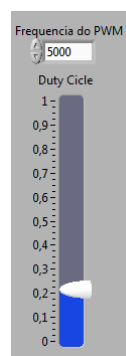


Figura 28: Barra deslizante que configura o *duty cycle* do PWM.

### 3.5.2 Filtragem Digital

Seja qual for o tipo de instrumentação, existe um fenômeno que está presente em todas as medições, o ruído, seja em maior ou menor escala. Ao fazer a medição dos sinais dos extensômetros, também foi observado a presença de ruído. Para amenizar esse fator, lançou-se mão de um bloco do LabView que implementa um filtro digital FIR (*finite impulse response* - resposta ao impulso finita). Como pode ser visto na Figura 29, o bloco possui uma entrada para o sinal a ser filtrado, e uma saída onde o filtro já foi aplicado. As especificações do filtro devem ser informadas pelo usuário, por via de um conjunto de campos na janela GUI, como ilustrado na Figura 30.

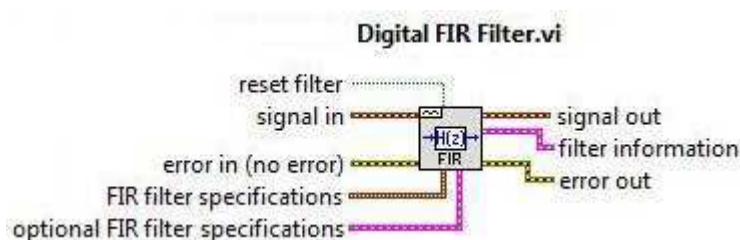


Figura 29: Filtro Digital FIR.

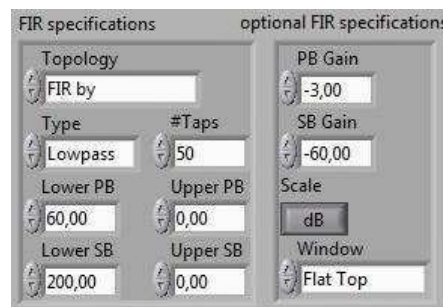


Figura 30: Campos para especificações do filtro digital.

Como se observa na Figura 30, são diversas as opções de configuração do filtro, devendo haver o projeto dos valores de frequências de corte e de passagem, atenuações máximas e mínimas, tipo de filtro a ser usado e ordem do filtro. Um recurso interessante desta função é o fornecimento dos diagramas de bode do filtro utilizado. Para exemplificar o uso desse bloco, mostra-se um VI de filtragem digital de um sinal lido dos extensômetros, apresentando a janela GUI na Figura 31.

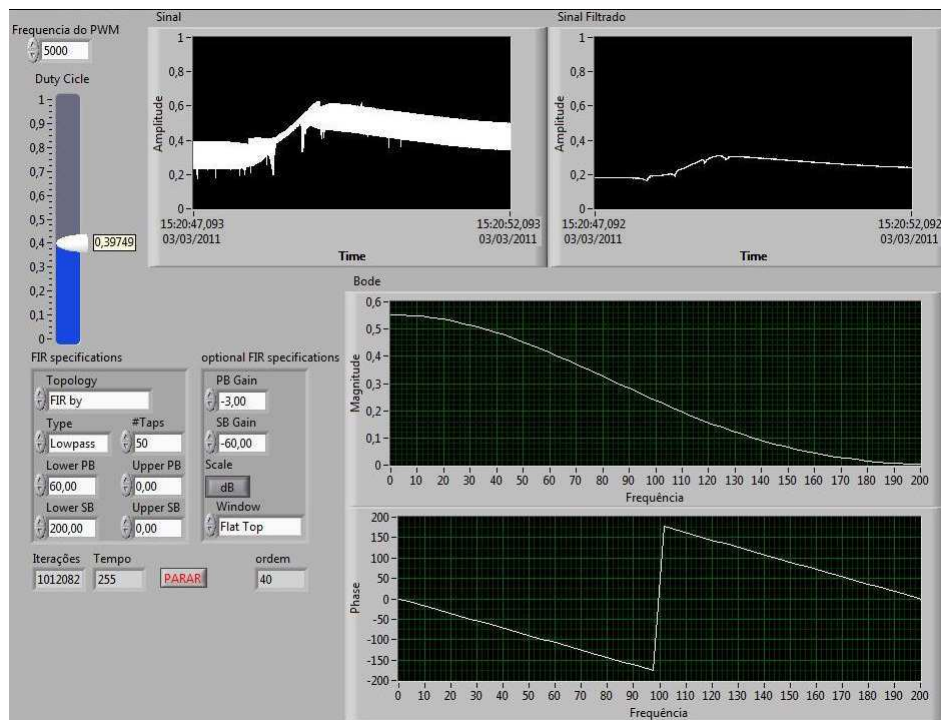


Figura 31: VI para filtragem digital de um sinal. Janela GUI e janela de programação.

Esta é uma etapa de grande importância na medição, pois permite uma leitura mais precisa dos sinais adquiridos, reduzindo o ruído presente e possibilitando a utilização de técnicas de controle sobre o sistema em questão.

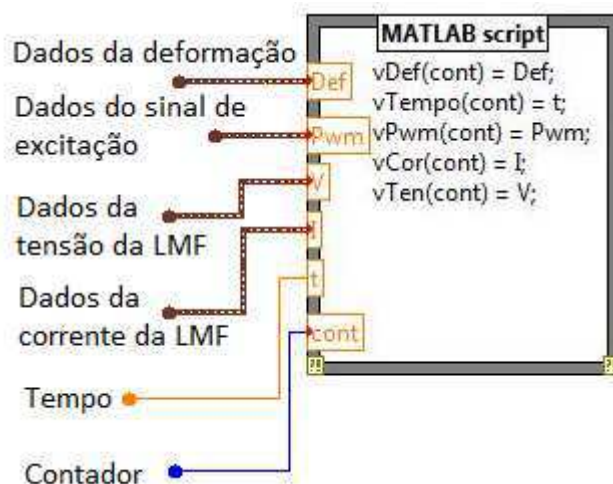


Figura 32: Construção de três vetores a partir de dados vindos das leituras dos sensores.

## 3.6 Integração com MatLab

Após ter sido realizado o ensaio, é de interesse que os dados obtidos durante o experimento possam ser armazenados para verificação posterior. Isto é feito usando uma ferramenta do LabVIEW que permite uma integração deste *software* com um outro chamado MatLab (*Matrix Laboratory*). O MatLab é uma poderosa ferramenta criada pela empresa MathWorks. O programa permite a armazenagem dos dados em *arrays* e também permite traçar gráficos em duas ou três dimensões. O bloco em LabVIEW que faz a interação com o MatLab é o “MatLab Script”. Observa-se na Figura 32 um bloco que foi projetado para construir os *arrays* de deformação, do sinal de excitação, da tensão e corrente aplicadas à LMF.

O MatLab Script foi usado para recolher os dados de todas as amostras obtidas durante o ensaio e criar um arquivo contendo todas as informações recolhidas, separadas em *arrays*. Este arquivo pode ser consultado a qualquer momento, mesmo depois que o LabVIEW é fechado.

## Controle de deformação

Neste capítulo, são apresentados modelos para o sistema estudado, assim como são expostas duas formas para sintonizar os parâmetros de um controlador PID para o sistema viga-LMF. Ainda, alguns critérios de avaliação dos controladores são explanados, de modo que pode-se utilizá-los a título de avaliação de viabilidade e desempenho das técnicas de controle implementadas.

### 4.1 Identificação

Em muitos casos, os esforços dos engenheiros de controle recaem num procedimento do tipo passo-a-passo como a seguir:

1. Estudar o sistema (planta) a ser controlado e obter algumas informações iniciais acerca dos objetivos de controle;
2. Modelar o sistema;
3. Analisar o modelo e determinar suas propriedades;
4. Decidir quais variáveis deverão ser controladas;
5. Tomar decisões acerca das medições e possíveis manipulações sobre as variáveis: que sensores e atuadores serão usados e onde estarão alocados;
6. Escolher a configuração de controle;
7. Escolher o tipo de controlador a ser utilizado;

8. Decidir as especificações de performance, baseado nos objetivos gerais de controle;
9. Projetar o controlador;
10. Analsar o sistema controlado resultante, para verificar se as especificações foram atendidas;
11. Simular o sistema controlado;
12. Repetir os passos desde o passo 2, se necessário;
13. Escolher os itens de *hardware* e *software* e implementar o controlador;
14. Testar e validar o sistema de controle, e sintonizar manualmente o controlador, se necessário.

Obviamente, não são todos os projetos de controle que seguem rigorosamente esses passos. Na realidade, muitos sistemas reais de controle são projetados usando apenas sintonia manual (envolvendo os passos 1, 4, 5, 6, , 13 e 14)[24]. Porém, para que o projeto do controlador seja mais completo, é necessário conhecer o comportamento e/ou propriedades do processo a ser controlado. Para tal, existem alguns métodos por meio dos quais pode-se identificar uma planta que represente determinado processo e desenvolver um modelo. Se for possível conhecer a resposta de um sistema a uma determinada excitação, tornar-se-á mais adequado o projeto dos controladores.

A identificação de um sistema envolve uma série de procedimentos e escolhas que podem afetar diretamente a qualidade dos resultados.

#### 4.1.1 Coleta de informações sobre o sistema

Para desenvolver um modelo para um sistema, deve-se coletar informações sobre o mesmo. Isto pode ser feito apenas pela observação das variações naturais (como por exemplo, análise da vibração de uma ponte que é excitada por um tráfego normal), mas muitas vezes é mais eficiente escolher experimentos dedicados que excitem o sistema objetivamente (como por exemplo, excitação controlada de uma estrutura mecânica usando um agitador). Neste último caso, o usuário tem que escolher uma excitação que otimize sua própria meta (por exemplo, mínimo de custo, tempo ou consumo de energia para uma dada medição) com restrição do operador (por exemplo, a excitação ficaria abaixo do nível máximo permitido). A qualidade do resultado final pode depender seriamente das escolhas feitas [25].

Para identificar o sistema apresentado neste trabalho, aplicou-se um sinal PRBS (*Pseudo-Random Binary Signal*) na entrada, e tanto o sinal de entrada como a resposta do sistema foram guardados para análise. A identificação foi feita de duas maneiras, como descritas a seguir.

### 4.1.2 Identificação de um modelo

O LabVIEW oferece alguns blocos úteis no âmbito da identificação de sistemas, e o primeiro deles que foi utilizado foi o '*Estimate Transfer Function Model*', que deve estimar um modelo para a função de transferência do sistema. Este bloco está ilustrado na Figura 33.

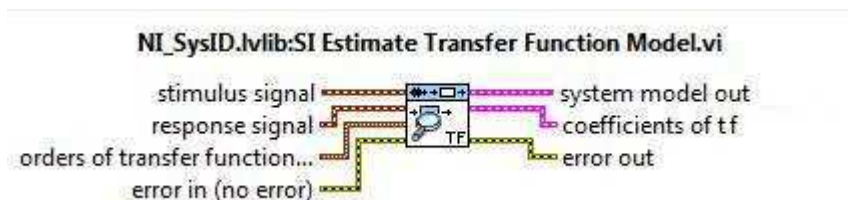


Figura 33: Bloco para estimar um modelo de função de transferência.

Para utilizá-lo, devemos ter um sinal de estímulo, e o sinal de resposta a este estímulo. Também devem ser previamente informadas as ordens do numerador e do denominador da função de transferência.

Outra opção no processo de identificação é estimar modelos a partir de uma função pertencente ao *software* MatLab, chamada '*Ident*'. Do mesmo modo, são necessários os sinais de estímulo, as respostas a esses estímulos, e alguns parâmetros iniciais para o cálculo dos modelos.

## 4.2 Controle Proporcional, Integral Derivativo (PID)

O sistema apresentado neste trabalho pode ser representado, em termos de controle, de forma simples, pelo diagrama de malha ilustrado na Figura 34.

O tipo de controlador mais largamente utilizado industrialmente é o controlador PID, também chamado de controlador de três termos, por se tratar de um termo de controle proporcional (P), um termo integral (I) e um termo derivativo (D). Este tipo de controlador tem uma longa história de utilização e sobreviveu às mudanças de tecnologia da era analógica para a era digital, com desempenho ainda satisfatório. Foi o primeiro tipo de

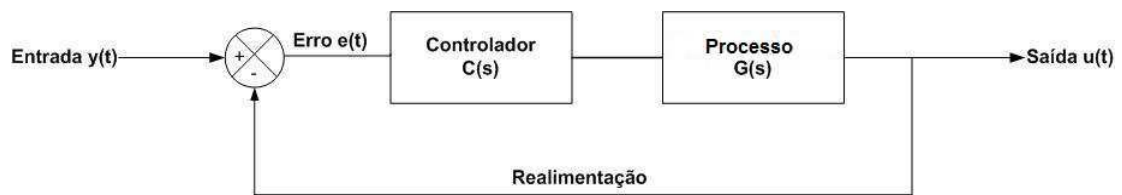


Figura 34: Malha de controle do sistema estudado.

controlador a ser produzido em massa para um mercado de alto volume de consumo [26]. Por esta razão, e por ser um tipo clássico de controlador, é esta a primeira técnica de controle utilizada neste trabalho.

O diagrama de malha apresentado na Figura 34 pode ser mais detalhado, separando elementos e especificando melhor as partes do sistema, resultando na representação da Figura 35.

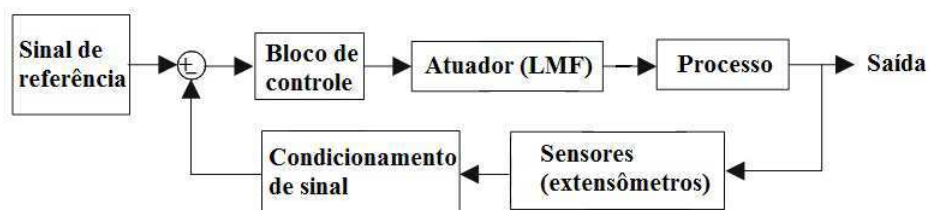


Figura 35: Malha de controle detalhada do sistema estudado.

O bloco de controle abrange o tipo de controlador a ser utilizado. No caso de um controlador do tipo PID, tem-se o detalhamento do bloco de controle como sendo o apresentado na Figura 36.

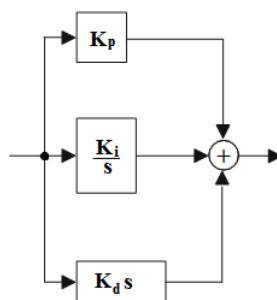


Figura 36: Representação de um bloco de controle PID.

Neste bloco de controle o termo proporcional está representado por um parâmetro  $K_p$ , o termo integral representado no domínio da frequência pela transformada de Laplace  $[\frac{1}{s}]$  e um parâmetro  $K_i$ , e o termo derivativo, igualmente representado no domínio da frequência pela transformada de Laplace  $[s]$  e um parâmetro  $K_d$ .

### 4.2.1 Controle Proporcional

O controle proporcional é denotado pelo termo 'P' no controlador PID. É usado quando a ação do controlador deve ser proporcional ao tamanho do sinal de erro do processo, onde o erro é definido pela equação 4.1.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.1)$$

onde  $r(t)$  é o sinal de referência e  $y(t)$  é o sinal medido por meio dos sensores. As representações do controle proporcional, no domínio do tempo e no domínio da frequência, são dadas, respectivamente, pelas equações 4.2 e 4.3.

$$u_c(t) = K_p \int^T e(t) \quad (4.2)$$

$$U_c(s) = K_p E(s) \quad (4.3)$$

onde o ganho proporcional é dado por  $K_p$ . Na Figura 37, estão apresentados os diagramas de blocos para o controle proporcional.

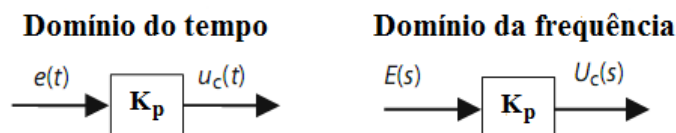


Figura 37: Diagramas de blocos: termo de controle proporcional.

### 4.2.2 Controle Integral

O controle integral é denotado pelo termo 'I' no controlador PID. É usado quando é necessário que o controlador corrija qualquer valor de *offset* em regime permanente, a partir de um valor constante do sinal de referência. O controle integral supera as deficiências do controle proporcional no que diz respeito à eliminação de erro de *offset*, sem utilizar ganhos excessivamente altos para o controlador. As representações, no domínio do tempo e no domínio da frequência, do controle integral são apresentadas, respectivamente,



nas equações 4.4 e 4.5.

$$u_c(t) = K_i \int e(\tau) d\tau \quad (4.4)$$

$$U_c(s) = \left[ \frac{K_i}{s} \right] E(s) \quad (4.5)$$

onde  $K_i$  é o ganho do controlador integral. Na Figura 38, estão representados os diagramas de blocos para o controle integral.



Figura 38: Diagramas de blocos: termo de controle integral.

### 4.2.3 Controle Derivativo

Se em um controlador, for possível usar como sinal de entrada a taxa de variação de erro do processo, então isto introduz um elemento de predição na ação de controle. No controle derivativo, usa-se a taxa de variação do sinal de erro na tomada de decisões de controle. Este termo é representado pelo 'D' num controlador PID. As representações do controle derivativo, no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, são apresentadas nas equações 4.6 e 4.7.

$$u_c(t) = K_d \frac{de}{dt} \quad (4.6)$$

$$U_c(s) = [K_d s] E(s) \quad (4.7)$$

onde o ganho de controle derivativo é dado por  $K_d$ . Esta forma particular de controle é por vezes chamada de controle puramente derivativo, cujos diagramas de blocos são ilustrados na Figura 39.

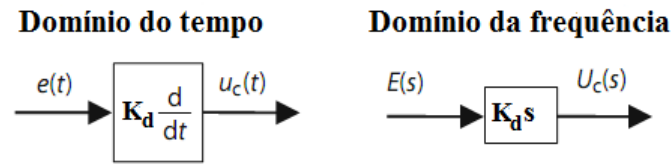


Figura 39: Diagramas de blocos: termo de controle derivativo.

Para usar o controle derivativo, um pouco mais de cuidado é necessário do que quando se usa controle proporcional ou integral. Por exemplo, na maioria das aplicações reais, um controlador puramente derivativo não pode ser implementado por causa de possível amplificação do ruído na medição, sendo necessária uma modificação no termo derivativo. Entretanto, o controle derivativo tem recursos de projeto úteis e é elemento essencial de algumas aplicações de controle reais; por exemplo, a realimentação do tacogerador no controle de um motor CC (corrente contínua) é uma forma de controle derivativo.

#### 4.2.4 Por quê o controle PID é importante?

O controle PID permanece uma importante ferramenta de controle por três razões: histórico de sucesso, ampla disponibilidade e simplicidade de utilização. Estas razões reforçam umas às outras, de modo que quadros gerais de controle digital com controladores de maior ordem não foram ainda capazes de substituir o controle PID. É realmente apenas quando a situação do processo requer um controlador mais sofisticado ou uma solução de controle para controlar um processo mais complexo que os engenheiros de controle usam técnicas mais avançadas. Mesmo nos casos onde a complexidade do processo requer várias malhas ou soluções de controle multivariável, uma rede com base em blocos de controle PID é frequentemente utilizada [26].

#### 4.2.5 Métodos de Sintonia

##### 4.2.5.1 Métodos de Ziegler-Nichols

A escolha dos parâmetros do controlador,  $K_p$ ,  $K_i$ , e o  $K_d$  pode ser feita em termos de constantes de tempo, ao invés de parâmetros multiplicativos. As constantes de tempo podem ser calculadas como apresentado nas equações 4.8 e 4.9.

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (4.8)$$

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	1 / RD	-	-
PI	0,9 / RD	D / 0,3	-
PID	1,2 / RD	2D	0,5D

Tabela 2: Parâmetros PID de Ziegler-Nichols usando o método de reação do processo.

$$T_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (4.9)$$

Na década de 1940, Ziegler e Nichols (1942) desenvolveram dois métodos empíricos, que continuam em uso, para obter essas constantes.

#### *Método de Reação do Processo*

Este método é baseado no pressuposto de que a resposta ao degrau em malha aberta da maioria dos sistemas tem uma forma de S, chamada de curva de reação do processo, como ilustrado na Figura 40. A curva de reação pode ser aproximada por um atraso no tempo D (por vezes chamado de atraso de transporte) e um sistema de primeira ordem da inclinação tangencial máxima R, também apresentada na Figura 40.

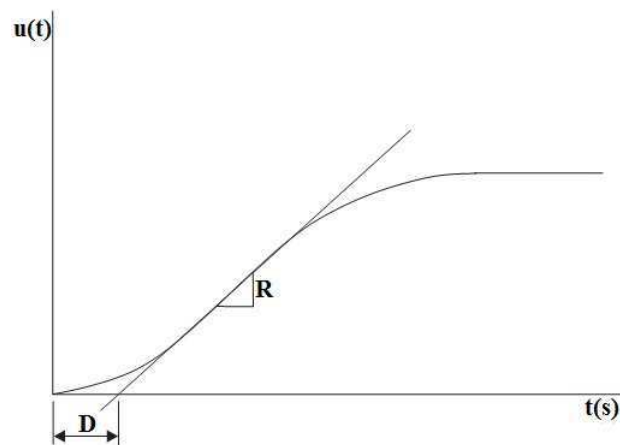


Figura 40: Curva de reação de processo.

O método de reação do processo assume que a resposta ótima para o sistema de malha fechada ocorre quando a razão de picos sucessivos é de 4 para 1. Isto ocorre quando a taxa de amortecimento em malha fechada tem um valor igual a 0,21 [27]. Os parâmetros do controlador, como funções de R e D, de modo a produzir este tipo de respostas, são dados na Tabela 2.

A desvantagem deste método é que ele não pode ser usado em casos onde a resposta ao degrau em malha aberta tiver sobresinal, ou contiver um integrador puro.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$K_f / 2$	-	-
PI	$K_f / 2,2$	$T_f / 1,2$	-
PID	$K_f / 1,7$	$T_f / 2$	$T_f / 8$

Tabela 3: Parâmetros PID de Ziegler-Nichols usando o método de ciclo contínuo.

*Método de Ciclo Contínuo*

Esta é uma técnica de malha fechada na qual, usando apenas controle proporcional, o ganho  $K_p$  do controlador é incrementado até que a saída controlada do sistema,  $u(t)$ , oscile continuamente com amplitude constante, como um sistema de segunda ordem sem amortecimento. Esta condição é referida como estabilidade marginal [27]. Este valor de ganho encontrado é chamado de ganho final  $K_f$ , e o período da oscilação de  $u(t)$  é chamada de período final  $T_f$ . Os parâmetros do controlador, como função de  $K_f$  e  $T_f$ , para se ter uma resposta em malha fechada similar ao método de reação do processo, são dados na Tabela 3.

Ambos os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols proporcionam aproximações emíricas úteis. O método de reação do processo é mais fácil de implementar. Na prática, as medições de R e D são muito subjetivas e podem ser causa de erros. O método de ciclo contínuo, embora mais disruptiva, pode proporcionar melhores resultados. Existe o risco, entretanto, particularmente em macanismos de alta performance, de que se o ganho  $K_f$  for incrementado por acidente para além do limite de estabilidade marginal, então pode ocorrer instabilidade total, resultando em danos para o sistema [27].

**4.2.5.2 Sintonia pelo método de cancelamento de pólos**

Outra técnica de sintonia de controladores PID largamente utilizada é o método de cancelamento de pólos, onde o pólo mais lento da função de transferência em malha aberta do sistema é cancelado com os zeros do controlador. Tendo uma função de transferência, é possível projetar um controlador PID adequado ao sistema.

Admitindo um modelo de primeira ordem:

$$G(s) = \frac{K e^{-st_d}}{(1 + T_p s)} \quad (4.10)$$

onde  $t_d$  representa o atraso de transporte do sistema, e  $T_p$  é a constante de tempo do

sistema. Usando a aproximação de Euler, pode-se escrever:

$$e^{-st_d} = \frac{1}{1 + st_d} \quad (4.11)$$

$$G(s) = \frac{K}{(1 + T_p s)} \frac{1}{(1 + st_d)} \quad (4.12)$$

Para o controlador PI, temos:

$$C(s) = \frac{K_i \left( \frac{sK_p}{K_i} + 1 \right)}{s} \quad (4.13)$$

Então, a Função de Transferência de Malha Aberta (FTMA) é:

$$G(s)C(s) = \frac{K K_i \left( \frac{sK_p}{K_i} + 1 \right)}{(1 + T_p s)(1 + st_d)} \quad (4.14)$$

Por eliminação de pólos, deve-se fazer:

$$T_p = T_i \Rightarrow \frac{K_p}{K_i} = T_p \Rightarrow K_p = K_i T_p \quad (4.15)$$

E para a Função de Transferência de Malha Fechada (FTMF) tem-se:

$$FTMF = \frac{\frac{K K_i}{s(1+st_d)}}{1 + \frac{K K_i}{s(1+st_d)}} = \frac{K K_i}{s^2 + sT_d + K K_i} \quad (4.16)$$

Como é desejável que se tenham pólos reais e idênticos:

$$\Delta = 0 \Rightarrow 1 - 4T_d K K_i = 0 \quad (4.17)$$

De modo que:

$$K_i = \frac{1}{4T_d K} \quad (4.18)$$

### 4.2.6 Controle PID auto-sintonizado

Tendo um sistema a partir do qual obtém-se informações de uma grandeza usando sensores, e é possível atuar sobre essa mesma grandeza com o auxílio de um atuador, tornou-se factível gerenciar a variação desta mesma grandeza usando técnicas de controle. No caso da plataforma aqui analisada, tem-se sensores de deformação da viga, e uma fita de LMF atuando sobre a mesma, o que possibilita planejar e projetar um controle de malha fechada sobre o sistema.

O LabView oferece uma ferramenta específica para a técnica de controle proporcional, derivativo e integral (PID), em um único bloco, onde é possível especificar os ganhos de cada componente do controlador. Entretanto, caso ainda não se tenha uma planta do sistema, ou seja, não tenha havido um processo de identificação, a função PID *Autotuning* (auto-sintonia PID) oferece uma opção de ajuste dos parâmetros automaticamente, baseado apenas nas entradas e saídas apresentadas. Esta função utiliza um dos métodos de sintonia propostos por Ziegler-Nichols, o método de ciclo contínuo, também conhecido como limite de estabilidade.

De acordo com o manual de utilização desta função [28], a sintonia automática pode ser usada para melhorar o desempenho do controlador. Controladores PID são difíceis de sintonizar quando não se conhece a dinâmica do processo. Neste caso, é recomendável utilizar a sintonia automática. Antes de iniciar o processo de sintonia, é necessário estabelecer no mínimo um controlador que seja capaz de manter o sistema em um estado de estabilidade, mesmo que não seja possível sintonizar apropriadamente o controlador.

O bloco ilustrado na Figura 41 funciona da seguinte maneira:

- No terminal '*setpoint*', deve ser inserido um sinal que servirá como referência com a qual o sinal de saída deve ser comparado;
- No terminal '*process variable*', deve ser inserido o sinal da variável a ser controlada no processo. No caso deste trabalho é o sinal proveniente dos extensômetros, correspondendo à deformação da viga de aço;
- No terminal '*output range*', devem ser informados os limites que o sinal de saída é capaz de atingir (o que permite a implementação de controle com restrições);
- No terminal '*PID gains*', devem ser inseridos os ganhos dos componentes proporcional, integral e derivativo do controlador, caso estes já tenham sido projetados;

- No terminal 'autotuning parameters', pode ser conectado um botão lógico que, ao pressionado, inicia a auto-sintonia do controlador, baseado nos sinais de entrada, da referência e de saída;
- A saída 'output' fornece exatamente o sinal de saída do sistema.

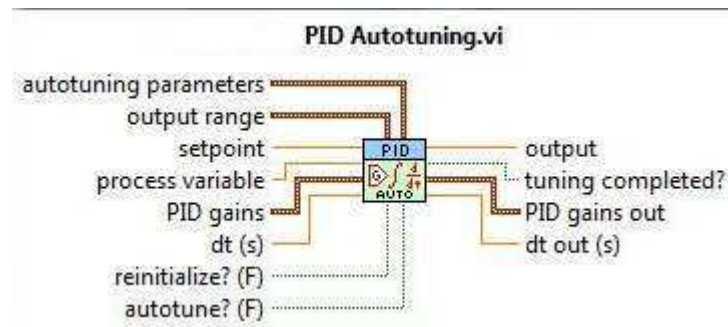


Figura 41: Auto-tuning PID.

Durante a auto-sintonia, é possível analisar a relação sinal-ruído do sinal de entrada, a estabilidade, ajustar o tipo de controlador desejado, entre outras opções. Para ilustrar o processo, está apresentada na Figura 42 a janela de usuário de um VI elaborado para realizar o controle de deformação da viga engastada, utilizando o princípio da sintonia automático dos parâmetros do controlador.

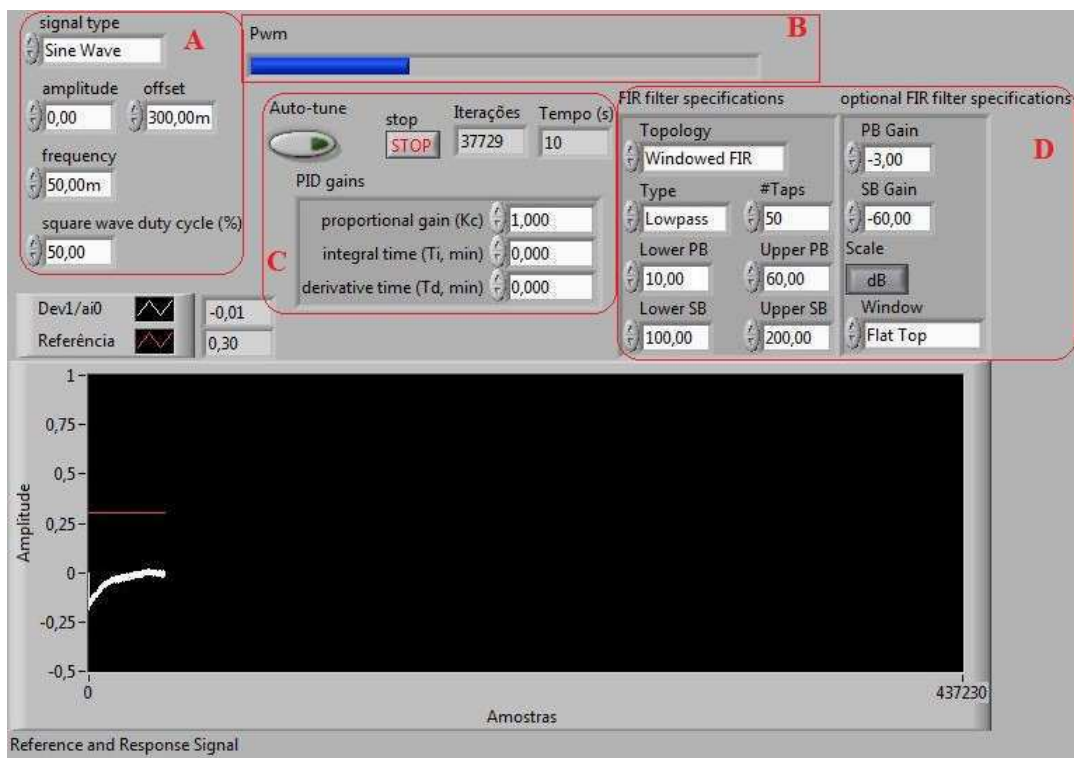


Figura 42: Janela de usuário (GUI) de um VI elaborado para realizar controle PID.

No detalhe 'A', são apresentadas as variáveis que devem ser estabelecidas para determinar o tipo do sinal de referência. Este sinal será o *set point* do controlador. O detalhe 'B' consiste de um indicador do *duty cycle* do sinal PWM aplicado ao atuador. No detalhe 'C', estão englobadas algumas informações acerca da amostragem de sinal (o número de iterações corresponde ao número de amostras colhidas), além de um campo de entradas para o parâmetros do controlador, um botão de parada (*STOP*) e um botão para iniciar a sintonia automática (*Auto-tune*). As especificações de filtragem digital do sinal podem ser vistas no detalhe 'D'. O gráfico diretamente abaixo dos detalhes mencionados representa o sinal de referência na cor vermelha, e o sinal lido dos extensômetros na cor branca.

Ao iniciar o processo de auto-sintonia do controlador PID, o usuário é apresentado à janela mostrada na Figura 43.

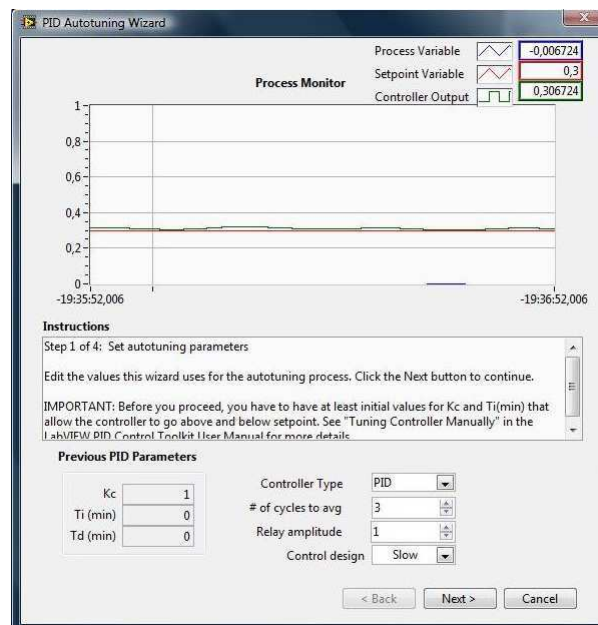
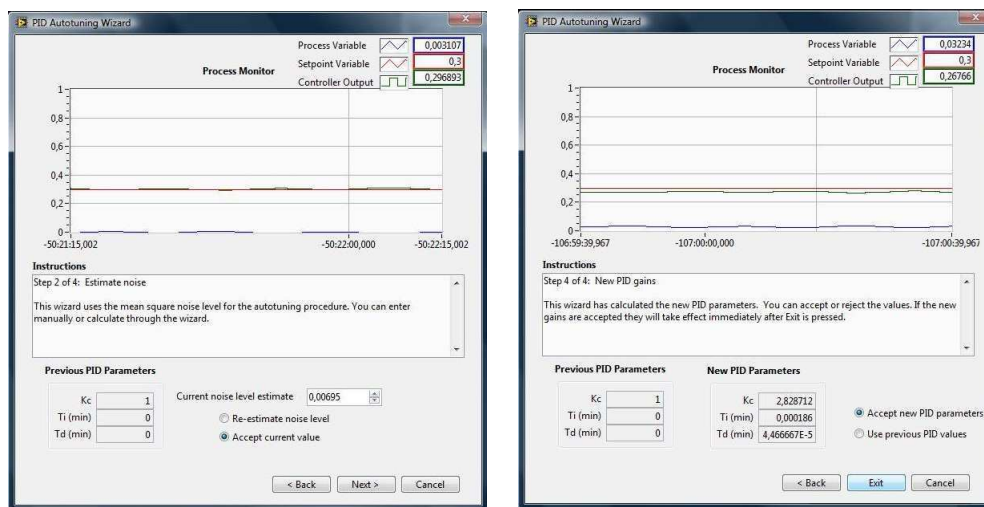


Figura 43: Auxiliar de sintonia automática dos parâmetros do controlador PID.

Nesta nova janela, intitulada *PID Autotuning Wizard* (ou auxiliar de sintonia automática), o usuário deve escolher o tipo de controlador, entre P, PI, ou PID, e o método do projeto de controle, entre *Fast* (rápido, porém pode apresentar alto sobresinal), normal ou *Slow* (lento, mas com o menor sobresinal). O passo seguinte é a estimação da relação sinal-ruído. Esta estimação é feita pelo auxiliar, analisando uma grande quantidade de amostras. Esta estimação está ilustrada na Figura 44a. Depois de estimada essa relação, é feito cálculo dos novos parâmetros, que podem ser aceitos ou rejeitados pelo usuário. Estas etapas estão ilustradas na Figura 44.





(a) Estimação da relação sinal-ruído. (b) Parâmetros calculados pelo auxiliar.

Figura 44: Processo de sintonia dos parâmetros do controlador PID.

## 4.3 Critérios de avaliação

Ao se projetar um sistema de controle, é importante avaliar o desempenho do sistema controlado. Existem diversas maneiras de realizar essa avaliação, sendo comum especificar o desempenho do sistema em termos do comportamento da resposta transitória para entradas específicas, ou em termos de um índice de desempenho.

*Índices de desempenho:* Um índice de desempenho é um número que indica a qualidade do desempenho do sistema. Um sistema de controle é considerado ótimo se os valores dos parâmetros são escolhidos de tal forma que o índice de desempenho escolhido é minimizado/maximizado. Os valores ótimos dos parâmetros dependem diretamente do índice selecionado [29].

### 4.3.1 Integral do erro quadrático

De acordo com o critério da integral do erro quadrático (*integral square-error*, ISE), a qualidade do desempenho do sistema é avaliada pela integral apresentada na equação 4.19.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (4.19)$$

onde o limite superior  $\infty$  pode ser substituído por um tempo  $T$ , escolhido grande o

suficiente para que  $e(t)$  seja desprezível para  $T < t$ .

Uma característica deste índice de desempenho é que ao usá-lo, tem-se grande peso para erros grandes e pequeno peso para erros pequenos. Um sistema otimizado neste critério tende a apresentar rápida diminuição em um erro inicial grande. Portanto, a resposta é rápida e oscilatória. A significância prática otimizando o sistema por este critério está na minimização do consumo de potência para alguns sistemas [29].

### 4.3.2 Integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo

Usando a equação 4.20, têm um índice de erro baseado no critério da integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo (*integral-of-time-multiplied square-error*, ITSE).

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t)dt \quad (4.20)$$

As mesmas considerações feitas no item anterior devem ser feitas neste, no que diz respeito ao limite da integral.

Uma característica deste critério é que, na resposta ao degrau unitário, um erro inicial grande é ponderado com peso baixo, enquanto que erros que ocorrem mais tarde na resposta transitória são mais penalizados. Este critério tem melhor seletividade que o critério ISE [29].

### 4.3.3 Integral do erro absoluto

O critério da integral do erro absoluto (*integral absolute-error*, IAE) é definido pela equação 4.21.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt \quad (4.21)$$

Um sistema ótimo baseado neste critério é um sistema que tem amortecimento razoável e uma característica de resposta transitória satisfatória; entretanto, a seletividade deste índice de desempenho não é muito boa. Este índice de desempenho não é facilmente computado analiticamente [29].

#### 4.3.4 Integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo

De acordo com este critério, ITAE (*integral-of-time-multiplied absolute-error*), o sistema ótimo é aquele que minimiza o índice calculado usando a equação 4.22.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (4.22)$$

De modo análogo aos critérios precedentes, um erro inicial grande em uma resposta a degrau unitário é ponderado com pequeno peso, e erros que ocorrem mais tarde na resposta transitória são bastante penalizados. A característica de um sistema projetado e otimizado segundo este critério é que o sobresinal na resposta transitória é pequeno e oscilações são bem amortecidas. Este critério possui boa seletividade e constitui uma melhora em relação ao critério IAE [29].

# Capítulo 5

## Experimentos e Resultados

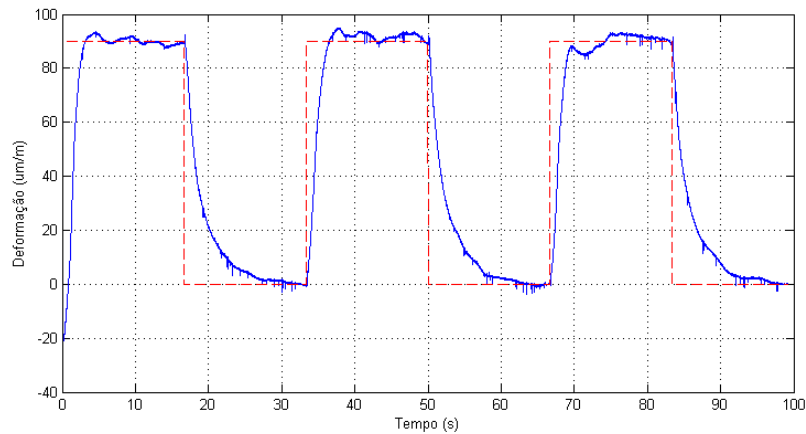
Após concluídas as etapas de montagem e condicionamento dos sinais, tanto para leitura dos sensores quanto para acionamento do atuador, foram implementados controladores PID com sintonia automática dos parâmetros, como explicitado no capítulo anterior, utilizando uma ferramenta de *Auto-tuning* do LabVIEW.

### 5.1 Controle usando fonte de corrente e fonte de tensão

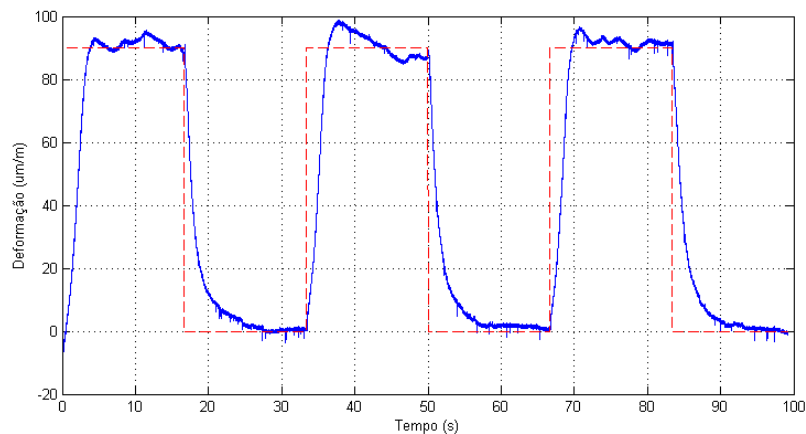
A sintonia foi feita tanto para o caso do acionamento por fonte de tensão, como para o acionamento por fonte de corrente. Após sintonizado, o controlador foi aplicado em diversos ensaios, onde a intenção foi definir qual das duas formas de atuação apresenta melhor desempenho no controle, se a atuação por fonte de tensão, ou por fonte de corrente.

Inicialmente, é importante que os ensaios sejam feitos em frequências variadas, para que seja possível verificar a resposta do sistema em um intervalo de frequências. Foram usados valores mais baixos a princípio, onde foi possível para o sistema controlado acompanhar o sinal de referência, que foi o caso da frequência 30 *mHz*. A partir daí, foi feito um incremento para frequência de atuação de 50 *mHz*, e depois para 70 *mHz*. É possível perceber que uma frequência maior que estas seria muito alta para o sistema em análise, e os resultados seriam totalmente insatisfatórios.

Outra variável nos ensaios foi a condição de carga imposta na extremidade livre da viga. Estas cargas foram inseridas utilizando peças peso de precisão, de modo a garantir as mesmas condições para diversos experimentos. As condições de carga foram escolhidas



(a) Excitação: Fonte de Corrente. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

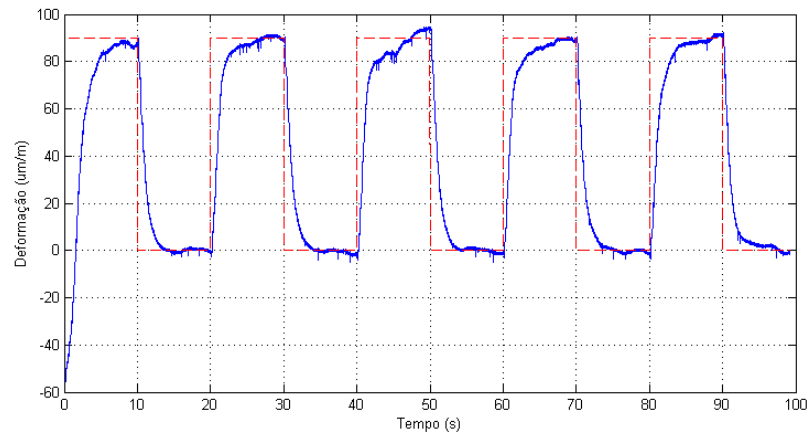


(b) Excitação: Fonte de Tensão. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

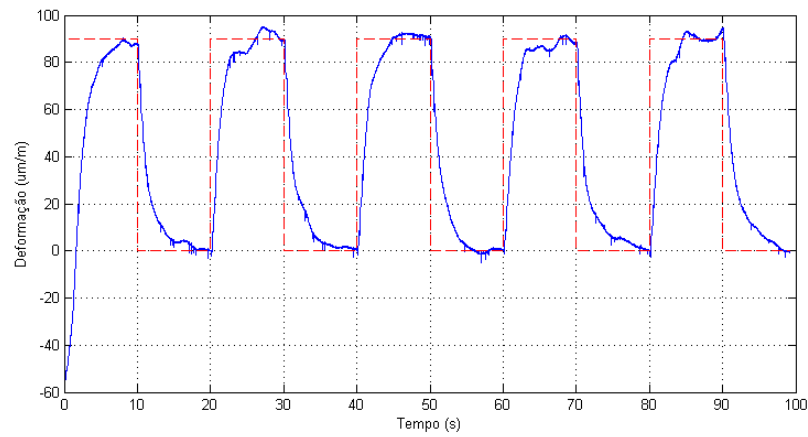
Figura 45: Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Quadrada; Frequência: 30 mHz; Carga: 0 N. Atuador: Fita de LMF.

de modo a ter uma carga nula, uma carga intermediária, e a terceira de modo à exigir um maior esforço do atuador, mas não chegando ao ponto de danificar a estrutura da viga quando não houver atuação. Assim sendo, foram feitos ensaios com cargas de aproximadamente 0N, 1N e 3N.

Por fim, para garantir que estaríamos submetendo o sistema a diversos tipos de excitação, os sinais de entrada foram variados entre onda senoidal, onda quadrada e onda triangular, repetindo todos os ensaios com as cargas e frequências definidas acima para os três tipos de onda de excitação. Para evitar uma quantidade excessiva de gráficos, não serão apresentados cada um dos resultados individualmente, mas apenas alguns deles, de modo a se ter uma idéia de cada forma de onda e de cada frequência de operação. Esses resultados estão apresentados nas Figuras de 45 a 50.

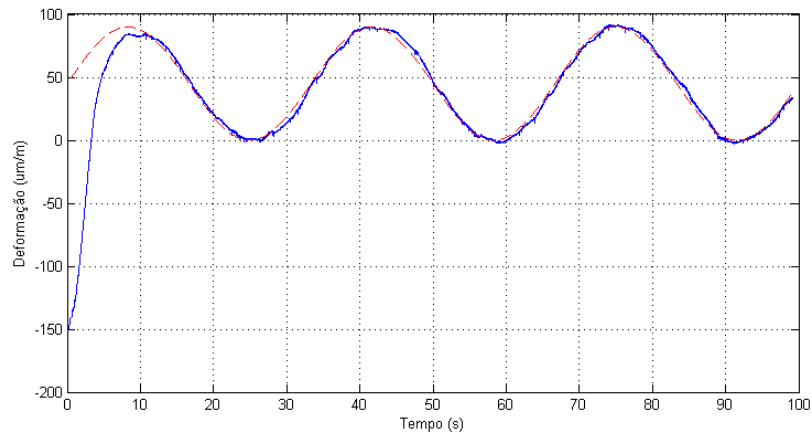


(a) Excitação: Fonte de Corrente. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

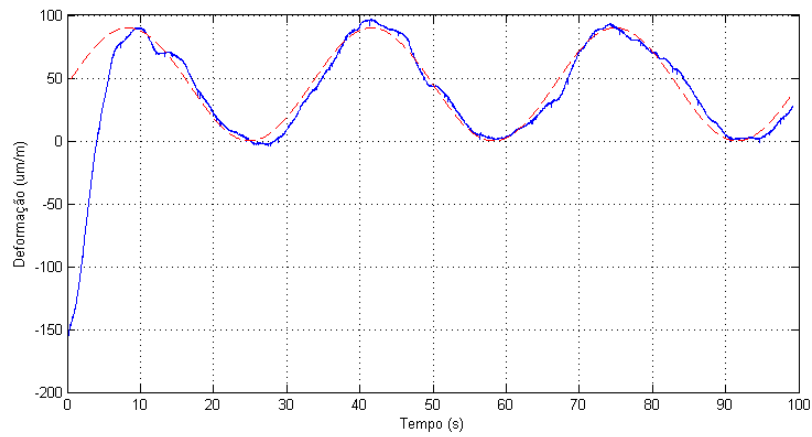


(b) Excitação: Fonte de Tensão. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 46: Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Quadrada; Frequência: 50 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF.

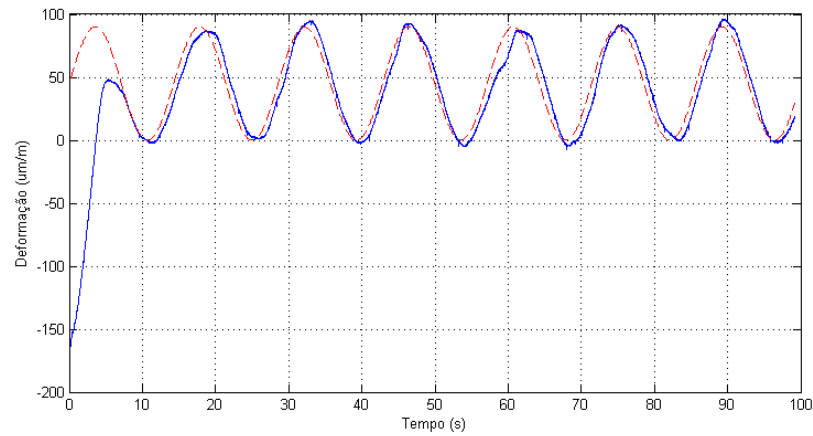


(a) Excitação: Fonte de Corrente. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

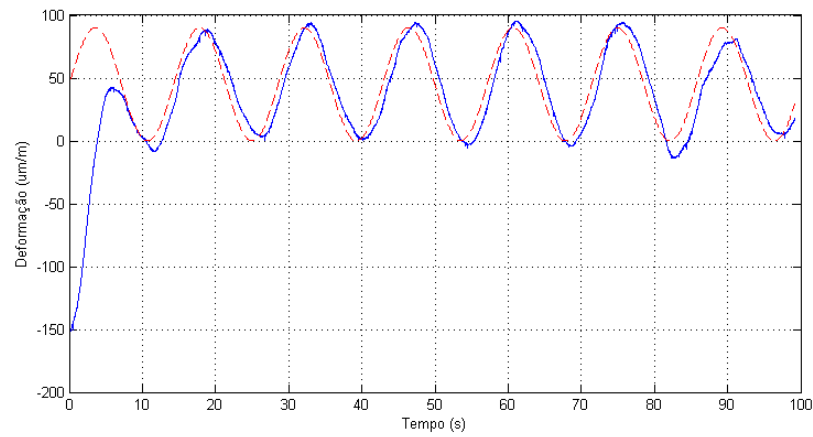


(b) Excitação: Fonte de Tensão. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 47: Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Senoidal; Frequência: 30 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF.



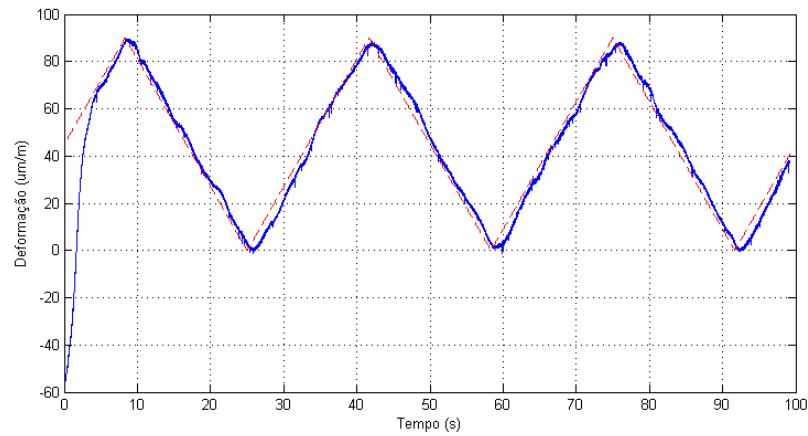
(a) Excitação: Fonte de Corrente. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



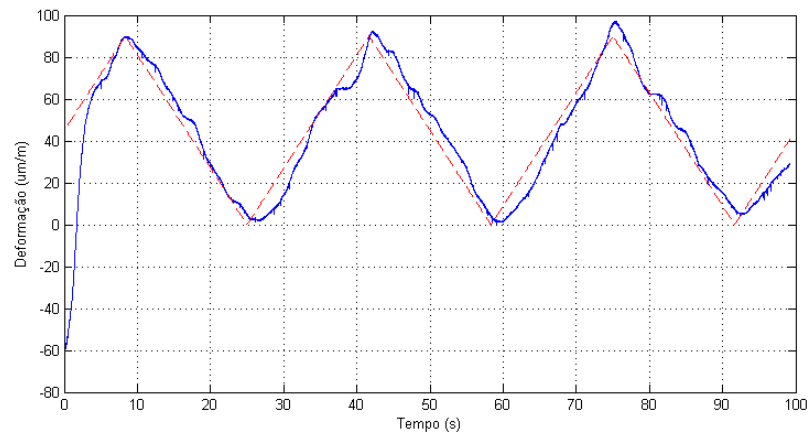
(b) Excitação: Fonte de Tensão. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 48: Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Senoidal; Frequência: 70 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF.



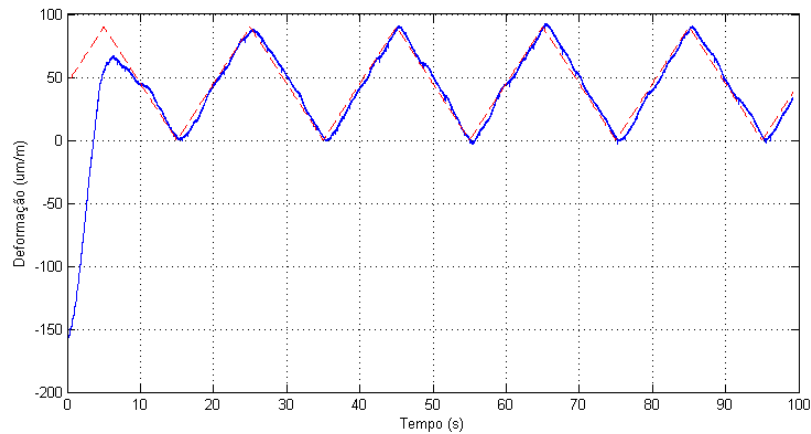


(a) Excitação: Fonte de Corrente. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

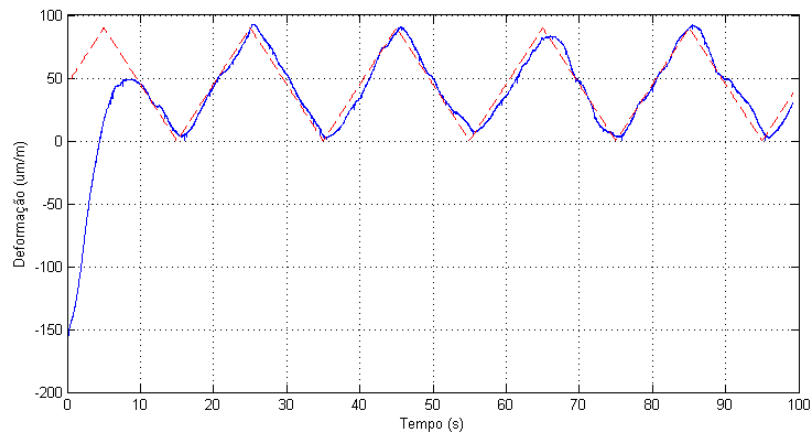


(b) Excitação: Fonte de Tensão. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 49: Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Triangular; Frequência: 30 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF.



(a) Excitação: Fonte de Corrente. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



(b) Excitação: Fonte de Tensão. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 50: Controlador com sintonia automática. Referência: Onda Triangular; Frequência: 50 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF.

Analisando as Figuras 45 a 50, é possível perceber que o controle usando fonte de corrente apresenta resultados ligeiramente melhores, em praticamente todos os casos experimentados.

Para se ter uma idéia melhor destes resultados, são apresentados na Tabela ?? os valores de erro médio absoluto calculados para cada ensaio, onde estão englobados não apenas os resultados apresentados nas Figuras 45 a 50, mas todos os ensaios realizados nesta etapa.

Como pode ser comprovado, os ensaios envolvendo a fonte de tensão apresentaram erro médio absoluto de valor mais elevado que os mesmos ensaios utilizando fonte de

Tabela 4: Erros médios absolutos (%).

0 N			
		Fonte de Tensão	Fonte de Corrente
Quadrada	30 mHz	11,33	10,64
	50 mHz	17,90	13,40
	70 mHz	23,01	20,12
Senoidal	30 mHz	7,88	7,11
	50 mHz	12,97	10,63
	70 mHz	16,28	13,97
Triangular	30 mHz	7,42	7,18
	50 mHz	11,19	9,91
	70 mHz	15,26	11,53
1 N			
		Fonte de Tensão	Fonte de Corrente
Quadrada	30 mHz	11,87	11,44
	50 mHz	16,32	14,03
	70 mHz	21,15	17,11
Senoidal	30 mHz	8,50	5,43
	50 mHz	10,30	7,91
	70 mHz	14,95	10,74
Triangular	30 mHz	7,48	5,07
	50 mHz	9,41	6,85
	70 mHz	13,61	9,92
3 N			
		Fonte de Tensão	Fonte de Corrente
Quadrada	30 mHz	17,50	14,33
	50 mHz	22,70	19,55
	70 mHz	22,60	21,97
Senoidal	30 mHz	11,82	8,25
	50 mHz	14,58	11,29
	70 mHz	17,56	14,76
Triangular	30 mHz	11,06	8,28
	50 mHz	13,12	10,53
	70 mHz	15,96	11,43

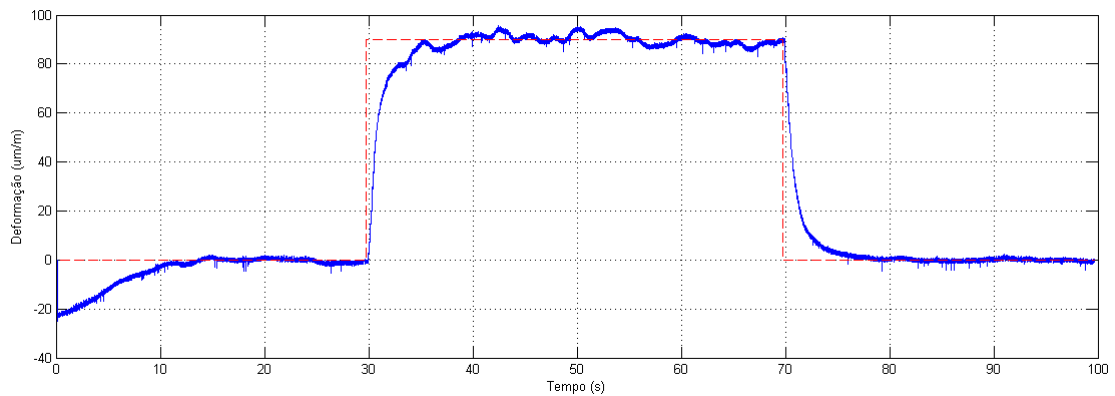
corrente no acionamento, em absolutamente todos os casos analisados.

Adicionalmente, a fim de verificar o comportamento do sistema em regime permanente, foram feitos ensaios usando um duplo degrau como entrada de referência. Isso foi feito para visualizar, em um mesmo sinal, o comportamento durante a subida da viga, e também durante a descida da mesma. Assim é possível verificar a atuação tanto no aquecimento, quanto no resfriamento da LMF.

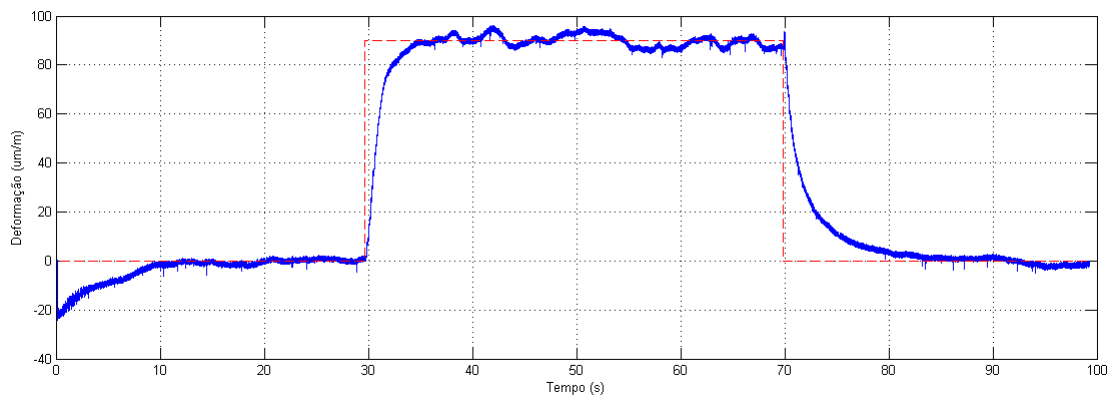
Ao aplicar este degrau duplo, pode-se utilizar os conceitos de índices de desempenho discutidos no capítulo anterior para avaliar o desempenho do sistema acionado por fonte de tensão e por fonte de corrente. Desta maneira, têm-se outros valores numéricos para possibilitar comparações entre as formas de acionamento. Os resultados destes ensaios são apresentados nas Figuras 51 e 52, com cargas na extremidade livre da viga de 0  $N$  e 1  $N$ , respectivamente. Na Tabela ??, pode-se verificar os índices de desempenho calculados para estes ensaios.

Tabela 5: Resultados dos cálculos dos índices de erro para controle com parâmetros sintonizados automaticamente.

		Fonte de Corrente	Fonte de Tensão
0 N	IAE	497,13	741,68
	ITAE	$20,29 \times 10^3$	$38,41 \times 10^3$
	ISE	$14,42 \times 10^3$	$26,61 \times 10^3$
	ITSE	$676,86 \times 10^3$	$1.380,9 \times 10^3$
1 N	IAE	520,56	844,56
	ITAE	$17,86 \times 10^3$	$36,82 \times 10^3$
	ISE	$18,27 \times 10^3$	$30,93 \times 10^3$
	ITSE	$592,22 \times 10^3$	$1.310,8 \times 10^3$



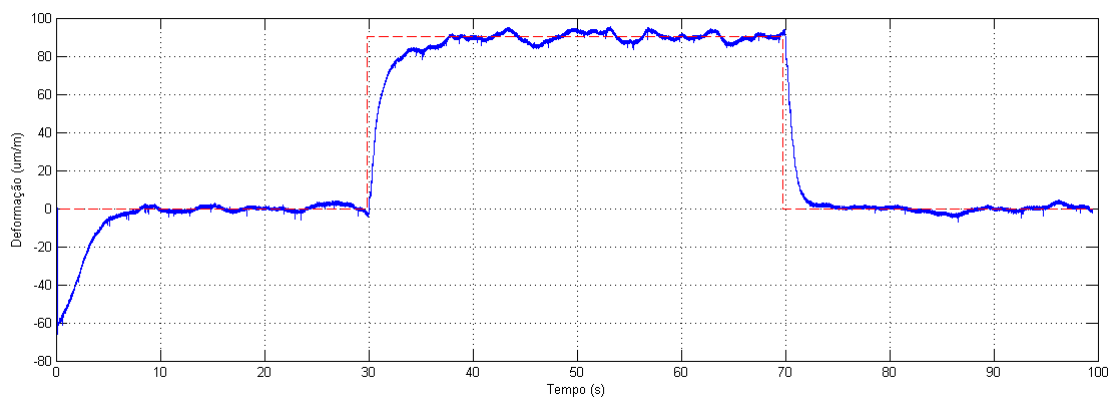
(a) Fonte de corrente: Controle com sintonia automática. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



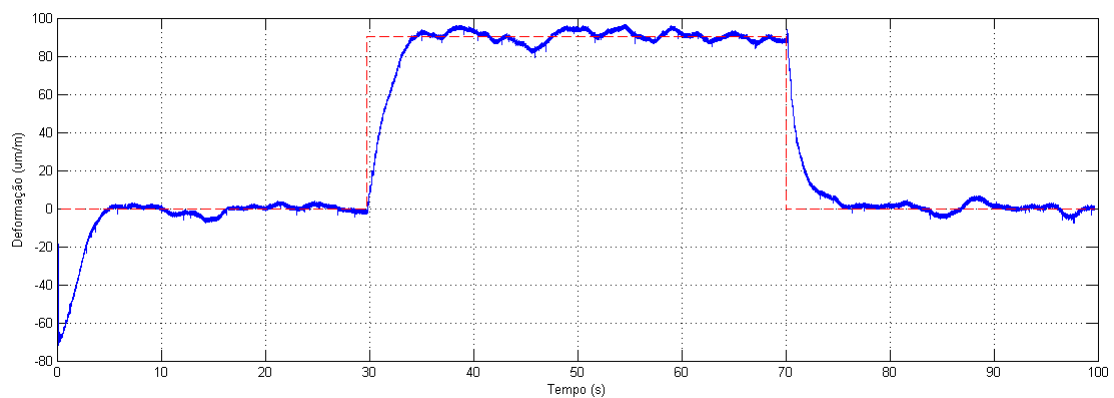
(b) Fonte de tensão: Controle com sintonia automática. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 51: Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Nenhuma aplicação de carga na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF.

Uma possível explicação para o fato da fonte de corrente apresentar melhor desempenho para o acionamento da LMF, em relação à fonte de tensão, é que a não-linearidade



(a) Fonte de corrente: Controle com sintonia automática. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



(b) Fonte de tensão: Controle com sintonia automática. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 52: Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Aplicação de uma carga de  $1\text{ N}$  na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF.

da primeira é menor, já que a resistência de carga (fator não linear no caso das ligas com memória de forma) está no numerador na expressão da potência fornecida, enquanto que na expressão da potência na fonte de tensão, a resistência de carga está no denominador, como já foi discutido no terceiro capítulo deste trabalho.

Quanto à equivalência das fontes, ambas alcançam limite máximo de tensão e corrente bem próximos. Nos ensaios que foram feitos, verificou-se os seguintes limites máximos atingidos ao longo dos experimentos:

- *Fonte de tensão*: limite máximo de tensão: 10.2 V; limite de corrente: 620 mA
- *Fonte de corrente*: limite de tensão: 9.6 V; limite de corrente: 690 mA

Foi feita também a verificação da potencia elétrica ao longo dos ensaios. A potencia máxima da fonte de tensão foi de 6,2 W. A potencia máxima da fonte de corrente foi de 6,7 W. A fonte de corrente possui então pouco menos de 8% de potência a mais que a fonte de tensão, então pode-se afirmar que as fontes são também equivalentes do quesito potência fornecida.

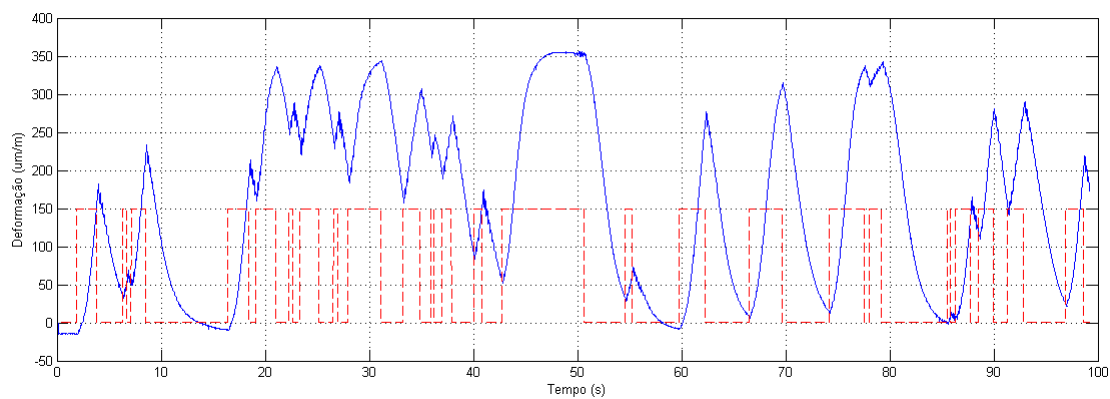
## 5.2 Identificação do sistema

Alguns ensaios foram feitos para identificação do sistema, como citados no capítulo anterior. Inicialmente, implementou-se o sistema usando a fonte de corrente para acionar a LMF. Os ensaios de identificação foram realizados aplicando um sinal PRBS como entrada, e salvando os dados tanto da entrada como da saída. Os resultados destes ensaios podem ser visualizados na Figura 53.

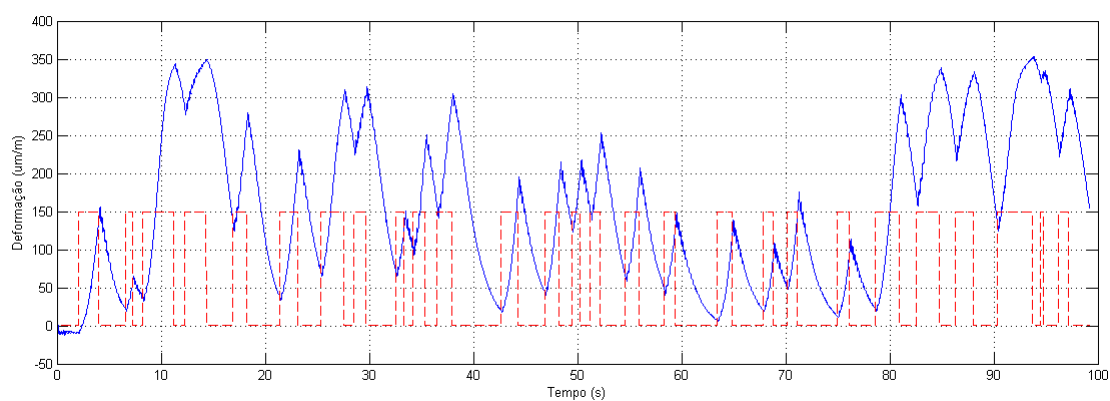
Com esses dados, foi feito o processo de identificação utilizando uma função do LabVIEW, o bloco '*Estimate Transfer Function*', e a ferramenta do MatLab, a função '*Ident*', como descrito no capítulo anterior.

Como foi verificado na bibliografia, um modelo consagrado na caracterização de sistemas térmicos, e em alguns casos incluindo atuadores com memória de forma, é um modelo de primeira ordem, incluindo um fator de atraso, cuja função de transferência pode ser escrita como:

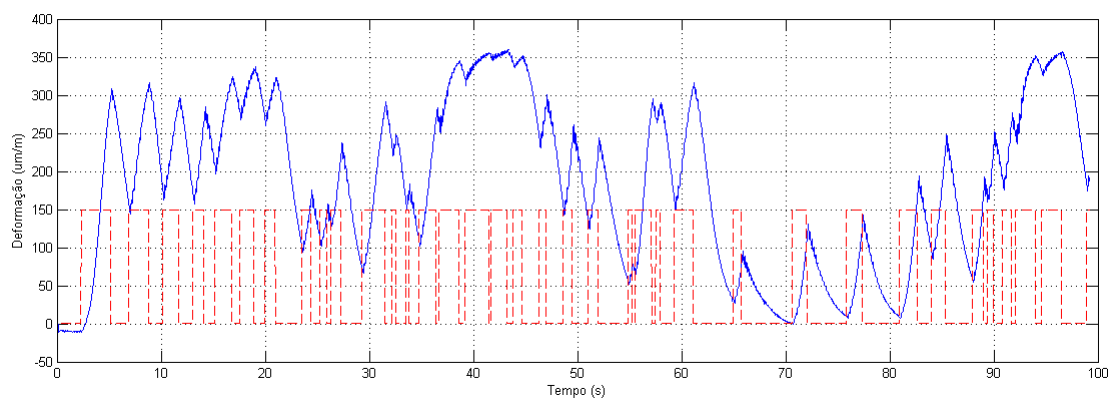
$$G(s) = \frac{K e^{-st_d}}{(1 + T_p s)} \quad (5.1)$$



(a) Primeiro ensaio. Entrada PRBS em tracejado. Deformação da viga em linha sólida.



(b) Segundo ensaio. Entrada PRBS em tracejado. Deformação da viga em linha sólida.



(c) Terceiro ensaio. Entrada PRBS em tracejado. Deformação da viga em linha sólida.

Figura 53: Ensaio de identificação do sistema acionado por fonte de corrente.



onde  $T_d$  representa o atraso de transporte, e  $T_p$  a constante de tempo do sistema.

Foram obtidas então duas combinações para os parâmetros para a planta identificada:

Planta 1:

- $K = 3,6486$
- $T_p = 2,4617s$
- $T_d = 0,12s$
- Compatibilidade de 71,88%.

Planta 2:

- $K = 4,1646$
- $T_p = 2,7862s$
- $T_d = 0,12s$
- Compatibilidade de 79,38%.

Aplicando estes valores no projeto do controlador (descrito em detalhes no capítulo anterior), obtém-se dois conjuntos de parâmetros para implementar controladores PI:

Controlador 1:

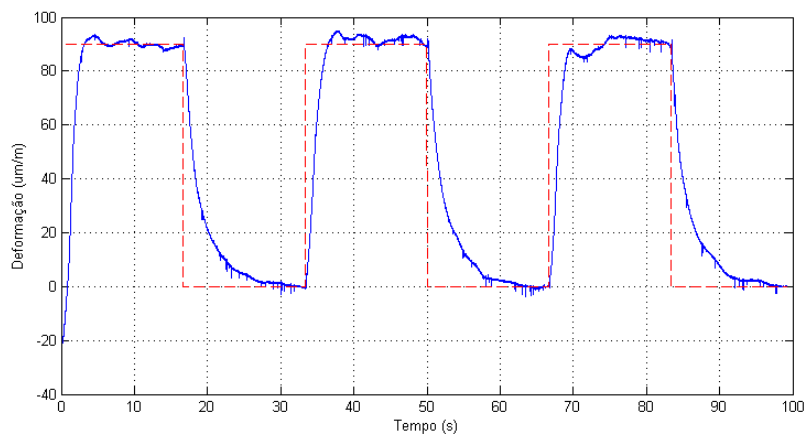
- $T_i = 0,041min$
- $K_p = 1,4052$

Controlador 2:

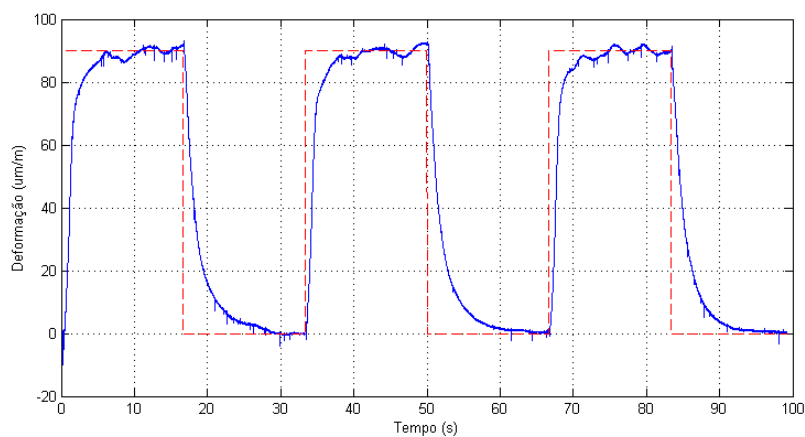
- $T_i = 0,046min$
- $K_p = 1,3936$

## 5.3 Controle usando o método de cancelamento de pólos

Por apresentar uma planta com maior compatibilidade em relação ao sinal de identificação, o segundo controlador foi implementado para os próximos ensaios. É de fundamental importância avaliar o desempenho e resultados do projeto. A avaliação deve ser feita levando em consideração a amplitude e a frequência da deformação da viga, bem como os critérios de erro apresentados no capítulo três. A partir desta avaliação, deve-se obter detalhes sobre a viabilidade da aplicação das técnicas de controle analisadas, a sintonia automática fornecida pelo LabVIEW, e a sintonia por cancelamento de pólos. Os mesmos ensaios descritos na comparação entre a fonte de tensão e a fonte de corrente foram realizados, porém agora todos utilizando o acionamento por fonte de corrente, de modo que a variável principal passou a ser o tipo de sintonia do controlador. Os resultados podem ser vistos nas Figuras de 54 a 59. Da mesma forma como foi feito no caso da comparação entre fonte de corrente e fonte de tensão, foram omitidos alguns gráficos para não sobrecarregar o leitor com excesso de informação.

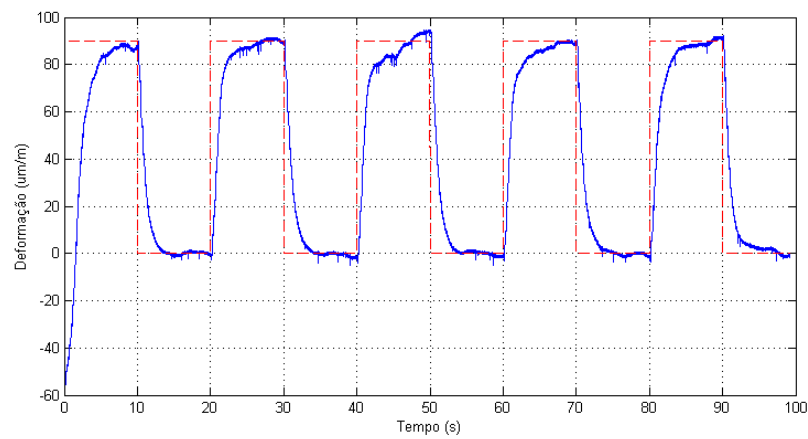


(a) Sintonia automática do LabVIEW. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

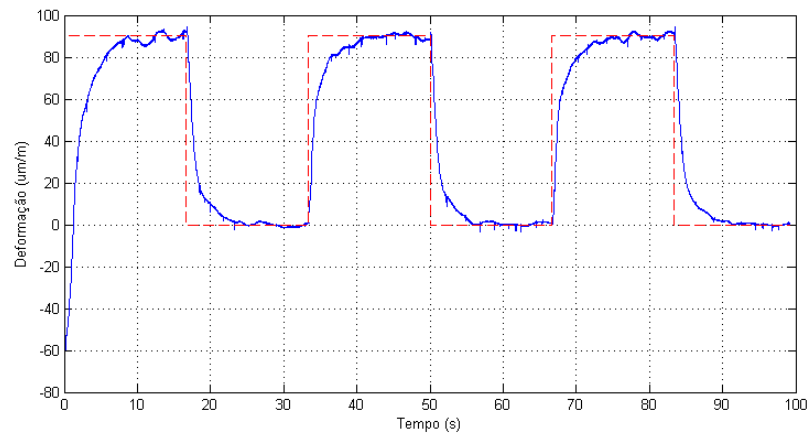


(b) Sintonia pelo método de cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 54: Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Quadrada; Frequência: 30 mHz; Carga: 0 N. Atuador: Fita de LMF.

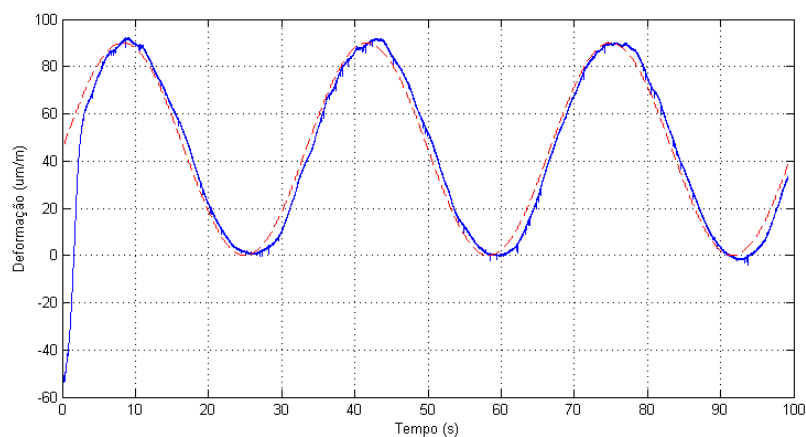


(a) Sintonia automática do LabVIEW. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

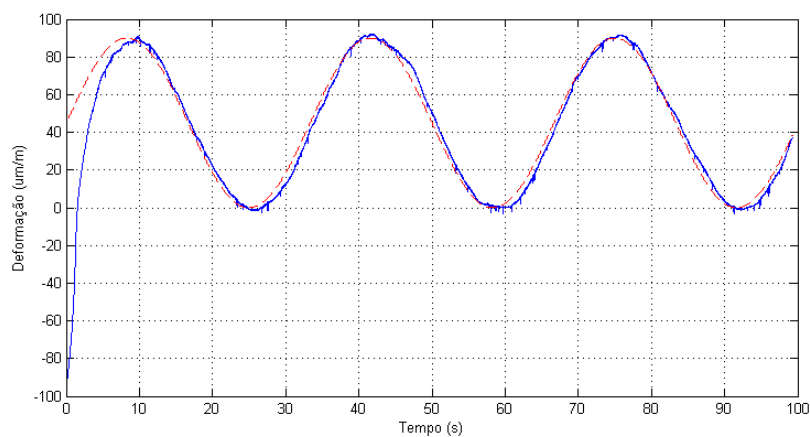


(b) Sintonia pelo método de cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 55: Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Quadrada; Frequência: 50 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF.

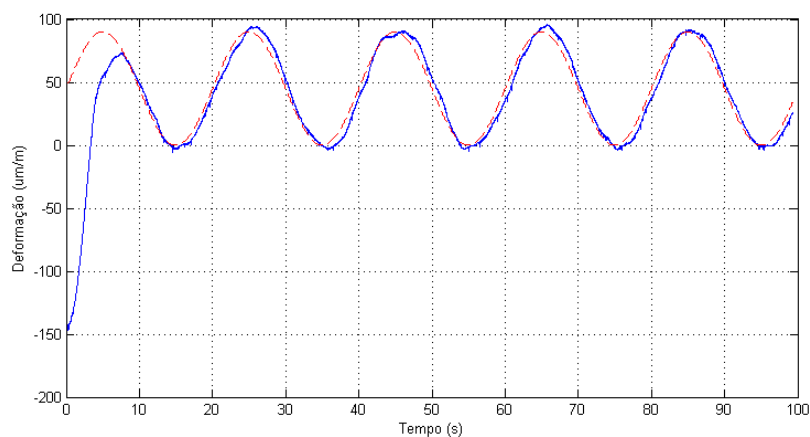


(a) Sintonia automática do LabVIEW. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

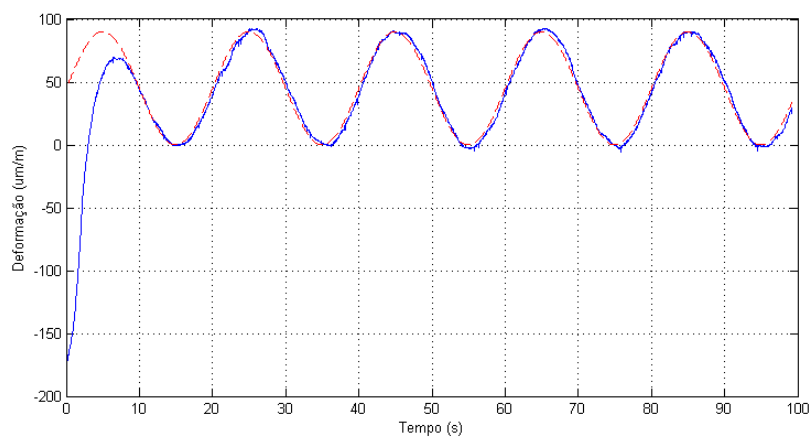


(b) Sintonia pelo método de cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 56: Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Senoidal; Frequência: 30 mHz; Carga: 1 N. Atuador: Fita de LMF.

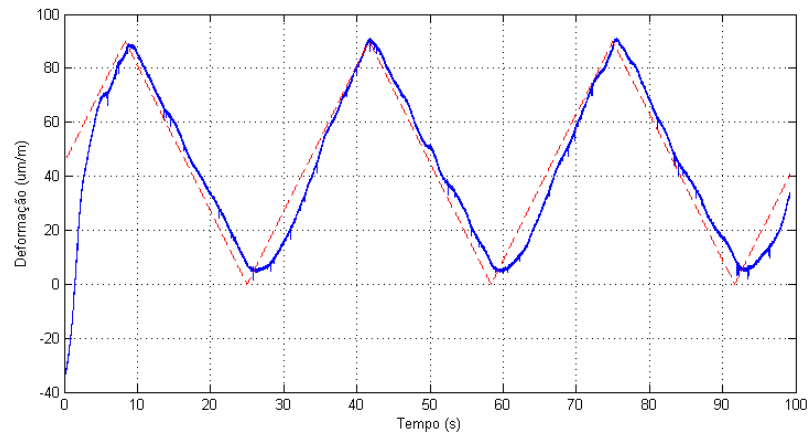


(a) Sintonia automática do LabVIEW. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

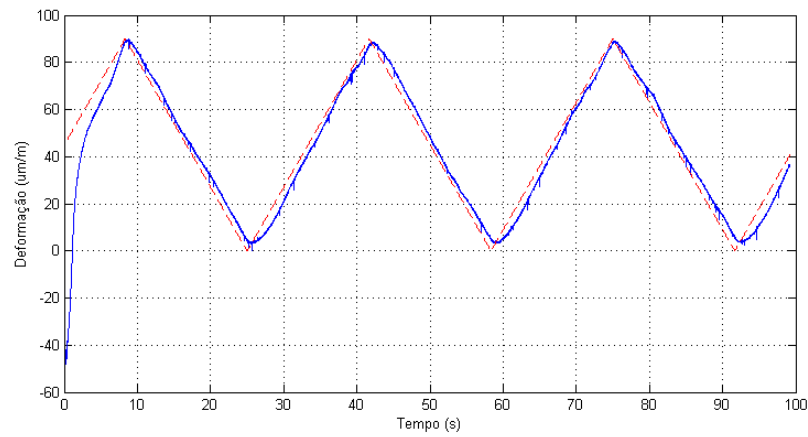


(b) Sintonia pelo método de cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 57: Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Senoidal; Frequência: 50 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF.

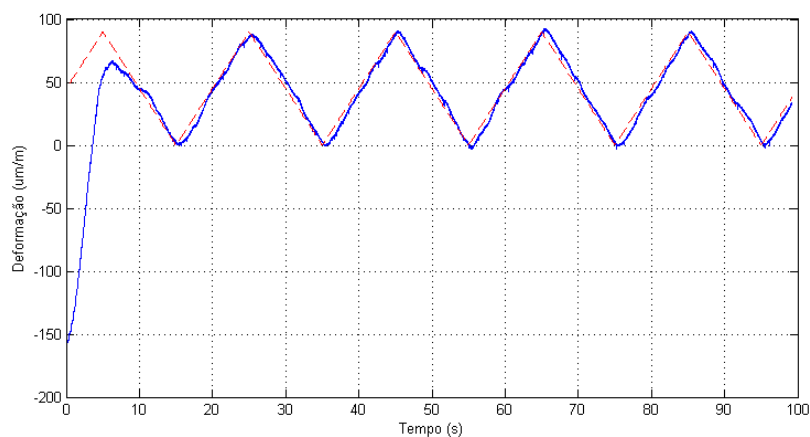


(a) Sintonia automática do LabVIEW. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

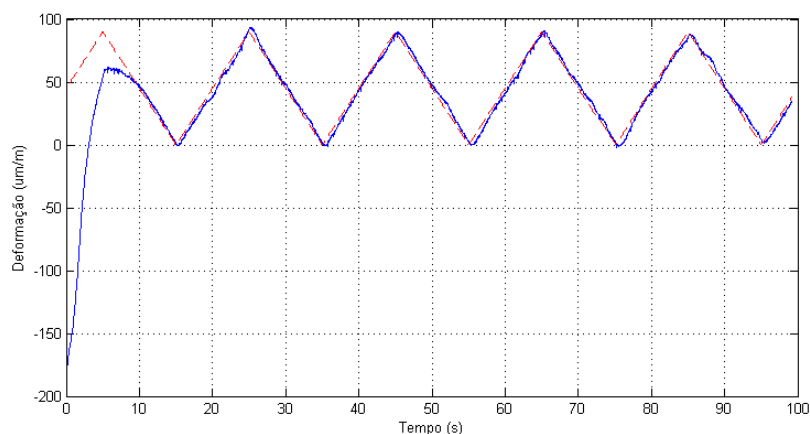


(b) Sintonia pelo método de cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 58: Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Triangular; Frequência: 30 mHz; Carga: 0 N. Atuador: Fita de LMF.



(a) Sintonia automática do LabVIEW. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



(b) Sintonia pelo método de cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 59: Acionamento por fonte de corrente. Referência: Onda Triangular; Frequência: 50 mHz; Carga: 3 N. Atuador: Fita de LMF.

Tal qual a comparação feita entre acionamento por fonte de corrente e fonte de tensão, a comparação que pode ser feita nas Figuras de 54 a 59 revela leve vantagem para o controle cuja sintonia foi feita por meio de cancelamento de pólos.

Mais uma vez, como alguns gráficos foram omitidos, apresenta-se na Tabela ?? os valores de erro médio absoluto de todos os ensaios realizados.

Analisando a Tabela ??, pode-se verificar que na grande maioria dos casos, o controlador sintonizado por cancelamento de pólos apresentou menor erro médio absoluto, em relação ao controlador auto-sintonizado.

Adicionalmente, a fim de verificar o comportamento do sistema em regime perma-

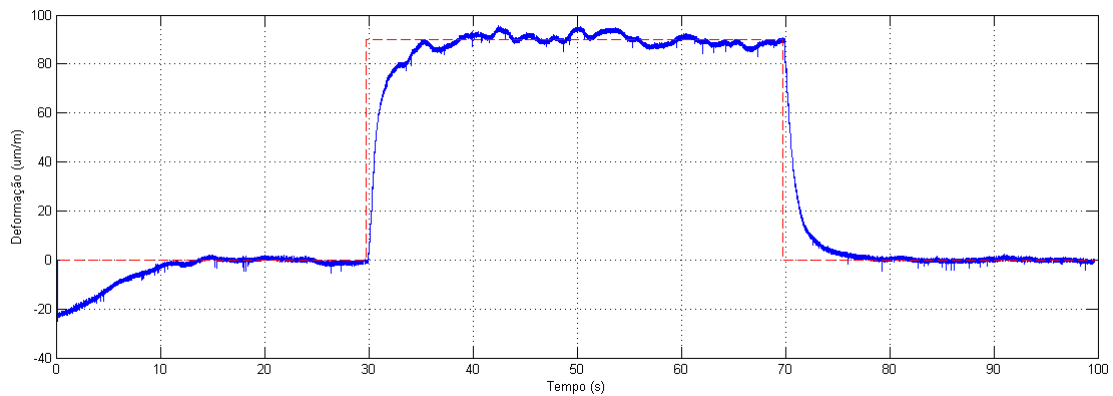


Tabela 6: Erros médios absolutos (%).

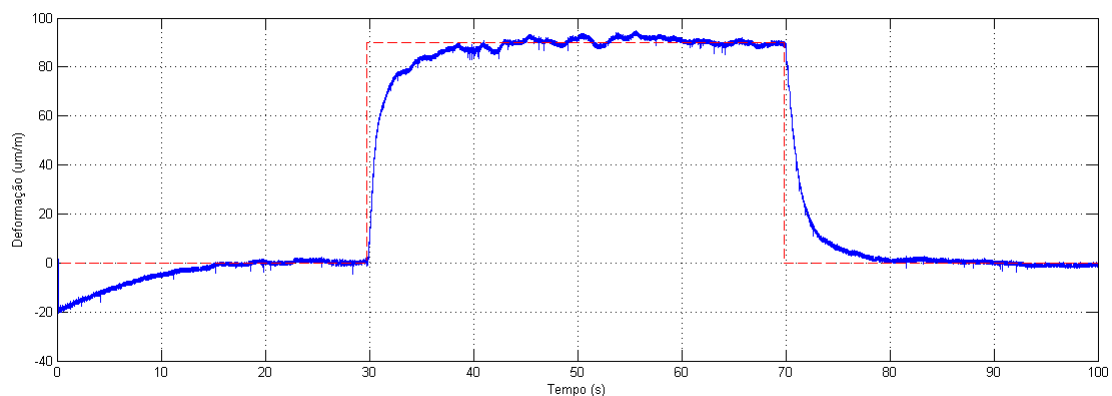
0 N			
		Auto-Sintonia	Cancelamento de pólos
Quadrada	30 mHz	10,64	9,90
	50 mHz	13,40	15,03
	70 mHz	20,12	20,11
Senoidal	30 mHz	7,11	5,58
	50 mHz	10,63	8,71
	70 mHz	13,97	11,70
Triangular	30 mHz	7,18	5,28
	50 mHz	9,91	8,57
	70 mHz	11,53	11,47
1 N			
		Auto-Sintonia	Cancelamento de pólos
Quadrada	30 mHz	11,44	9,41
	50 mHz	14,03	9,95
	70 mHz	17,11	18,56
Senoidal	30 mHz	5,43	5,46
	50 mHz	7,91	6,62
	70 mHz	10,74	8,61
Triangular	30 mHz	5,07	4,63
	50 mHz	6,85	6,00
	70 mHz	9,92	8,66
3 N			
		Auto-Sintonia	Cancelamento de pólos
Quadrada	30 mHz	14,33	13,39
	50 mHz	19,55	18,42
	70 mHz	21,97	21,62
Senoidal	30 mHz	8,25	8,41
	50 mHz	11,29	9,36
	70 mHz	14,76	11,00
Triangular	30 mHz	8,28	8,47
	50 mHz	10,53	9,18
	70 mHz	11,43	10,50

nente, foram feitos ensaios usando um duplo degrau como entrada de referência. A razão deste teste segue a mesma lógica já discutida no caso da avaliação comparativa entre de fonte de tensão e fonte de corrente.

Ao aplicar este degrau duplo, pode-se utilizar os conceitos de índices de desempenho discutidos no capítulo anterior para avaliar o desempenho do sistema controlado por sintonia automática e por sintonia utilizando cancelamento de pólos. Desta maneira, têm-se outros valores numéricos para possibilitar comparações entre as formas de sintonia dos controladores. Os resultados destes ensaios são apresentados nas Figuras 60 e 61, com cargas na extremidade livre da viga de 0 N e 1 N, respectivamente. Na Tabela ??, pode-se verificar os índices de desempenho calculados para estes ensaios.



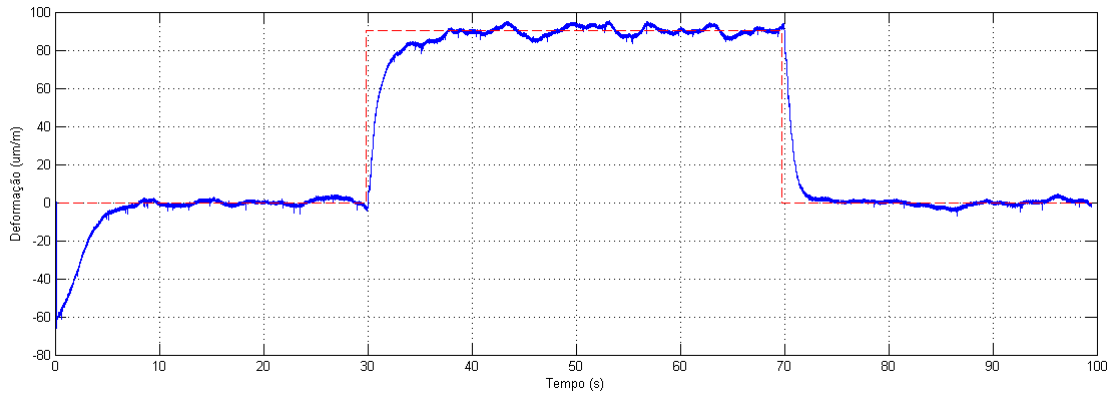
(a) Fonte de corrente: Controle com sintonia automática. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



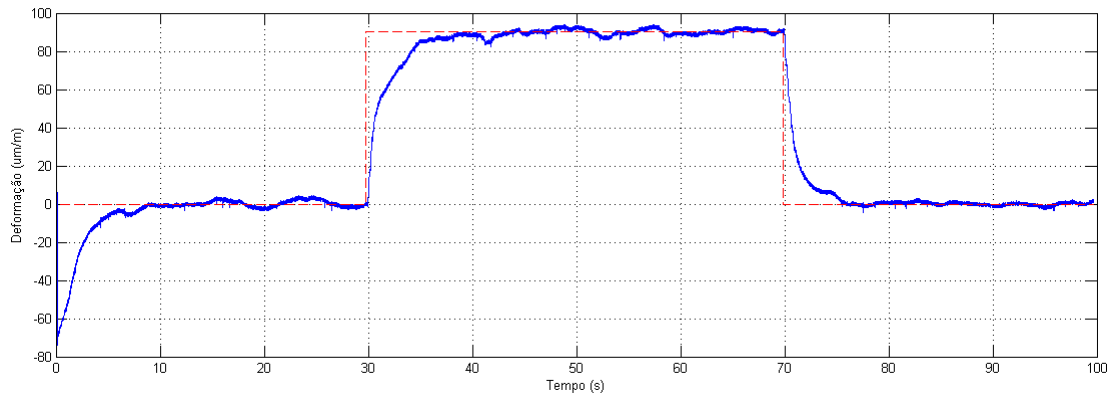
(b) Fonte de corrente: Controle com sintonia por cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 60: Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Nenhuma aplicação de carga na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF.

Analisando os valores apresentados na Tabela ??, juntamente com os gráficos apre-



(a) Fonte de corrente: Controle com sintonia automática. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



(b) Fonte de corrente: Controle com sintonia por cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 61: Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Aplicação de uma carga de 1 N na extremidade da viga. Atuador: Fita de LMF.

Tabela 7: Resultados dos cálculos dos índices de erro. Acionamento usando fonte de corrente.

Fonte de Corrente			
		Auto-Sintonia	Cancelamento de pólos
0 N	IAE	497,13	450,97
	ITAE	$20,29 \times 10^3$	$16,98 \times 10^3$
	ISE	$14,42 \times 10^3$	$13,15 \times 10^3$
	ITSE	$676,86 \times 10^3$	$562,18 \times 10^3$
1 N	IAE	520,56	503,66
	ITAE	$17,86 \times 10^3$	$16,93 \times 10^3$
	ISE	$18,27 \times 10^3$	$18,11 \times 10^3$
	ITSE	$592,22 \times 10^3$	$563,57 \times 10^3$

sentados nas Figuras 60 e 61, pode-se chegar à conclusão que os resultados obtidos usando a sintonia do controlador por cancelamento de pólos foram superiores àqueles utilizando a sintonia automática oferecida pelo LabVIEW.

## 5.4 Controle utilizando “fio” e “fita” de LFM

Como foi dito no capítulo três, o atuador utilizado neste trabalho é uma fita de Liga com Memória de Forma que foi laminado no LaMMEA, na Universidade Federal de Campina Grande. Uma das razões para se fazer esta laminação é o aumento da superfície de troca de calor da fita, em relação ao fio comum.

Sabendo que a fita é a forma laminada de um fio, é de se esperar que tenham também as mesmas propriedades em relação às temperaturas de transformação, capacidade de contração/expansão e força. Objetiva-se analisar o comportamento de uma amostra de fita e uma amostra de fio, ambas vindas no mesmo laboratório, com mesma secção transversal, e verificar se a troca de calor de fato ocorre mais rapidamente na amostra laminada, dada sua maior superfície de contato com o ar.

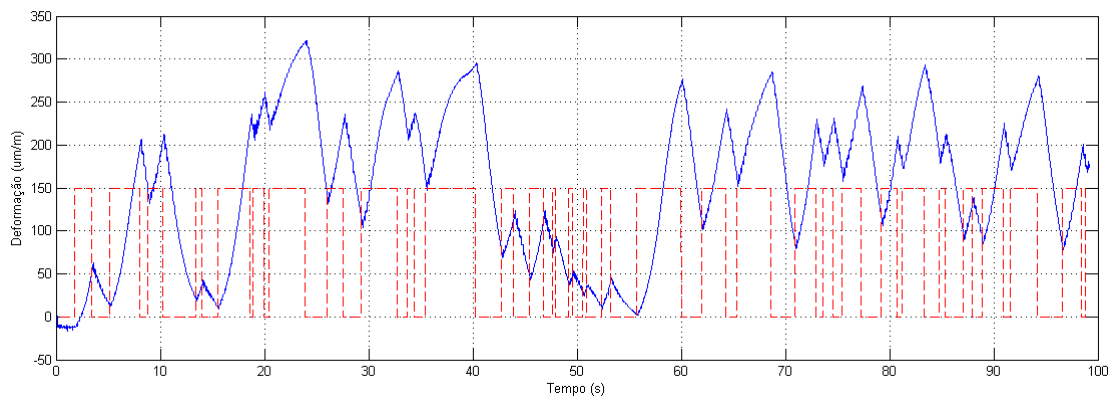
### *Dimensões da Fita*

- Comprimento: 70 *cm*;
- Espessura: 0,04 *mm*;
- Largura: 0,7 *mm*;
- Área de secção transversal: 0,028 *mm*<sup>2</sup>.

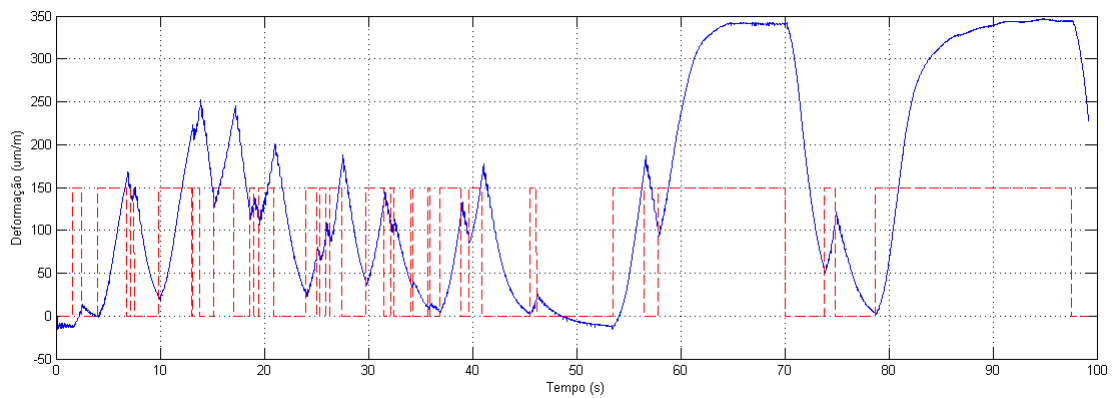
### *Dimensões do Fio*

- Comprimento: 70 *cm*;
- Diâmetro: 0,19 *mm*;
- Área: 0,028 *mm*<sup>2</sup>.

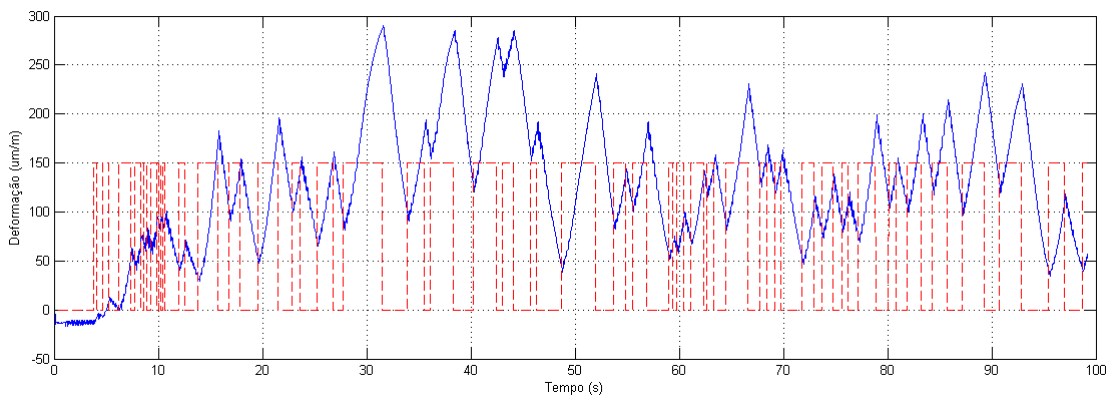
Os mesmos ensaios foram repetidos, seguindo a mesma metodologia, porém substituindo a amostra em forma de fita, pela amostra em forma de fio. Iniciando pelos ensaios de identificação do sistema, usando como entrada um sinal PRBS, e acionamento por fonte de corrente. Os resultados são apresentados na Figura 62.



(a) Primeiro ensaio. Entrada PRBS em tracejado. Deformação da viga em linha sólida.



(b) Segundo ensaio. Entrada PRBS em tracejado. Deformação da viga em linha sólida.



(c) Terceiro ensaio. Entrada PRBS em tracejado. Deformação da viga em linha sólida.

Figura 62: Ensaios de identificação do sistema acionado por atuador de LMF em forma de fio.

Aplicando a mesma metodologia que foi utilizada na identificação da planta com a fita como atuador, obteve-se, para o sistema com o atuador em forma de fio:

Planta 1:

- $K = 2,157$
- $T_p = 1,9185s$
- $T_d = 0,12s$
- Compatibilidade de 58,08%.

Planta 2:

- $K = 2,768$
- $T_p = 2,4264s$
- $T_d = 0,12s$
- Compatibilidade de 77,29%.

Aplicando estes valores no projeto do controlador (descrito em detalhes no capítulo anterior), obtém-se dois conjuntos de parâmetros para implementar controladores PI:

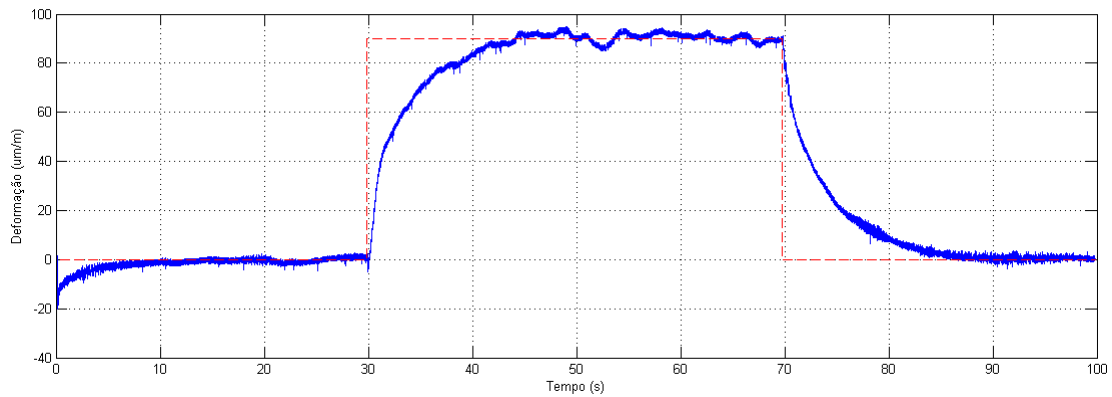
Controlador 1:

- $T_i = 0,0364min$
- $K_p = 2,0881$

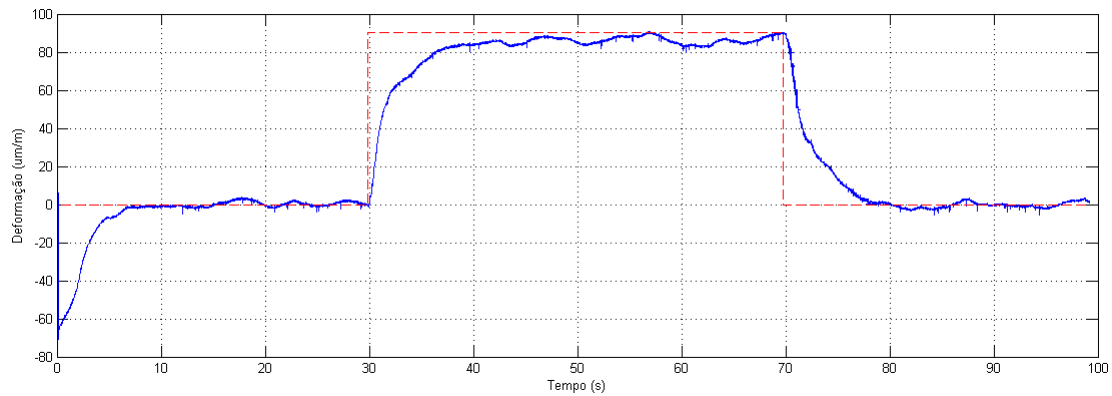
Controlador 2:

- $T_i = 0,0404min$
- $K_p = 2,346$

Utilizando o segundo controlador, cujos parâmetros foram obtidos a partir do modelo com maior compatibilidade com o sinal, foram feitos os ensaios de duplo degrau, de subida e de descida, e comparado com o duplo degrau aplicado no sistema usando controlador com parâmetros sintonizados automaticamente. Os resultados podem ser visualizados na Figura 63.



(a) AutoPID. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.



(b) Cancelamento de pólos. Referência em tracejado, deformação da viga em linha sólida.

Figura 63: Resposta a um degrau de subida e um degrau de descida. Atuador: amostra de LMF em forma de fio.

Voltando a atenção para o trecho onde visualiza-se a descida da viga, no intervalo entre 70 s e 80 s, na Figura 63(fio de LMF), e na Figura 60(fita de LMF), pode-se perceber que de fato o fio demora mais para atingir o nível baixo do degrau. É claro que outras razões podem contribuir para este fato. Por exemplo, os controladores são diferentes e os experimentos foram realizados em dias diferentes. Porém esta diferença de comportamento leva a crer que a área de contato com o ar maior na fita, em relação ao fio, de fato traz vantagens no que diz respeito ao resfriamento do material.

# Capítulo 6

## Conclusões

Para alcançar os objetivos propostos, utilizou-se uma plataforma de testes, em que uma viga de aço está simplesmente engastada à uma coluna, e contém uma fita/fio de LMF na extremidade oposta. Colados nas faces superior e inferior desta viga, foram instalados extensômetros de resistência elétrica unidirecionais, de modo que foi possível adquirir dados de deformação da viga. Nas extremidades do fio de LMF, foram conectados terminais elétricos por meio dos quais foi enviado o sinal de atuação.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que é preferível acionar a liga com memória de forma utilizando uma fonte corrente, em relação ao acionamento por fonte de tensão. Isto é baseado nos fatos de que os resultados apresentados foram melhores em todos os ensaios nos casos onde a fonte de corrente foi utilizada, seja nos ensaios com onda quadrada, senoidal, triangular, ou degrau. Numericamente falando, tanto o erro médio absoluto dos ensaios, quanto os índices de desempenho calculados foram também de melhor performance usando a fonte de corrente, em relação à fonte de tensão.

De acordo com o exposto neste trabalho, mostrou-se que é possível implementar a técnica PID de controle de malha fechada usando apenas o *software* LabView, com toda uma gama de funções, em comunicação com a placa NI PCI 6036e, e o bloco de conectores NI BNC 2110. Neste *software* são disponibilizadas as funções necessárias para configurar todos os aspectos de um processo de controle. É possível aplicar estas funções no controle de deformação de uma viga de aço usando extensômetros como sensores e um atuador de fio/fita de liga com memória de forma. Para isso, é necessário conhecimento do processo e conhecimento das funções disponíveis no LabView, para que se possa executar a programação em linguagem G ciente de todos os detalhes que envolvem qualquer processo



desta natureza.

Entretanto, verificou-se também que, apesar de ser possível realizar o controle usando a sintonia automática fornecida pelo *software*, os resultados foram superiores quando se realizou a identificação da planta do processo, e projetou-se controladores específicos para cada caso, usando o cancelamento de pólos como sintonia dos parâmetros, ao invés dos métodos de Ziegler-Nichols utilizados pelo LabVIEW. Isto foi verificado usando as mesmas ferramentas de análise mencionadas acima.

Finalmente, ao se comparar a utilização de um fio e uma fita de LMF como atuadores, percebeu-se que, de fato, a fita é capaz de perder calor mais rapidamente que o fio, devido à sua maior superfície de contato, em relação ao primeiro. No entanto, há um fator que pode vir a interferir neste resultado: a falta de isolamento térmico da plataforma. É possível que as trocas de calor tenham ocorrido em circunstâncias diferentes, em diferentes condições de temperatura do ar e umidade.

Os elementos que foram usados como sensores neste trabalho tiveram sua eficiência comprovada, visto que os dados fornecidos pelos mesmos foram precisos e facilmente interpretados. O mesmo pode ser dito para os dispositivos atuadores, que foram suficientemente satisfatórios no que diz respeito à atuação sobre o sistema.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Nesta seção são sugeridas algumas futuras investigações que dariam prosseguimento aos estudos apresentados neste trabalho:

1. Usar o atuador de liga com memória de forma também como sensor, medindo sua variação de resistência elétrica, e utilizando esta informação para implementar o controle do processo;
2. Adicionar medição da temperatura do fio ou da fita de LMF, para que se possa acompanhar a evolução desta grandeza ao longo dos ensaios;
3. Adicionar isolamento térmico à estrutura da plataforma, de modo a garantir mais confiabilidade aos ensaios envolvendo trocas de calor.

## Referências

- 1 MOALLEM, M.; LU, J. Application of shape memory alloy actuators for flexure control: theory and experiments. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, v. 10, n. 5, p. 495 – 501, oct. 2005. ISSN 1083-4435.
- 2 LIMA, W. M. *Plataforma para Análise Comportamental de Atuadores de Ligas com Memória de Forma e para Controle de Deformação de uma Barra Flexível*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- 3 SUZUKI, Y.; KAGAWA, Y. Active vibration control of a flexible cantilever beam using shape memory alloy actuators. *Smart Materials and Structures*, Julho 2010.
- 4 ROCHA, T. L. da. *Modelagem de Estruturas Inteligentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira -SP, 2004.
- 5 REIS, R. P. B. dos. *Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoeletrico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- 6 ROMANO, R. *Desenvolvimento de um atuador baseado em liga de memória de forma com resfriamento forçado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- 7 NATIONAL INSTRUMENTS. *E Series MultiFunction DAQ Datasheet*. [S.l.], Dezembro 2010.
- 8 NATIONAL INSTRUMENTS. *MultiFunction DAQ Accessories Datasheet*. [S.l.], Dezembro 2010.
- 9 NATIONAL INSTRUMENTS. *LabView Product Information: What is NI LabVIEW?* [S.l.], 2010.
- 10 RAHMAN, M. A.; KOWSER, M. A. Nonlinear analysis of cantilever shape memory alloy beams of variable cross section. *Smart Materials and Structures*, Março 2007.
- 11 FARIA, V. A.; SILVA, E. P. da. Controle da frequência natural em vigas compósitas com fios de sma. *Simposio de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica*, Dezembro 2006.

- 12 SILVA, E. D. Beam shape feedback control by means of a shape memory actuator. *Materials and Design*, v. 28, n. 5, p. 1592 – 1596, oct. 2007. ISSN 0261-3069.
- 13 SRINIVASAN, A. V.; MCFARLAND, D. M. *Smart Structures: Analysis and Design*. 1º. ed. Cambridge, UK: Cambridge University, 2001. ISBN 0-521-65026-7.
- 14 EXCEL SENSOR. *Fator de Sensibilidade de Extensômetros Coláveis de Resistência Elétrica*. [S.l.], 2010.
- 15 PALLAS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G. *Sensor and Signal Conditioning*. New York, NY: Wiley Inter-Science, 2001. ISBN 0-471-33232-1.
- 16 HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 5º. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2005. ISBN 8587918672.
- 17 VALENZUELA, W. A. *Sistema de articulação atuado por meio de liga com memória de forma*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- 18 TECHNOLOGY, G. I. of. *Exploring Shape Memory Alloys*. 2007. National Nanotechnology Infrastructure Network.
- 19 MAVROIDIS, C. Development of advanced actuators using shape memory alloys and electrorheological fluids. *Res Nondestr Eval*, New York, Fevereiro 2002.
- 20 NETO, J. F. C.; ARAÚJO, C. J. de. Estudo experimental do comportamento eletro-termomecânico de atuadores lineares de niti com memória de forma. *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM*, Agosto 2008.
- 21 VALENZUELA, W. A. *Modelagem e Simulação de um Atuador de Liga Metálica com Memória de Forma*. Tese (Projeto de Pesquisa) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Maio 2007.
- 22 NATIONAL INSTRUMENTS. *Introdução à Programação em G*. [S.l.], 2008.
- 23 SUMATHI, S.; SUREKHA, P. *LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems*. 1º. ed. New York: Springer, 2007. ISBN 10 3-540 48500-7.
- 24 SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. *Multivariable Feedback Control*. 2º. ed. New York, US: Biddles Ltd, 1997. ISBN 0-471-94277-4.
- 25 PINTELON, R.; SHOUKENS, J. *System Identification, A Frequency Domain Approach*. New York, US: IEEE Press, 2001. ISBN 0-7803-6000-1.
- 26 JOHNSON, M. A.; MORADI, M. H. *PID Control, New Identification and Design Methods*. [S.l.]: Springer, 2005. ISBN 1-8523-3702-8.
- 27 BURNS, R. S. *Advanced Control Engineering*. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2001. ISBN 0-7506-5100-8.
- 28 NATIONAL INSTRUMENTS. *PID Autotuning VI and Limitations*. [S.l.], Junho 2011.

- 
- 29 OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro, RJ: Prentice Hall Brasil, 1982. ISBN 85-7054-019-1.
- 30 LABVIEW, N. I. *Ajuda do Software LabVIEW*. 2004.
- 31 NATIONAL INSTRUMENTS. *Data Acquisition*. [S.l.], 2010.

## ***ANEXO A***

### ***Programação em G***

A programação de um VI é feita em linguagem ‘G’, que de acordo com [22] é uma linguagem gráfica de programação de fluxo de dados de alto nível. [23] aponta algumas vantagens da instrumentação virtual, relacionada com instrumentos tradicionais: melhor performance, menor custo e maior flexibilidade.

A execução do programa é determinada pela estrutura de um diagrama de blocos gráfico, onde o programador conecta diferentes nós-funções desenhando fios de conexão. Os fios propagam variáveis e qualquer nó pode ser executado assim que todos seus dados de entrada se tornarem disponíveis. Sendo no caso de múltiplos nós simultâneos, a linguagem G é perfeitamente capaz de execução paralela. *Hardware* de multiprocessamento são automaticamente explorados pelo organizador interno, que multiplexa os barramentos do sistema operacional para os nós prontos para execução[23].

O diagrama de blocos mostrado na Figura 64 é um programa editado em uma janela de programação G, exemplo apresentado por [22]. O programa mostra o resultado da soma de um sinal senoidal com um valor aleatório. Os dados de entrada e resultados são manipulados e mostrados na janela GUI, mostrada na Figura 65.

#### **A.1 Estruturas de Execução**

##### **A.1.1 Estrutura de repetição *While***

O funcionamento de uma estrutura *While*, traduzido do inglês, a partir da documentação de ajuda oferecida pelo software LabVIEW, é dado como:

Repete o subdiagrama em seu interior até que o terminal de condição, um terminal de entrada, receba um determinado valor Booleano. Este valor depende do comportamento

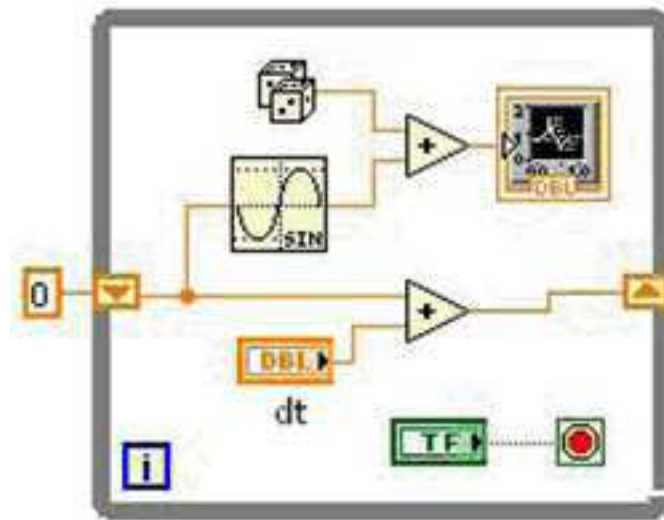


Figura 64: Diagrama de Blocos G.

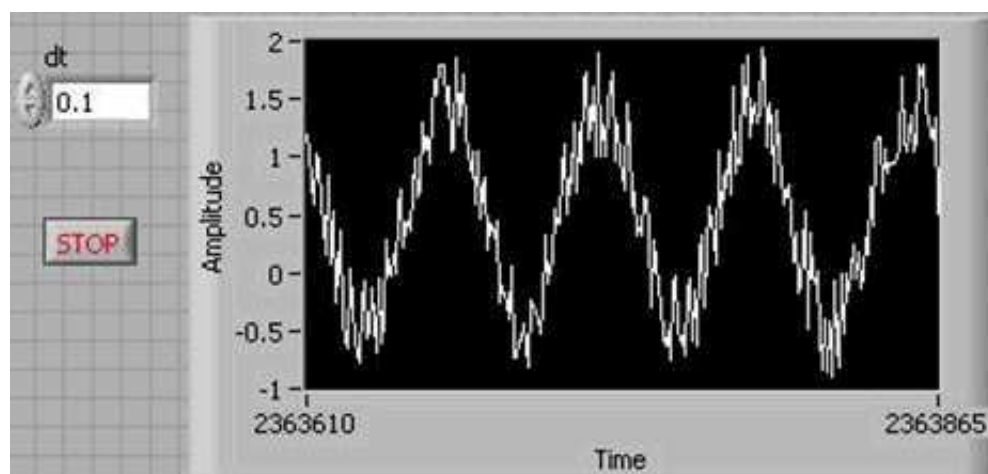


Figura 65: Interface de Usuário.

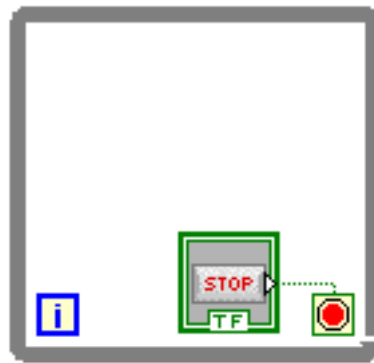


Figura 66: Bloco referente a uma estrutura de repetição While.

de continuidade do *loop While*. Clicando no terminal de condição com o botão direito do *mouse*, existem as opções “*Stop if True*” (Parar se Verdadeiro) ou “*Continue if True*” (Continuar se Verdadeiro), ou seja, o usuário pode decidir a condição de continuidade do laço. O *loop While* é sempre executado ao menos uma única vez. O terminal de iterações “*i*” provê um contador de iterações, onde a saída é zero para a primeira iteração. O botão “*Stop*” (Parar) aparece conectado ao terminal de condição, dando ao usuário a opção de interromper a execução do *loop* a qualquer momento [30].

Na Figura 66 é mostrada a representação de um *loop While* na janela de programação do LabVIEW.

Nas nossas aplicações, a estrutura *While* foi utilizada para manter o programa fazendo leituras dos sensores repetidamente e para criar o sinal de controle do motor de passos, como será mostrado mais detalhadamente adiante.

### A.1.2 Estrutura de execução condicional *If*

O funcionamento de uma estrutura *If*, traduzido do inglês, a partir da documentação de ajuda oferecida pelo software LabVIEW, se dá da seguinte maneira:

Possui um ou mais subdiagramas, ou casos, onde apenas um é executado a cada execução da estrutura. O valor ligado ao terminal seletor determina qual caso irá ser executado e pode ser um valor Booleano, uma “*string*”(valor em forma de caracteres) ou um número inteiro. Clicando com o botão direito do *mouse* na borda da estrutura é possível adicionar ou remover casos [30].

A representação de uma estrutura *If* na janela de programação do LabVIEW está mostrada na Figura 67. Nós usamos estruturas *If* sempre contendo dois casos, “*True Case*” (Caso Verdadeiro) e “*False Case*” (Caso Falso), de modo que as instruções em seu inte-

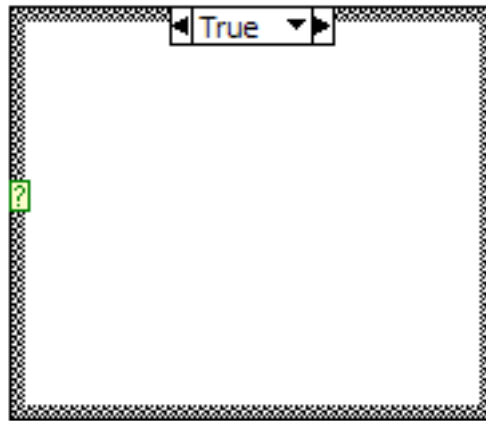


Figura 67: Bloco referente a uma estrutura de condição If.

rior seriam executadas baseadas no acontecimento ou não de determinados eventos. Essas estruturas foram empregadas, por exemplo, para temporizar a movimentação do motor de passos, para o ajuste de PWM e para alternar o resfriamento entre Ligado/Desligado. Essas operações serão mostradas detalhadamente mais adiante.

## A.2 Funções DAQmx (Data Acquisition)

As funções DAQ (apresentadas na Figura 68) constituem um conjunto de funções que podem ser utilizadas no LabVIEW que permitem a comunicação do software com outros dispositivos, sendo essa comunicação possível de ser realizada através de conexão PCI, USB, PXI, wireless, Ethernet e outras. Este pacote foi projetado para desempenho em aquisição de dados, fornecendo capacidade de entrada e saída de dados com precisão de medição e flexibilidade para aplicações[31]. A intenção é utilizamos esse *toolkit* para fazer a comunicação PCI do LabVIEW com os sensores e atuador existentes na plataforma experimental. Seis funções DAQmx são de nosso interesse: *DAQmx Create*, *DAQmx Timing*, *DAQmx Start*, *DAQmx Read*, *DAQmx Write* e *DAQmx Clear*.



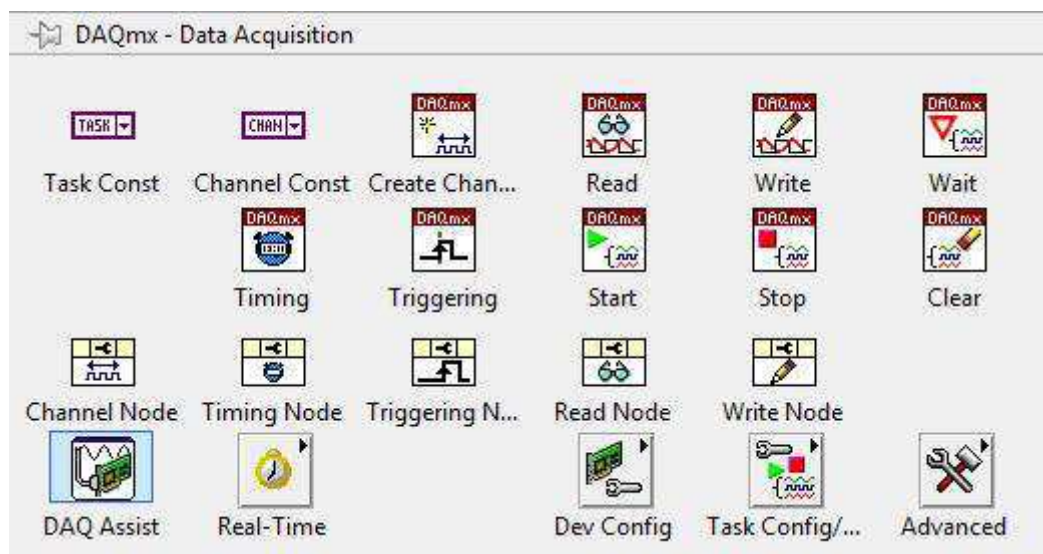


Figura 68: Conjunto de funções DAQmx.

### A.2.1 DAQmx *Create*

Função usada para criar um canal de comunicação. Este canal pode ser de leitura ou escrita de dados. Pode ser usado de diversas formas, dependendo da finalidade de aplicação. Os terminais disponíveis neste bloco estão ilustrados na Figura 69. A partir do terminal de configuração de entrada (*input terminal configuration*) define-se se o canal será de leitura ou escrita, se a leitura será contínua ou um número definido de amostras, é possível especificar se a leitura é de tensão elétrica, temperatura, corrente, e até resistência. Usamos este bloco para iniciar um canal de medição de tensão elétrica e para criar um trem de pulsos que vem a ser o sinal PWM que aciona o atuador. Foi colocada sempre no início dos programas, tornando possível o ajuste da comunicação. Para realizar esses ajustes, devem ser criadas variáveis controláveis ou definíveis pelo usuário. Com esse conjunto de variáveis é possível definir quais os níveis limites de tensão a serem lidos, nomear o canal a ser criado, definir qual o terminal de conectores BNC que será utilizado, determinar a unidade da grandeza em questão, além de terminais de entrada e saída de informações de erro. Estes terminais de erro devem interligar os blocos de função DAQmx presentes no restante do VI, pois é por via destas ligações que o VI pode verificar se há erros na execução do programa, e identificar em que parte encontra-se o erro.

### A.2.2 DAQmx *Timing*

Este bloco configura o número de amostras a serem adquiridas ou geradas e cria um *buffer* interno quanto necessário. Porém pode ser configurado também para trabalhar

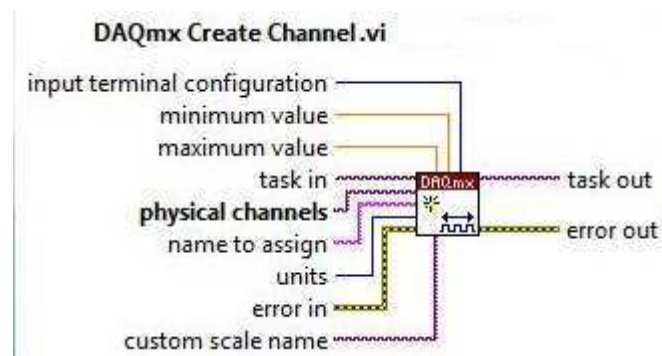


Figura 69: Bloco para criação de um canal virtual.

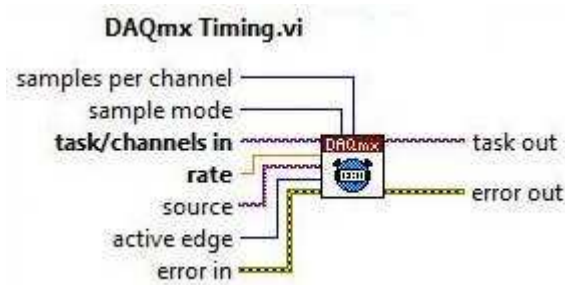


Figura 70: Bloco para temporização de um canal virtual.

como um *clock*, e abrindo a possibilidade de usá-lo como um bloco de sincronia. É possível ajustar a fonte do *clock* para ser o mesmo *clock* de trabalho da placa 6036. Isto pode ser feito para evitar que amostras sejam perdidas na leitura, ou que o *software* tente fazer leituras de amostras que ainda não foram disponibilizadas pela placa PCI. O bloco em questão e seus terminais de configuração podem ser vistos na Figura 70. É possível ainda especificar o DAQmx *timing* para realizar leituras de uma quantidade específica de amostras por ciclo de trabalho; isto é útil para que o usuário possa manipular a taxa de amostragem do VI como um todo.

### A.2.3 DAQmx Start

Este é um bloco obrigatório em todos os canais criados no VI. Ele deve ser colocado após o bloco de criação do canal, ou após o bloco de temporização, caso haja. O bloco DAQmx *start* (ilustrado na Figura 71) passa o canal do estado de espera para o estado de funcionamento, e apenas no estado de funcionamento o canal é capaz de medir ou gerar dados. Caso o programador esqueça de utilizar este bloco, é possível que as leituras de uma execução de seu VI sobreponham as leituras da próxima execução. Ou, caso haja algum tipo de loop dentro do VI, o canal será resetado a cada execução do loop, tornando o VI inutilizável.



Figura 71: Bloco para iniciar o funcionamento de um canal virtual.

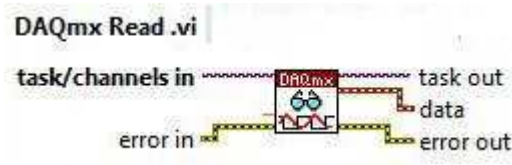


Figura 72: Bloco de leitura de amostras em um canal virtual.

#### A.2.4 DAQmx Read

Bloco usado para leitura de amostras do canal especificado. É possível determinar o formato para retornar as amostras, se em formato numérico ou em *string*, definir se a leitura será de apenas uma amostra, um número finito de amostras, ou leitura contínua, e ainda fazer leituras de mais de um canal simultaneamente.

No terminal “*task / channel in*”, visto na Figura 72, deve ser inserido o canal virtual criado com a função *DAQmx Create*, e as amostras lidas são retornadas no terminal “*data*”. É importante atentar ao tipo de leitura que se deseja fazer, para que não hajam tentativas de leitura de amostras que ainda não estão disponíveis, ou para que a leitura não cesse antes do tempo desejado. Por isso é de fundamental importância sincronizar a leitura do *DAQmx Read* com o modo de operação definido no bloco *DAQmx Timing*.

#### A.2.5 DAQmx Write

Bloco usado para produzir dados de saída. Usando este bloco, é possível disponibilizar amostras no canal especificado. Permite que seja definido o formato de escrita, se em *string* ou em formato numérico, se será disponibilizada uma amostra, um número finito de amostras, ou escrita contínua. Se o usuário não configurar o *timing* do canal com o bloco *DAQmx Timing*, este bloco só irá retornar algo quando todas as amostras estiverem prontas, ou seja, ao fim da execução do VI. Por isso, assim como ocorre com o bloco *DAQmx Read*, é preciso que as configurações de temporização deste bloco deve estar de acordo com o *DAQmx Timing*.

Existem diversas formas de escrita que são permitidas por meio deste bloco, desde valores aleatórios de tensão a um sinal específico, com uma senóide ou um trem de pulsos.



Figura 74: Bloco de fechamento de comunicação e limpeza de dados de um canal virtual.

Deste modo, usando as configurações corretas, é possível gerar um sinal PWM, permitindo ainda ajustar sua frequência e ciclo de trabalho por via de entradas na janela GUI. Os terminais de configuração do DAQmx *Write* podem ser visualizados na Figura 73.

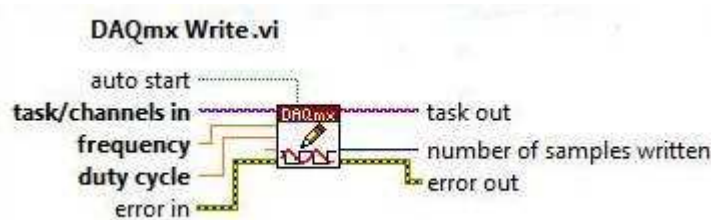


Figura 73: Bloco de escrita de dados em um canal virtual.

### A.2.6 DAQmx *Clear*

Fecha a comunicação com um dispositivo, evento ou objeto especificado na entrada “*task in*” (ver Figura 74). Para cada canal virtual que for aberto, deve haver um bloco de fechamento para finalizar a sessão quando esta chegar ao fim. Além disso, limpa o canal antes de fechá-lo, para que em uma próxima execução do VI, este mesmo canal não inicie com amostras da execução atual. Após o fechamento do canal, este não poderá ser usado novamente a não ser que se inicie o canal novamente usando o bloco DAQmx *Create*. Caso o programador use funções de leitura ou de escrita no canal dentro de um *loop*, o bloco DAQmx *Clear* deve estar fora do *loop*, para evitar que amostras sejam perdidas.

Tendo disponível uma plataforma de estudos como a descrita no capítulo dois, assim como os sensores e atuadores descritos no mesmo capítulo, o primeiro passo foi fazer com que o sinal da deformação sofrida pela barra estivesse disponível para o usuário por meio da ferramenta LabView no PC. É igualmente necessário que, pelo mesmo método, seja possível controlar o nível de atuação da liga com memória de forma sobre a barra. Os procedimentos para condicionar o sinal dos extensômetros e para fazer circular corrente através do fio de LMF já foram descritos no capítulo dois.

Outro fator de fundamental importância exigia atenção, o ruído ainda presente na leitura do sinal dos extensômetros. Para amenizar tal efeito, foi implementado um filtro

---

digital de sinal, por meio de uma função disponível no *software* de trabalho. Por fim, foi elaborado um VI com o qual é possível fazer a leitura do sensor (com filtragem digital) e escrita do sinal de atuação simultaneamente, e para realizar o primeiro teste de controle, foi elaborada uma estrutura de malha fechada com um controlador PID, cujos parâmetros (na ausência de um modelo para o sistema) foram sintonizados automaticamente por meio de um bloco de controle disponível no LabVIEW.