



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO MACIEL RODRIGUES

USO DO CONCEITO DE SENSORES VIRTUAIS APLICADOS AO
MONITORAMENTO DE UMA PLATAFORMA COM UMA VIGA
ENGASTADA

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2015

LEANDRO MACIEL RODRIGUES

USO DO CONCEITO DE SENSORES VIRTUAIS APLICADOS AO
MONITORAMENTO DE UMA PLATAFORMA COM UMA VIGA
ENGASTADA

*Dissertação de mestrado
apresentada à Unidade Acadêmica de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Mestre em Ciências
no domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Instrumentação Eletrônica

José Sérgio da Rocha Neto, D. Sc.

Orientador

Jaidilson Jó da Silva, D. Sc.

Orientador

Campina Grande, Paraíba

Dezembro de 2015

R696u Rodrigues, Leandro Maciel.
Uso do conceito de sensores virtuais aplicados ao monitoramento de uma plataforma com uma viga engastada / Leandro Maciel Rodrigues. - Campina Grande, 2015.
44 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015.
"Orientação : Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto, Prof. Dr. Jaidilson Jó da Silva".

Referências.

1. Viga Engastada. 2. Monitoramento de Deformação. 3. Extensômetro Resistivo. 4. Sensor Virtual. 5. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Rocha Neto, José Sérgio da. II. Silva, Jaidilson Jó da. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.3(043)

**"USO DO CONCEITO DE SENSORES VIRTUAIS APLICADOS AO MONITORAMENTO
DE UMA PLATAFORMA COM UMA VIGA ENGASTADA"**

LEANDRO MACIEL RODRIGUES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 09/12/2015



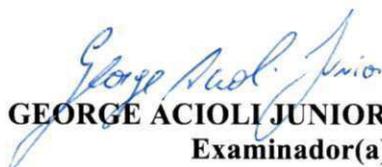
JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



JAIDILSON JÔ DA SILVA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



PÉRICLES REZENDE BARROS, Ph.D., UFCG
Examinador(a)



GEORGE ACIOLI JUNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Resumo

Há algum tempo o estudo e desenvolvimento de sensores virtuais (do inglês, *Soft Sensor*) vem crescendo e se tornando uma alternativa ao uso de sensores reais. Pode-se dizer que um ‘sensor virtual’ é um sistema projetado para substituir a indisponibilidade momentânea ou permanente de um sensor em uma planta. Esta substituição pode ser exigida porque o sensor real tenha falhado ou porque ele foi removido para manutenção. Nessa dissertação utilizou-se uma plataforma experimental, com uma viga de aço engastada, extensômetros de resistência elétrica, um fio de Liga com Memória de Forma (LMF) como atuador mecânico, e uma placa de aquisição de dados para obtenção das medidas referentes à uma amostra da tensão elétrica sobre o fio e a tensão elétrica referente à deformação da viga. E através dos conceitos de *soft sensor*, foi feito o desenvolvimento de um programa, implementado em LabVIEW, para monitoramento da deformação dessa viga. Dados coletados a partir de processos de aquecimento e resfriamento do fio por efeito Joule foram utilizados para mostrar a característica de histerese desse sistema. Com os dados de entrada (tensão medida na liga) e saída (tensão medida no extensômetro) do sistema, utilizou-se a ferramenta de identificação de sistemas do Matlab, *System Identification Tool* ou *ident*, para obter-se modelos de primeira ordem para o sistema. O programa implementado substitui o sensor real quando o sinal desse é perdido, evitando que o processo seja parado para a manutenção ou troca do sensor.

Palavras-chaves: viga engastada; monitoramento de deformação; extensômetro resistivo; liga com memória de forma; sensor virtual.

Abstract

For some time the study and development of Soft Sensor has grown and become an alternative to using real sensors. It can be said that a "soft sensor" is a system designed to replace the temporary or permanent availability of a sensor in a plant. This replacement may be required because the physical sensor failed or because it was removed for maintenance. In this dissertation it has been used an experimental platform with a steel cantilever beam, electrical resistance strain gages, a wire with Shape Memory Alloy (SMA) as mechanical actuator, and a data acquisition board to obtain the measures relating to a sample of the voltage on the wire and the voltage related to the deformation of the beam. And through the soft sensor concepts it has been made the development of a program implemented in LabVIEW, for monitoring deformation of this beam. Data collected from processes of heating and cooling of the wire by Joule effect have been used to show the characteristic of hysteresis of the system. With the input data (voltage measured in the alloy) and output (voltage measured in strain gauges) of the system, it has been used the Matlab system identification tool, *System Identification Tool or ident*, to obtain first-order models for the system. The implemented program replaces the physical sensor when that signal is lost, preventing the process to be stopped for maintenance or exchange of the sensor.

Keywords: cantilever beam; deformation monitoring; resistive strain gauge; shape memory alloy; soft sensor.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	SENSORES VIRTUAIS.....	4
2.2	LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA	7
2.3	MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	9
2.3.1	SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM COM ATRASO	10
3	PLATAFORMAS E CIRCUITOS UTILIZADOS	12
3.1	ESTRUTURA FÍSICA DA PLATAFORMA	12
3.2	EXTENSÔMETROS.....	14
3.3	PONTE DE WHEATSTONE	14
3.4	CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO DO SINAL.....	15
3.5	CIRCUITO PARA ACIONAMENTO DA LMF	17
3.6	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	17
3.6.1	INTERFACE EM LABVIEW PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	19
3.6.2	FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO <i>IDENT</i> (MATLAB)	20
4	RESULTADOS OBTIDOS	22
4.1	AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DA LMF	22
4.2	HISTERESE	24
4.3	MODELAGEM DO SISTEMA	25
4.4	INTERFACE GRÁFICA.....	32
4.5	RESULTADOS PARA SAÍDA MEDIDA E SAÍDA DO MODELO COMPLETO	34
4.6	TESTES COM FALHA NO SENSOR	36
5	CONCLUSÃO	40

5.1	TRABALHOS FUTUROS	41
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

Lista de Figuras

Figura 2.1: <i>Soft sensor</i> , representação da associação entre Sensor Inteligente e Modelagem e Identificação de Sistemas.	5
Figura 2.2: Representação da transformação de estado da LMF [2].....	8
Figura 2.3: Representação do Processo de Modelagem.....	9
Figura 2.4: Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte.	10
Figura 3.1: Representação da plataforma experimental em vistas isométrica(a) e lateral(b).	13
Figura 3.2: Representação de um extensômetro de resistência elétrica.	14
Figura 3.3: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com dois extensômetros.	15
Figura 3.4: Diagrama do circuito de condicionamento de sinal dos extensômetros.....	16
Figura 3.5: Diagrama do circuito de acionamento da LMF.....	17
Figura 3.6: Esquema para aquisição de dados e atuação sobre a LMF.....	19
Figura 3.7: Interface em LabVIEW para aquisição de dados.	20
Figura 3.8: Interface do <i>ident</i> do Matlab.....	21
Figura 4.1: Gráficos de aquecimento (a) e resfriamento (b) sem carga.	23
Figura 4.2: Gráfico do aquecimento (a) e resfriamento (b) com carga de 100g.	24
Figura 4.3: Curva de histerese do sistema.....	25
Figura 4.4: Validação dos modelos gerados para o aquecimento sem carga.	27
Figura 4.5: Validação dos modelos gerados para o de resfriamento sem carga.	28
Figura 4.6: Validação dos modelos gerados para o aquecimento com carga.	30
Figura 4.7: Validação para os modelos gerados para o resfriamento com carga.....	31
Figura 4.8: Interface gráfica do programa (sensor virtual).	33
Figura 4.9: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de aquecimento sem carga.	34
Figura 4.10: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de resfriamento sem carga.	35
Figura 4.11: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de aquecimento com carga.....	35
Figura 4.12: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de resfriamento com carga.....	36
Figura 4.13: Simulação de falha no sensor para o caso de aquecimento sem carga.	37

Figura 4.14: Simulação de falha no sensor para o caso de resfriamento sem carga.	38
Figura 4.15: Simulação de falha no sensor para o caso de aquecimento com carga.....	38
Figura 4.16: Simulação de falha no sensor para o caso de resfriamento com carga.....	39

Glossário

LMF.....	Liga com Memória de Forma
SMA.....	Shape Memory Alloy
EMF.....	Efeito de Memória de Forma
PWM.....	Pulse Width Modulation
PC.....	Personal Computer

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma contextualização do trabalho, onde serão abordados a motivação e os objetivos, bem como a organização do texto.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os sistemas mecânicos, sejam máquinas industriais, construções civis, veículos de transporte e etc., estão frequentemente sujeitos às excitações internas e externas, que provocam vibrações indesejáveis, perturbando operadores e usuários e, em alguns casos, colocando em risco a própria integridade estrutural do sistema [1].

Esse fenômeno tem mobilizado um conjunto expressivo de pesquisadores e são inúmeras as publicações especializadas na área onde utilizam Ligas com Memória de Forma (LMF) na tentativa de resolver esses problemas. As áreas aeroespacial, biomédica e robótica são algumas onde as LMFs podem ser usadas [2], [3], [4] e [5].

Ligas com Memória de Forma são materiais metálicos que podem sofrer transformações de fase no estado sólido como resultado da aplicação de um carregamento termomecânico. Estes materiais metálicos especiais, internacionalmente conhecidos como *Shape Memory Alloys* (SMA), depois de submetidos a uma deformação plástica, em uma temperatura relativamente baixa, são capazes de recuperar sua forma original por meio de aquecimento. Este fenômeno é chamado de Efeito de Memória de Forma (EMF) [6].

Os sistemas de controle ou monitoramento requerem o emprego de elementos de interface com o mundo real, ou mundo físico. Assim, um processo industrial requer uma diversidade de sensores para poder observar e identificar seu estado atual e poder tomar decisões de controle. Por seu papel fundamental, os sensores vêm sendo foco de constante evolução tecnológica, a fim de reduzir a um número menor possível seus problemas e potencializar sua atuação. Dentre os problemas relacionados na utilização de sensores podemos citar: Erros de Medição; Disponibilidade e Confiabilidade; Atrasos de Medição; Distância do Ponto de Medição; Ambiente de Medição; Interferência no Processo e Preço [7].

Os sensores virtuais baseiam-se no uso de técnicas computacionais para determinar o valor da variável do processo, em contraste com sensores reais que medem os valores das variáveis do processo diretamente. Esses sensores abriram um novo mundo de possibilidades

e opções que ajudam a contornar questões como manutenção, custo e utilização *online* de sensores reais [8].

Pode-se dizer que um 'sensor virtual' é um sistema projetado para substituir a indisponibilidade momentânea ou permanente de um sensor em uma planta. Esta substituição pode ser exigida porque o sensor real tenha falhado ou porque ele foi removido para manutenção. Pode também acontecer que o sensor real seja usado em uma forma compartilhada (*time-sharing*), ou não exista no mercado um sensor disponível [7].

Em muitos processos industriais onde se pode contar com uma multiplicidade de sensores e se tem o monitoramento ou o controle realizados por computador, torna-se possível implementar um sensor virtual, o qual pode ser definido como um modelo que estima, em tempo real, a variável desejada a partir de dados medidos da planta [7].

A utilidade dos sensores virtuais no sentido de se monitorar e controlar processos em geral é de indiscutível importância pela possibilidade de se obter resultados de forma mais rápida e mais confiável, e permitir que o processo continue mesmo quando há falhas no sensor real, melhorando o desempenho do processo como um todo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é utilizar os conceitos de sensores virtuais para realizar o monitoramento da deformação de uma barra flexível engastada através de fios de Liga com Memória de Forma.

Nesse sentido é realizado um conjunto de medições para determinar a relação entre a tensão de entrada, ou seja, uma amostra da tensão elétrica medida sobre o fio de LMF e a tensão de saída, ou seja, a tensão que é medida nos extensômetros de resistência que varia com a deformação da viga, para observar-se o comportamento do sistema.

A partir dos dados é feita a identificação e modelagem, para quando houver a perda do sinal de saída, por alguma falha no sensor real (extensômetro), seja possível manter o sistema funcionando até que seja feita a manutenção ou troca do sensor.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Neste capítulo apresentou-se uma introdução do trabalho, mostrando-se as motivações e objetivos para a realização do mesmo.

O capítulo 2 é destinado a apresentação da revisão bibliográfica e fundamentação teórica sobre Sensores Virtuais, Ligas com Memória de Forma e Identificação e Modelagem de Sistemas.

No capítulo 3 é realizada a descrição da plataforma experimental e dos circuitos utilizados.

No capítulo 4 são apresentados resultados dos testes realizados para descrever o comportamento do sistema quando o fio é aquecido e resfriado, a modelagem matemática do comportamento do sistema, o programa implementado para substituir o sensor real quando esse falhar e os resultados dos testes realizados com esse programa.

E no capítulo 5 é apresentada a conclusão da dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados alguns trabalhos em que é feito o desenvolvimento de sensores virtuais, e uma fundamentação teórica sobre sensores virtuais, Ligas com Memória de Forma (LMF), modelagem e identificação de sistemas.

2.1 SENSORES VIRTUAIS

Os sensores virtuais são sistemas de monitoramento baseados em *software*, que podem relacionar as variáveis de processo menos acessíveis e pouco medidas com aquelas medidas facilmente e com maior frequência. Em essência, os sensores virtuais correlacionam as variáveis do processo não medidas e as variáveis de qualidade do produto com as variáveis do processo frequentemente medidas, assim, ajudam a fazer as previsões em tempo real das variáveis não mensuráveis [9].

O modelo inferencial (*soft sensor*) pode ser uma boa alternativa em relação aos métodos de medição tradicionais, desde que as variáveis de entrada utilizadas apresentem confiabilidade e quando a estrutura para a geração do modelo inferencial seja capaz de fornecer a variável desejada [10].

O termo sensor virtual pode ser usado como referência ao estimador de uma ou mais variáveis de estado de um determinado sistema e pode ser explicado como uma associação de um ou mais sensores reais, que permitem medidas *online* de algumas variáveis de processo, com um algoritmo de estimação para fornecer estimativas *online* das variáveis não-medidas e parâmetros do modelo [11].

Modelos de plantas podem representar ferramentas valiosas em diversas áreas de aplicação industrial, incluindo refinarias, fábricas de produtos químicos, fornos de cimento, usinas de energia, indústria de celulose e papel, processamento de alimentos, plantas nucleares e de monitorização da poluição urbana e industrial. Eles são usados para uma série de fins, tais como *backup* do sistema de medição, predição em tempo real para o controle das plantas, validação de sensores, e estratégias de diagnóstico de faltas. Esses modelos, também conhecidos como sensores virtuais, são o núcleo de instrumentos virtuais usados por projetistas [12].

Sensores virtuais são usados em diferentes aplicações industriais por seu custo relativamente baixo, desenvolvimento simples, e habilidade de prever variáveis que são difíceis de mensurar [13].

A aplicação de sensores virtuais na estimativa de variáveis de processo de difícil medição é extremamente interessante no processo industrial, onde existem normalmente um grande número de variáveis medidas continuamente e rapidamente, e podem servir como sinais de entrada para o sensor virtual. Os sensores virtuais podem funcionar em paralelo com sensores reais, permitindo serem implementados esquemas de detecção de falhas dedicados a análise da condição do sensor. Além disso, eles podem tomar o lugar de sensores que foram retirados para manutenção, para manter o controle de laços funcionando corretamente e garantir a especificação do produto, sem realizar políticas de produção conservadoras, que são geralmente muito caras [14].

O sensor virtual (*soft sensor* ou estimador inferencial) pode ser considerado como o resultado da associação da tecnologia de Sensores Inteligentes e das técnicas de Modelagem e Identificação de Sistemas, como apresentado na Figura 2.1.

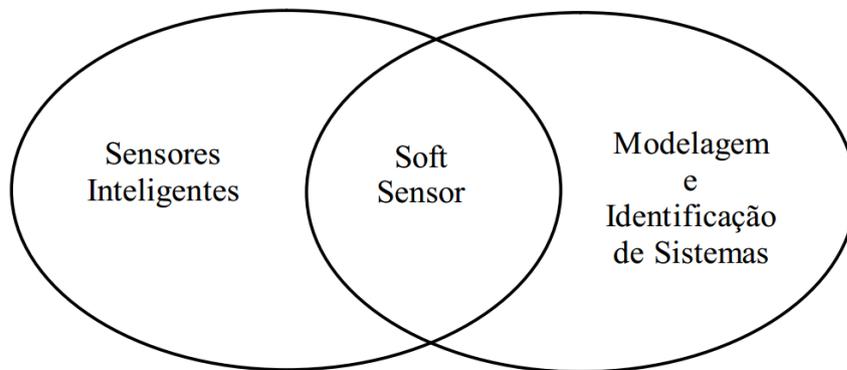


Figura 2.1: *Soft sensor*, representação da associação entre Sensor Inteligente e Modelagem e Identificação de Sistemas.

Essa associação entre sensor e modelo é a idéia fundamental do sensor virtual. Podemos separar o sensor virtual em duas partes distintas: a parte do sensor ou conjunto de sensores, que medem variáveis relacionadas com a variável desejada e a parte do modelo desta relação, geralmente implementado em *software*, capaz de fornecer, por meio de simulação, a variável desejada [7].

Os sensores virtuais apresentam algumas vantagens sobre sensores reais [15]:

- **Substituição de dispositivos de *Hardware* caros**
 - Os sensores virtuais são totalmente baseados em *software*, portanto parte do custo operacional pode ser diminuído se considerar a utilização de sensores virtuais.
- **Fácil implementação em diversos dispositivos**
 - Como são algoritmos matemáticos, podem ser implementados em microcontroladores, microprocessadores, microcomputadores, controladores programáveis com a mínima capacidade de processamento necessária dependendo da aplicação.
- **Estimação de dados em tempo real**
 - Dadas as capacidades da planta, o sensor virtual pode fornecer dados do processo sem os atrasos que aconteceriam por sensores baseados em *hardware* analógico ou análise demoradas do sinal.
- **Para o processo funcionam como sensores reais**
 - O sensor, depois de implantado, é visto como mais um elemento na planta de automação, fornecendo dados importantes para o sistema de controle, porém sem a necessidade de um plano de manutenção e troca, como acontecem com sensores reais.

A seguir alguns trabalhos onde foram desenvolvidos sensores virtuais são apresentados:

Em [16] o texto trata basicamente do monitoramento e localização de pontos de aquecimento em processadores, utilizando-se tanto sensores reais como sensores virtuais. É proposto o uso de técnicas computacionais de sensores virtuais que utilizam sensores reais para calcular de forma ótima as temperaturas onde não há sensores incorporados.

Em [17] foi desenvolvido um sensor virtual baseado em redes neurais artificiais, aplicado ao monitoramento da concentração do álcool hidratado em um aparelho de destilação de etanol. A metodologia consistiu em primeira instância na verificação das variáveis mais relevantes ao processo de estimação da concentração do álcool, para que posteriormente possam ser treinadas, validadas e testadas as redes neurais.

Em [18] foram desenvolvidos sensores virtuais utilizando redes neurais para avaliar a performance do motor, eficiência do combustível e predição de emissão, para ambos, motor

de ignição por faiscamento e motor de ignição por compressão. O sistema de rede neural é capaz de prever em tempo real a potência do motor, o consumo de combustível e as emissões utilizando parâmetros do motor que podem ser facilmente medidos. O sistema consiste de um modelo preditivo do motor que é projetado para ser executado em um microprocessador em paralelo com o motor em tempo real, tomando como sinais de entrada os mesmos obtidos pelos sensores. Aplicações para os modelos desenvolvidos usando este processo incluem diagnóstico do motor, sensoriamento virtual de emissões não medidos ou não mensuráveis do motor, controle do motor, e modelagem do veículo.

Em [19] o artigo descreve uma abordagem para a economia de energia em edifícios comerciais, com base nas informações recolhidas a partir de fontes de contexto oportunistas pré-existentes. A maioria dos sistemas de gestão de energia dependem de uma estratégia de instrumentação para inferir ocupações, e, infelizmente, ignoram fontes de contexto oportunistas já disponíveis, que podem fornecer informações importantes sobre ocupação.

Em [20] foi desenvolvido um sensor virtual, para coluna de destilação, que fosse capaz de estimar instantaneamente a composição dos produtos no topo de uma coluna de destilação multicomponente com condensador parcial. Nesse trabalho o sensor foi desenvolvido utilizando redes neurais artificiais. É também proposta uma metodologia para detecção e correção de erros que foram encontrados e que afetam o comportamento do sensor, alterando sua precisão e capacidade de ser utilizado em um controle inferencial da planta.

Em [21] são apresentados novos algoritmos de detecção de falhas em componentes robóticos usando relações de redundância analítica. Os componentes robóticos críticos a detecção de falhas são revelados usando análise de árvore de falhas estendida. O trabalho válida o algoritmo usando um ambiente simulado de testes de falhas robóticas. Um quadro de tolerância a falhas inteligente é proposto, no qual um banco de dados de árvore de falhas e os algoritmos de detecção trabalham em conjunto para detectar e tolerar falhas de sensores ou de motores, em um sistema robótico. A capacidade de detectar e tolerar falhas permite que robôs lidem eficazmente com falhas internas e continuem executando tarefas designadas sem a necessidade imediata de intervenção humana.

2.2 LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA

A maioria dos metais dilatam quando aquecidos e contraem-se quando resfriados. O oposto pode ocorrer com as LMFs, que podem ser deformadas enquanto resfria, 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 [22].

As Ligas com Memória de Forma (LMF), do inglês *Shape Memory Alloy* (SMA), foram assim nomeadas porque apresentam o Efeito de Memória de Forma (EMF), no qual a liga pode memorizar uma determinada forma. Elas podem ser deformadas permanentemente através de força, mas podem recuperar sua forma memorizada através de aquecimento, e permanecem na sua forma recuperada quando resfriadas [23].

A propriedade que as ligas com memória de forma possuem seguem basicamente dois aspectos [4]:

- Em baixas temperaturas, na ausência de tensão mecânica, o material passa para o estado de martensita;
- Em temperaturas altas, a liga aquece e retorna para sua forma original, austenita.

Na Figura 2.2 apresenta-se um esquema das transformações sofridas pela LMF.

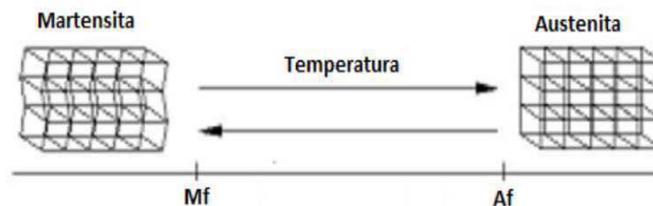


Figura 2.2: Representação da transformação de estado da LMF [2].

Quando a liga encontra-se no estado de austenita (temperatura alta), e esta sofre deformação, com a ausência da tensão mecânica, a liga volta a sua forma original. Já no caso, em que a liga está em temperatura baixa (estado de martensita) ao cessar uma tensão mecânica que previamente causou deformação, ela não retorna ao seu estado original, permanecendo ainda com uma deformação notável [5].

A seguir alguns trabalhos onde foram utilizadas as propriedades das LMFs:

Em [4] é apresentada uma proposta do uso de LMF na atuação em uma plataforma robótica bípede. Onde o aquecimento e resfriamento se dá por efeito Joule. O comportamento da Liga com Memória de Forma favorece a plataforma robótica bípede como meio de atuação

o que proporciona em linhas gerais o seu uso como atuador. Ao se comparar a Liga com Memória de Forma com meios atuadores clássicos pode-se verificar algumas vantagens no seu uso como pequeno peso e volume e grande capacidade de tração.

Em [5] estuda-se a caracterização do comportamento de um sistema articulado sob um carregamento constante, que utiliza como atuador uma liga com memória de forma com composição química principal de níquel e titânio. Testes demonstraram que a posição final da articulação pode ser controlada por intermédio da corrente que circula pelo fio, ocorrendo maior ou menor aquecimento do fio de liga metálica com memória de forma. As principais contribuições do presente projeto de pesquisa tratam da aplicação de um músculo artificial para substituir o natural e/ou treinamento de incapacitados destinado a restabelecer-lhes o uso das faculdades físicas, permitindo a reintegração do indivíduo as suas atividades sociais.

2.3 MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Modelagem matemática é o processo de obtenção de equações ou gráficos que possam representar, da forma mais fiel possível, as características ou comportamentos de um sistema real. A importância de se modelar sistemas reais é evidenciado no âmbito de que os resultados obtidos podem ser usados para proporcionar um melhor conhecimento sobre tal sistema. Em um ambiente industrial, a utilidade dos modelos na implementação de equipamentos ou máquinas está associada à realização de atividades de forma automática, baseada em tais equações matemáticas [24].

Na Figura 2.3 apresenta-se um sistema real e o modelo desse sistema, o qual se utiliza de um conjunto de ferramentas matemáticas para ser descrito.

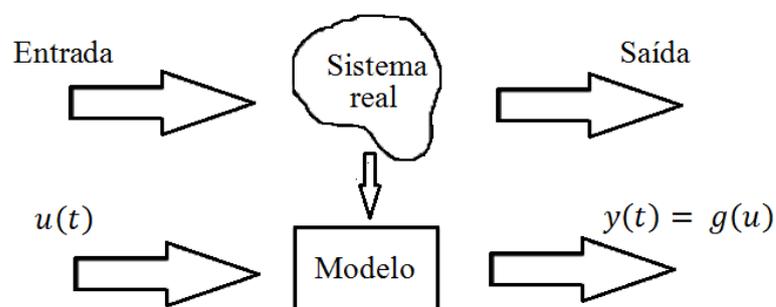


Figura 2.3: Representação do Processo de Modelagem.

Identificação de sistemas é um procedimento que se propõe a obter um modelo matemático que explique, pelo menos em parte e de forma aproximada, o comportamento do processo, sem a necessidade de conhecimento prévio da física do mesmo [24].

Sistemas reais exigem em geral modelos bastante complexos para poder descrever-los, mas muitos desses sistemas apresentam dominância de primeira ordem. Ou seja, embora a função de transferência desse sistema possua uma ordem elevada, o mesmo pode ser descrito aproximadamente com um modelo mais simples, de primeira ordem com atraso [25].

2.3.1 SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM COM ATRASO

Sistemas de primeira ordem com atraso assumem a forma apresentada na equação (2.1), na qual k , τ e t_d são o ganho em regime permanente, a constante de tempo e o atraso de transporte, respectivamente:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-st_d} \quad (2.1)$$

+

Na Figura 2.4 apresenta-se a resposta típica de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte ao degrau unitário.

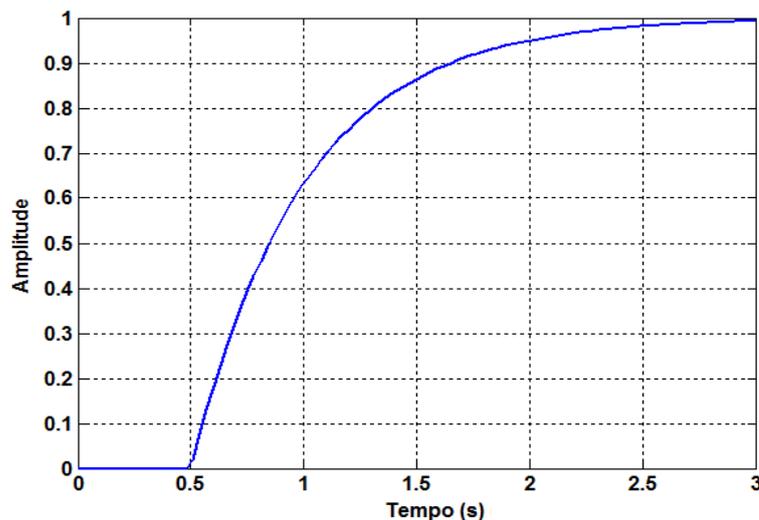


Figura 2.4: Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem com atraso de transporte.

Nesse capítulo foi feita uma fundamentação teórica e uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de sensores virtuais e uma breve explicação sobre as características termomecânicas das LMFs. Como foi visto, para o desenvolvimento de um sensor virtual é necessária a

modelagem do sistema, e por isso foi feita uma fundamentação teórica sobre os conceitos de Modelagem e Identificação de Sistemas e sobre sistemas de primeira ordem.

No capítulo seguinte é apresentada uma descrição da plataforma de testes utilizada no trabalho, onde são descritos também, o funcionamento do sensor de deformação, o funcionamento do elemento de atuação (fio de Liga com Memória de Forma), a placa de aquisição de dados utilizada e os *softwares* utilizados.

3 PLATAFORMAS E CIRCUITOS UTILIZADOS

Nesse capítulo são apresentados a estrutura física da plataforma, os sensores utilizados, bem como seu funcionamento e os circuitos utilizados para condicionamento do seu sinal, o circuito utilizado para ativação do fio de LMF, a placa de aquisição dados para coleta de dados do sistema, e a ferramenta utilizada para modelagem do sistema, *System Identification Tool* ou *ident* do Matlab.

3.1 ESTRUTURA FÍSICA DA PLATAFORMA

A estrutura física da Plataforma de Testes está representada na Figura 3.1, e é composta, basicamente, por três partes:

- Base: Uma base retangular plana, feita de ferro, e que possui dimensões: 100 cm x 25,7 cm x 3,5 cm (C x L x A);
- Coluna de suporte: Uma coluna erguida sobre a base, composta por 4 parafusos de 28 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, dispostos de maneira espaçada formando um retângulo; duas placas de fixação retangulares medindo 10 cm x 12 cm; e uma terceira placa de 22 cm, posicionada verticalmente, para a fixação da LMF, como pode ser visto no detalhe A da Figura 3.1;
- Viga: Uma viga de aço com 55 cm de comprimento, 2,6 cm de largura e 2 mm de espessura. Uma das extremidades da viga é engastada à coluna de suporte através de duas placas de fixação, e a outra extremidade fica livre, mas conectada ao atuador de LMF através de uma pequena peça metálica, como pode ser visto no detalhe B da Figura 3.1.

Colados às faces superior e inferior da viga, estão dois extensômetros de resistência elétrica, que são utilizados para obter dados sobre a deformação sofrida pela viga.

O fio de LMF serve como atuador nessa configuração, podendo tracionar a viga ou liberá-la. Nas extremidades do fio de LMF, são conectados terminais elétricos, através dos quais será fornecido o sinal elétrico de atuação, que faz com que passe uma corrente elétrica

através do fio e por efeito Joule faz com que esse se contraia mais ou menos, dependendo da intensidade da corrente.

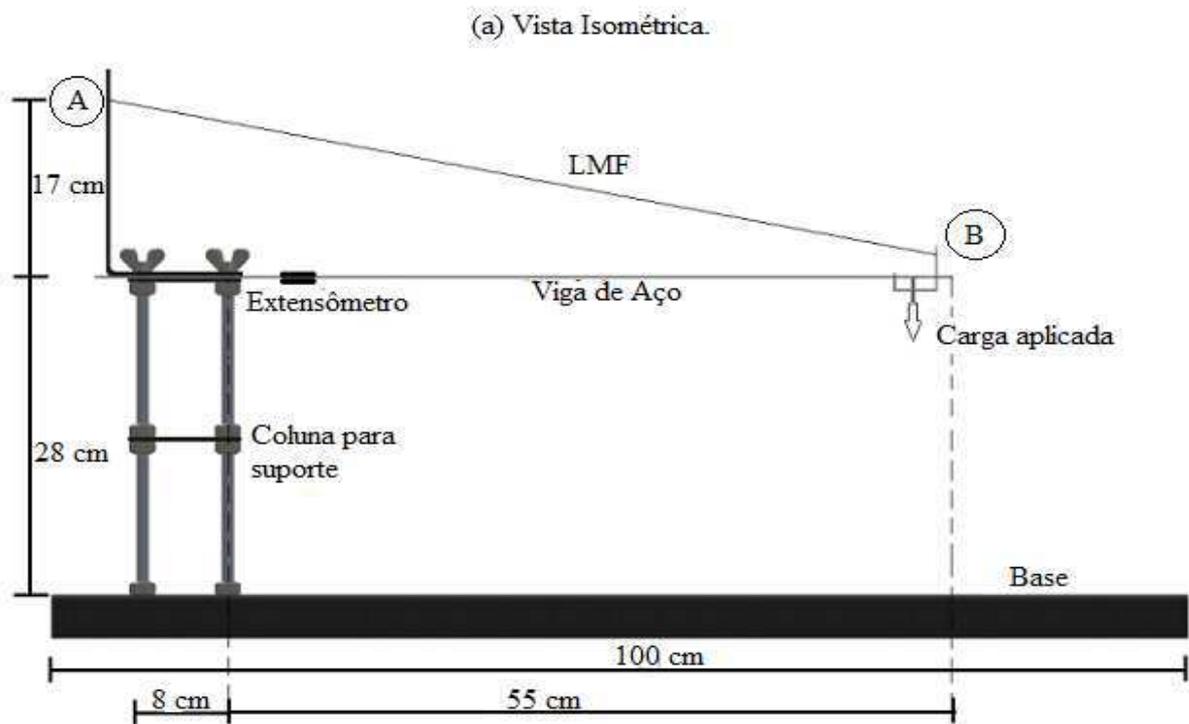
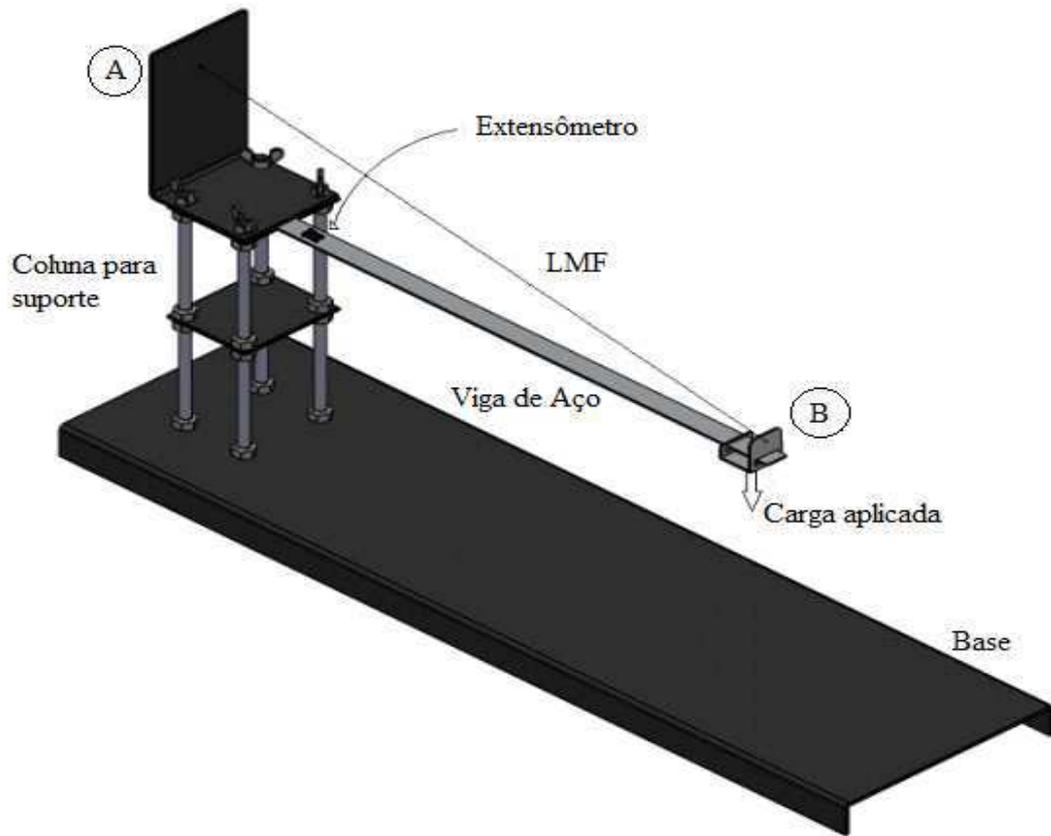


Figura 3.1: Representação da plataforma experimental em vistas isométrica(a) e lateral(b).

3.2 EXTENSÔMETROS

Como mencionado anteriormente, dois sensores de deformação foram utilizados para medir o quanto a viga se deforma (Figura 3.2).

Os modelos de extensômetros utilizados neste trabalho são fabricados pela Excel Sensores, mais especificamente o modelo: PA - 06 - 125BA - 350 - LEN [26].

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 [26].

O extensômetro de resistência elétrica, também conhecido como *strain gauge*, como apresentado na Figura 3.2, 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 [26].

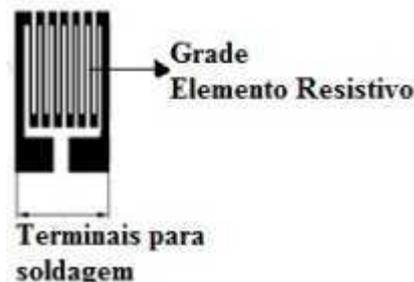


Figura 3.2: Representação de um extensômetro de resistência elétrica.

3.3 PONTE DE WHEATSTONE

O circuito da ponte de Wheatstone, apresentado na Figura 3.3, é utilizado para medir variações relativas que ocorrem em suas impedâncias, em só um 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.

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.

A ponte é composta por dois resistores equivalentes, R_1 e R_2 , e por dois extensômetros, também equivalentes, representados por $(R_G + \Delta R)$ e $(R_G - \Delta R)$ onde R_G é a resistência nominal do extensômetro e ΔR as variações da resistência elétrica devido às deformações.

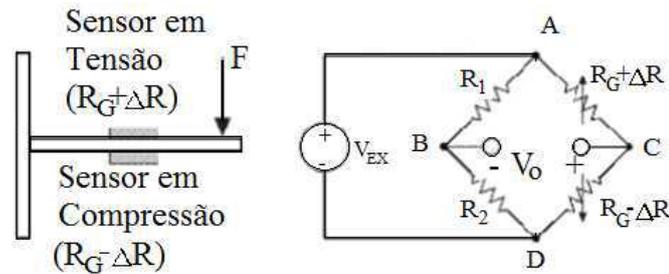


Figura 3.3: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com dois extensômetros.

A saída V_o é dada pela equação (3.1) apresentada a seguir:

$$V_o = \left[\frac{R_G - \Delta R}{2R_G} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right] V_{EX} \quad (3.1)$$

Onde V_{EX} é uma tensão constante que alimenta a ponte e V_o é a tensão de saída da ponte que representa o quanto o extensômetro foi deformado.

3.4 CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO DO SINAL

Na Figura 3.4, está representado o circuito que identifica a deformação da viga e a converte em sinais elétricos. Este circuito é constituído, resumidamente, pela Ponte de Wheatstone, da qual os extensômetros fazem parte, pelo amplificador de instrumentação e por filtros elétricos, cuja função é reduzir o ruído do sinal de saída.

A saída da Ponte está conectada às entradas do amplificador de instrumentação, INA101, cuja função principal é elevar o sinal de saída da ponte a valores que possam ser medidos através da placa de aquisição de dados.

O valor da tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone com extensômetros é relativamente pequeno, da ordem de dezenas de μV , 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. Para resolver esse problema, é feito o ajuste de *offset* através do *software* LabVIEW, no qual foi desenvolvido um programa que faz a aquisição de dados do sistema. Portanto, ao iniciar o experimento o valor de tensão de saída é medido para a situação de repouso e é feito o ajuste de *offset*.

A última etapa do circuito é um Filtro Passa Baixas Passivo, composto apenas por um filtro RC, e possui como objetivo diminuir o ruído do sinal de saída, que pode interferir de maneira significativa nas medições. Este filtro possui frequência de corte igual a 33 Hz, aproximadamente. Este valor de frequência é utilizado visando diminuir os ruídos de baixa frequência, como aqueles provenientes da rede elétrica, 60 Hz.

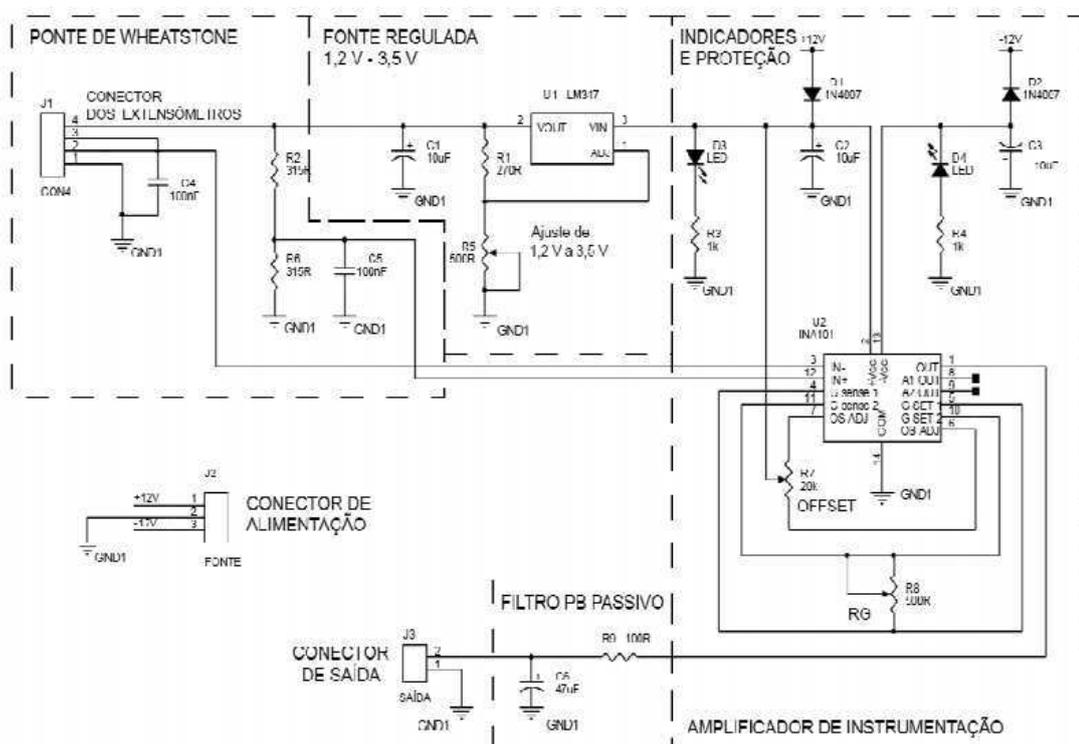


Figura 3.4: Diagrama do circuito de condicionamento de sinal dos extensômetros.

3.5 CIRCUITO PARA ACIONAMENTO DA LMF

Para o acionamento da LMF foi utilizado um sinal modulado por largura de pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM), fornecido pelo PC através do sistema de aquisição de dados. Este sinal é usado para chavear o transistor Q1, IRF 9540N, que está conectado em série com a LMF, como ilustrado no diagrama da Figura 3.5.

Através do terminal "Tensão1" é obtida uma amostra do sinal (tensão elétrica) que aparece sobre a LMF(SMA), essa amostra é obtida usando-se um filtro passa-baixa composto por um resistor de $1k\Omega$ e um capacitor de $10\mu F$. Estes valores não correspondem aos valores exatos de tensão sobre a LMF, já que, estes não são lidos diretamente sobre a liga, e, portanto, precisam ser ajustados visando obter os valores reais.

É importante observar que o valor de tensão que aparece sobre a LMF não é diretamente proporcional ao sinal de PWM aplicado, devido à variações na resistência da liga.

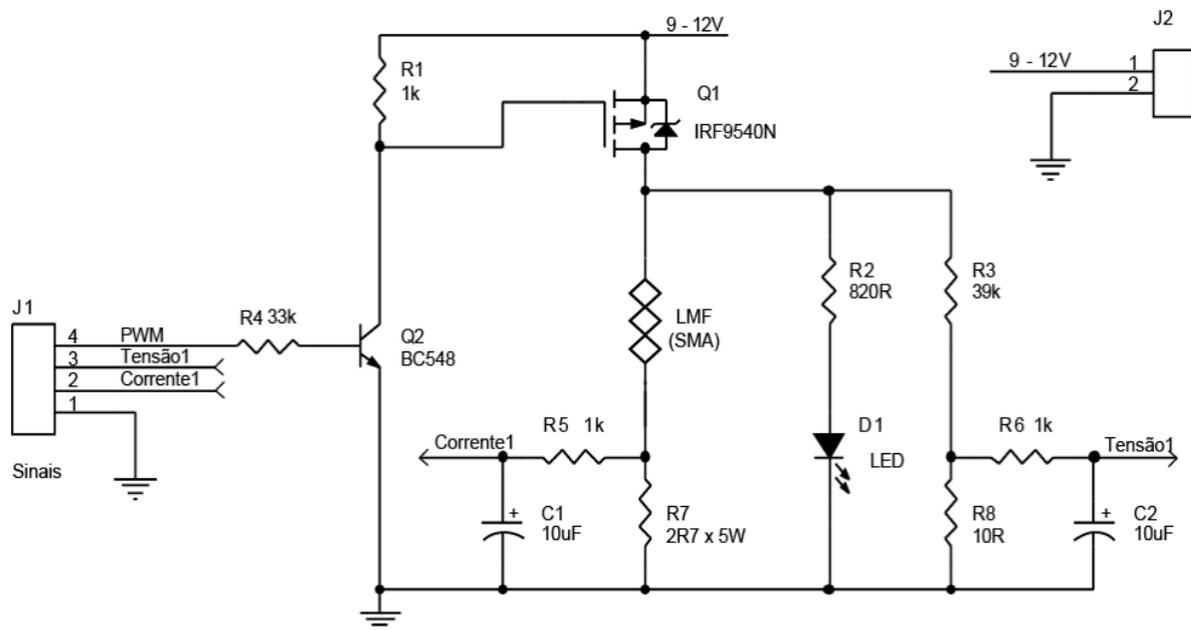


Figura 3.5: Diagrama do circuito de acionamento da LMF.

3.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição dos dados é realizada com o auxílio de três dispositivos da National Instruments: o bloco de terminais NI BNC 2110, o cabo de transmissão de dados NI SH6868 -

EP e a placa NI PCI 6036e, representados na Figura 3.6. Estes dispositivos realizam a interligação entre a Plataforma de Testes e o Computador.

A placa 6036E oferece as seguintes funcionalidades [27]:

- 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, e Measurement Studio for Visual Basic.

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 [28]:

- 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.

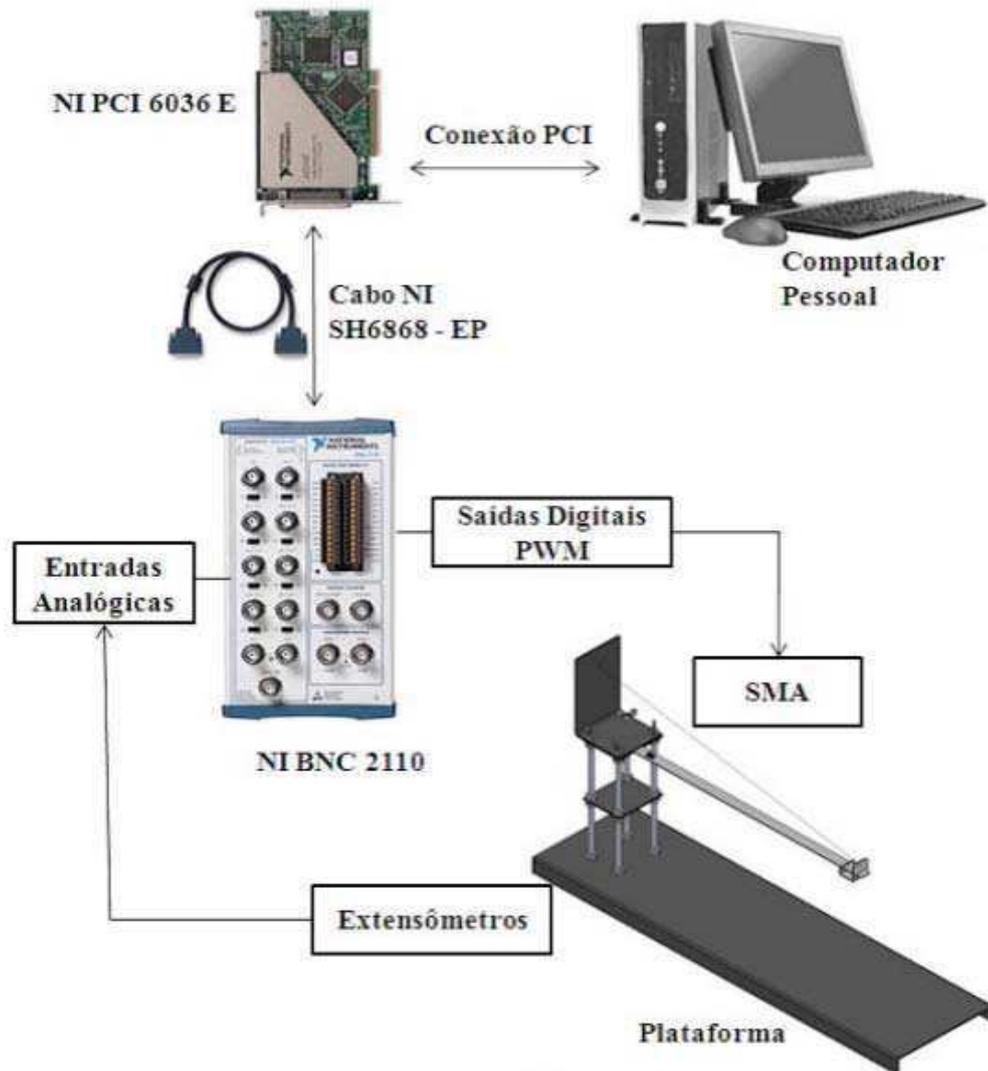


Figura 3.6: Esquema para aquisição de dados e atuação sobre a LMF.

3.6.1 INTERFACE EM LABVIEW PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a aquisição de 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. 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.

Além do sinal do extensômetro também são coletados os dados da "Tensão 1" explicado na seção 3.5, que corresponde ao sinal de entrada que será utilizado para a modelagem do sistema.

Na Figura 3.7 apresenta-se a interface criada em LabVIEW para a coleta de dados.

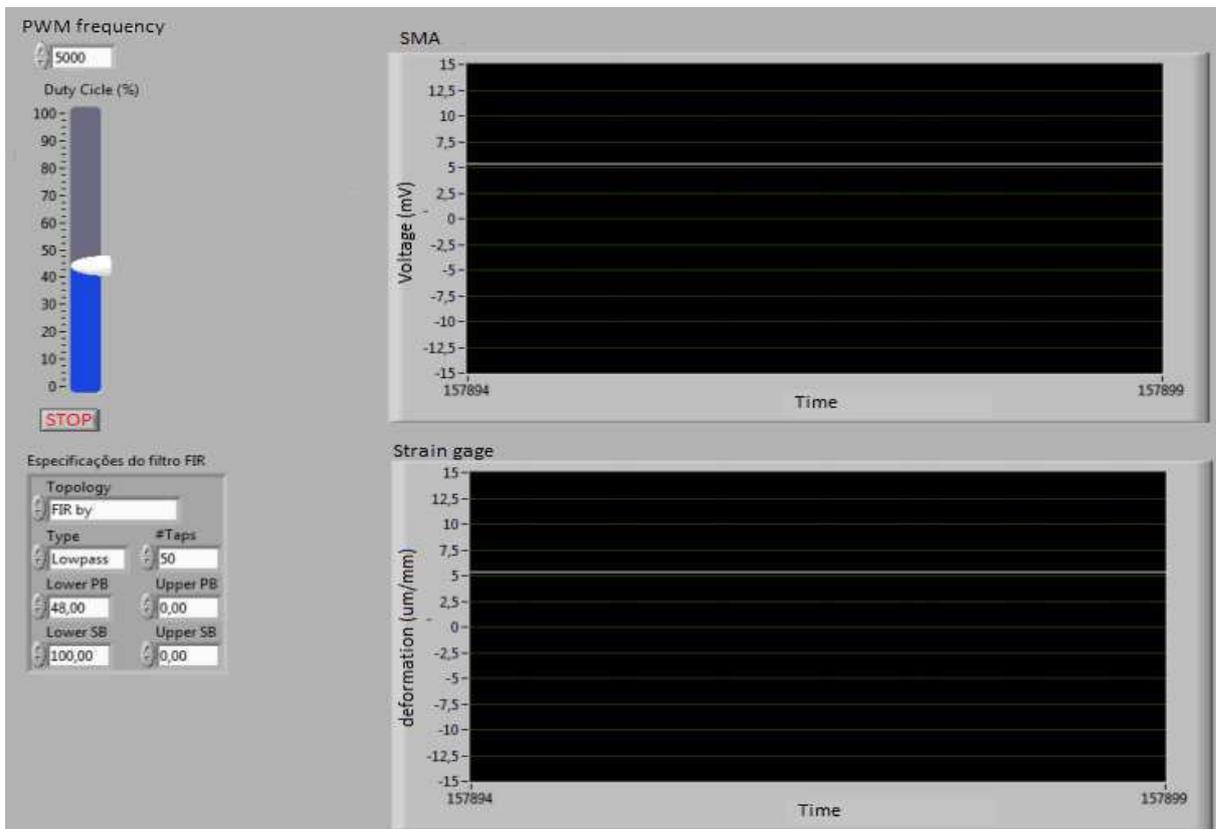


Figura 3.7: Interface em LabVIEW para aquisição de dados.

Ao fim da coleta dos dados, esses são então salvos para uma posterior análise. Isso é feito utilizando uma ferramenta do LabVIEW que permite a integração do *software* com o Matlab. O bloco do LabVIEW que faz essa integração com o Matlab é o "Matlab Script". Quando pressionado o botão "STOP" ou alguma condição de parada for alcançada os dados são então enviados ao Matlab e armazenados em variáveis.

3.6.2 FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO *IDENT* (MATLAB)

A partir dos dados obtidos com os experimentos utilizou-se a ferramenta de identificação computacional de sistemas fornecida pelo Matlab, chamada *System Identification Tool* (Figura 3.8). Para utilizar essa ferramenta basta escrever na área de trabalho do Matlab a palavra *ident*.

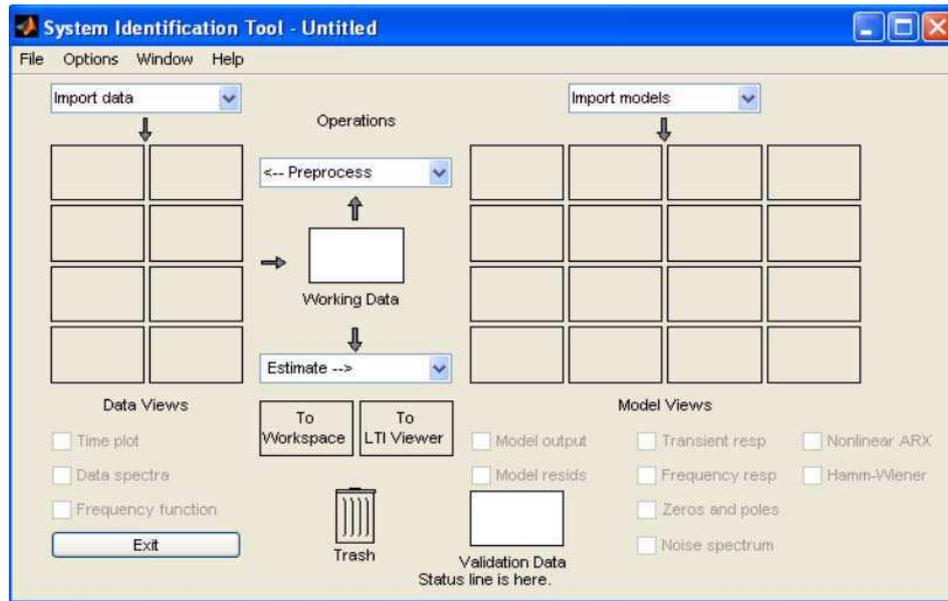


Figura 3.8: Interface do *ident* do Matlab.

Essa ferramenta constrói modelos matemáticos de sistemas dinâmicos utilizando os dados obtidos da entrada e saída do sistema. Utilizando-se essa ferramenta, também foi possível validar os modelos obtidos, ou seja, é feita uma comparação entre o modelo gerado e os dados obtidos de outras medições que não fossem aqueles utilizados para se gerar os modelos. Dessa forma foi possível quantificar através do Matlab o quanto os modelos gerados e os dados reais da planta são próximos.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados dos testes feitos com a plataforma.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados de testes feitos com a plataforma para descrever seu comportamento, e a partir dos dados, são obtidos modelos matemáticos para o sistema. Com os dados e modelos obtidos é implementado um programa em Labview que monitora a plataforma, e atua no sentido de substituir o sensor real quando esse falhar. E são então apresentados os resultados dos testes com esse programa, onde são simuladas falhas no sensor e verifica-se a ação do sensor virtual.

4.1 AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DA LMF

Através do *software* desenvolvido em LabVIEW, a tensão de entrada é aumentada gradualmente alterando-se o *duty cycle* de 10% em 10% até atingir 100% do *duty cycle* do sinal PWM (deformação máxima da viga) responsável por chavear o transistor Q1 (seção 3.5). A frequência do sinal PWM é de 1kHz e o *duty cycle* é alterado a cada 30s, que foi o tempo observado experimentalmente para garantir que o sistema atingisse o estado estacionário [29], [30].

Com o aumento da tensão sobre o fio de LMF, por efeito Joule, esse se aquece cada vez mais, e como foi explicado anteriormente, a liga se contrai cada vez mais, tracionando o fio e deformando a viga e conseqüentemente os extensômetros [29], [30].

Para o caso de resfriamento é feito o procedimento inverso ao do aquecimento, o processo é iniciado com o *duty cycle* do sinal PWM em 100% e gradualmente diminui-se o valor do *duty cycle* de 10% em 10% até atingir 0% do *duty cycle* do sinal PWM (deformação mínima), de 30s em 30s. Ou seja, a tensão média aplicada ao fio diminui gradualmente e portanto a temperatura do fio diminui (efeito Joule) [29], [30].

Nas Figuras 4.1 e 4.2, tem-se os gráficos com os dados de entrada e saída obtidos do sistema com o tempo. Nas Figuras 4.1a e 4.1b foram simulados o sistema sem carga adicional em aquecimento e em resfriamento respectivamente. E nas Figuras 4.2a e 4.2b foram simulados o sistema quando adicionada uma carga de 100g na extremidade livre da barra, em aquecimento e em resfriamento respectivamente. O local onde é colocada a carga é vista na Figura 3.1 onde se lê "carga aplicada". Testes com carga maior que 100g também foram realizados, no entanto a diferença entre os resultados com carga de 100g e 150g foi quase

nula. A utilização de carga superior a 150g não foi feita devido à um possível comprometimento físico ao fio de LMF.

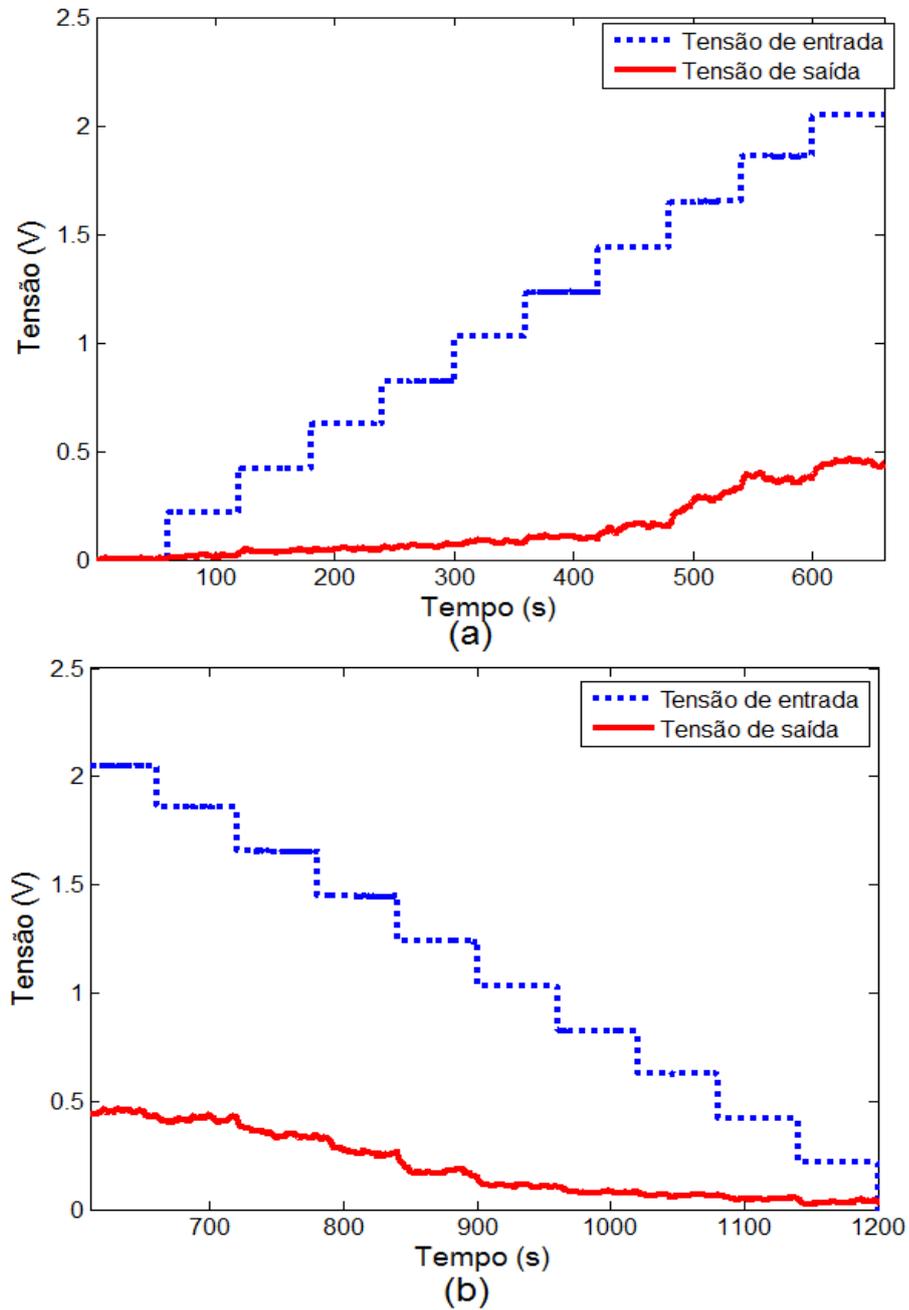


Figura 4.1: Gráficos de aquecimento (a) e resfriamento (b) sem carga.

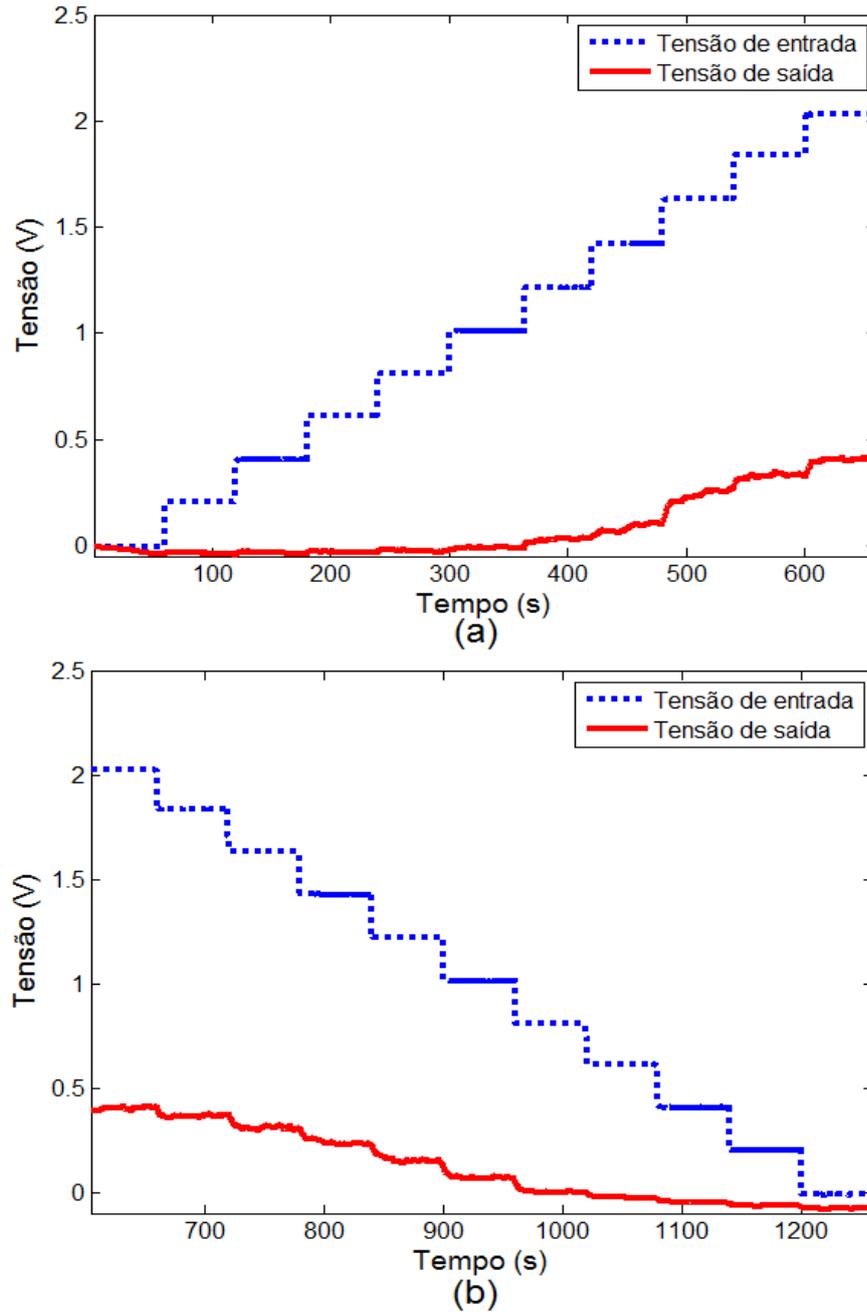


Figura 4.2: Gráfico do aquecimento (a) e resfriamento (b) com carga de 100g.

4.2 HISTERESE

Para observar o comportamento do sistema, foram utilizados os dados obtidos na seção 4.1 para o sistema sem carga, onde relacionou-se o sinal de entrada ("Tensão 1") e o sinal de saída (coletada dos extensômetros após ser tratada pelo circuito de condicionamento de sinal).

Na Figura 4.3 tem-se o comportamento de histerese próprio das LMFs, onde a curva pontilhada representa o resfriamento e a linha contínua o aquecimento da liga (sem carga aplicada).

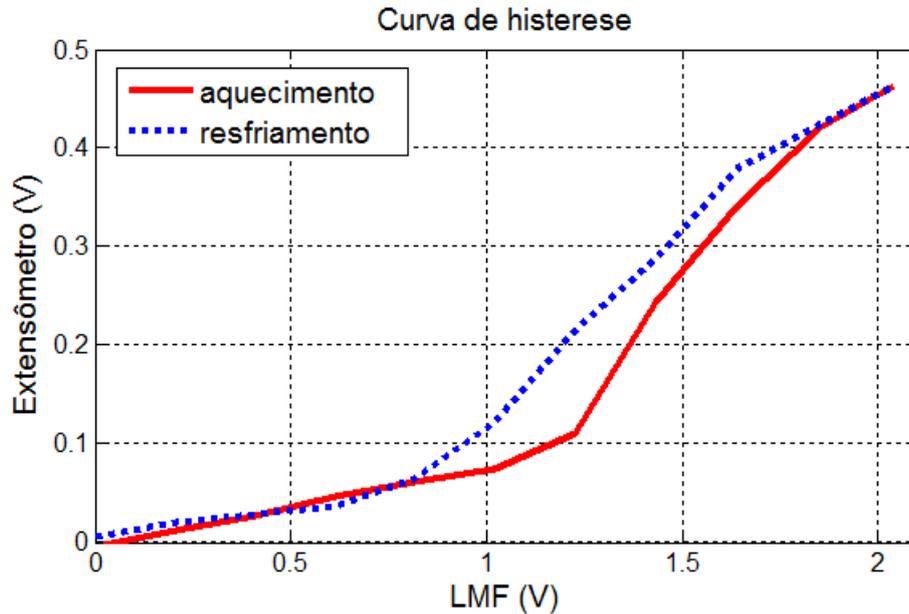


Figura 4.3: Curva de histerese do sistema.

4.3 MODELAGEM DO SISTEMA

Devido ao comportamento de histerese do sistema, a modelagem desse sistema por um único modelo de primeira ou de segunda ordem não foi satisfatório para o objetivo do trabalho que é utilizar um sensor virtual para monitorar o sistema.

Decidiu-se então modelar o sistema completo com 6 modelos de primeira ordem, onde cada modelo representa parte do sistema. Foram utilizados 3 modelos de primeira ordem para modelar a curva de aquecimento e 3 modelos de primeira ordem para modelar a curva de resfriamento. Ou seja, dependendo do sinal de entrada um modelo diferente será utilizado [30].

Utilizou-se a ferramenta de identificação de sistemas (*ident*) fornecida pelo Matlab para obter-se os 6 modelos e esse processo foi feito para o sistema sem carga e para o sistema com uma carga de 100g.

Também foi feita a validação dos modelos gerados para se ter um parâmetro do quão satisfatórios são esses modelos. Para isso, gera-se os modelos com dados coletados em um teste e utiliza-se dados coletados em outro teste para se comparar com o modelo gerado; o que

também é feito no próprio *ident*. Esse então gera um gráfico com o modelo e com o dado que foi utilizado para validar o modelo, e ao lado mostra um quadro em que está escrito *Best Fits* e abaixo desse tem-se o valor em porcentagem do quão próximo estão o modelo e a saída medida.

Os modelos gerados pelo *ident* para o aquecimento sem carga estão apresentadas nas equações (4.1), (4.2) e (4.3). E à esquerda de cada equação estão descritos as faixas de valores de tensão de entrada utilizadas para gerar cada modelo.

$$0V - 1,1V \quad G_{A1}(s) = \frac{0,082}{(3,156s + 1)} e^{-0,1s} \quad (4.1)$$

$$1,1V - 1,43V \quad G_{A2}(s) = \frac{0,189}{(34,41s + 1)} \quad (4.2)$$

$$1,43V - 2,1V \quad G_{A3}(s) = \frac{0,235}{(28,66s + 1)} \quad (4.3)$$

As curvas dos modelos gerados para aquecimento sem carga são observados na Figura 4.4. A saída de cada um dos modelos se ajusta em mais que 76,2% com a saída medida.

E os modelos gerados para o resfriamento sem carga foram as equações (4.4), (4.5) e (4.6). E à esquerda de cada equação estão descritos as faixas de valores de tensão de entrada utilizadas para gerar cada modelo.

$$2,1V - 1,5V \quad G_{R1}(s) = \frac{0,229}{(2,113s + 1)} \quad (4.4)$$

$$1,5V - 1,23V \quad G_{R2}(s) = \frac{0,150}{(41,862s + 1)} \quad (4.5)$$

$$1,23V - 0V \quad G_{R3}(s) = \frac{0,033}{(66,902s + 1)} \quad (4.6)$$

As curvas dos modelos gerados para resfriamento sem carga são observados na Figura 4.5. A saída de cada um dos modelos se ajusta em mais que 66,32% com a saída medida.

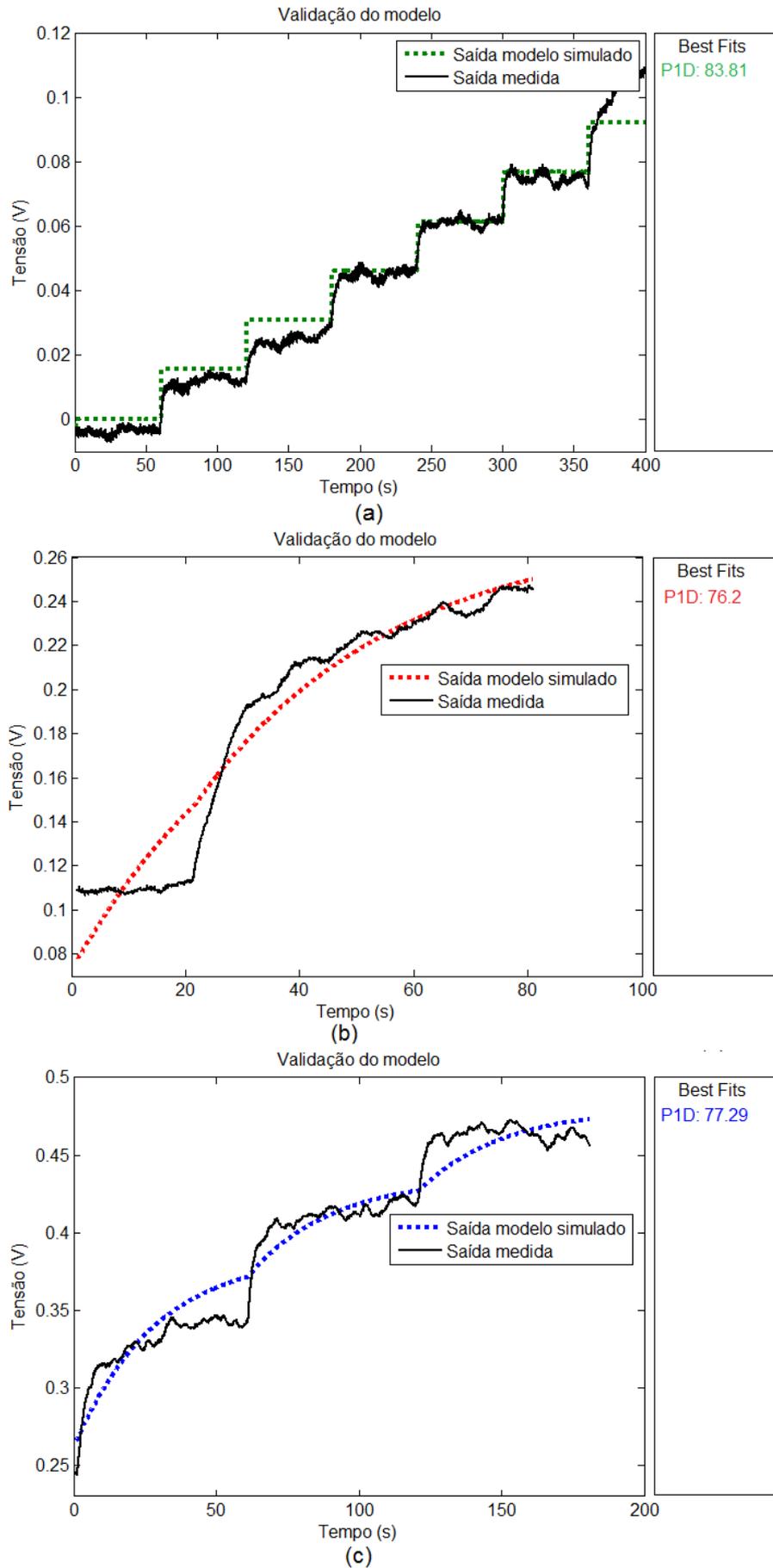


Figura 4.4: Validação dos modelos gerados para o aquecimento sem carga.

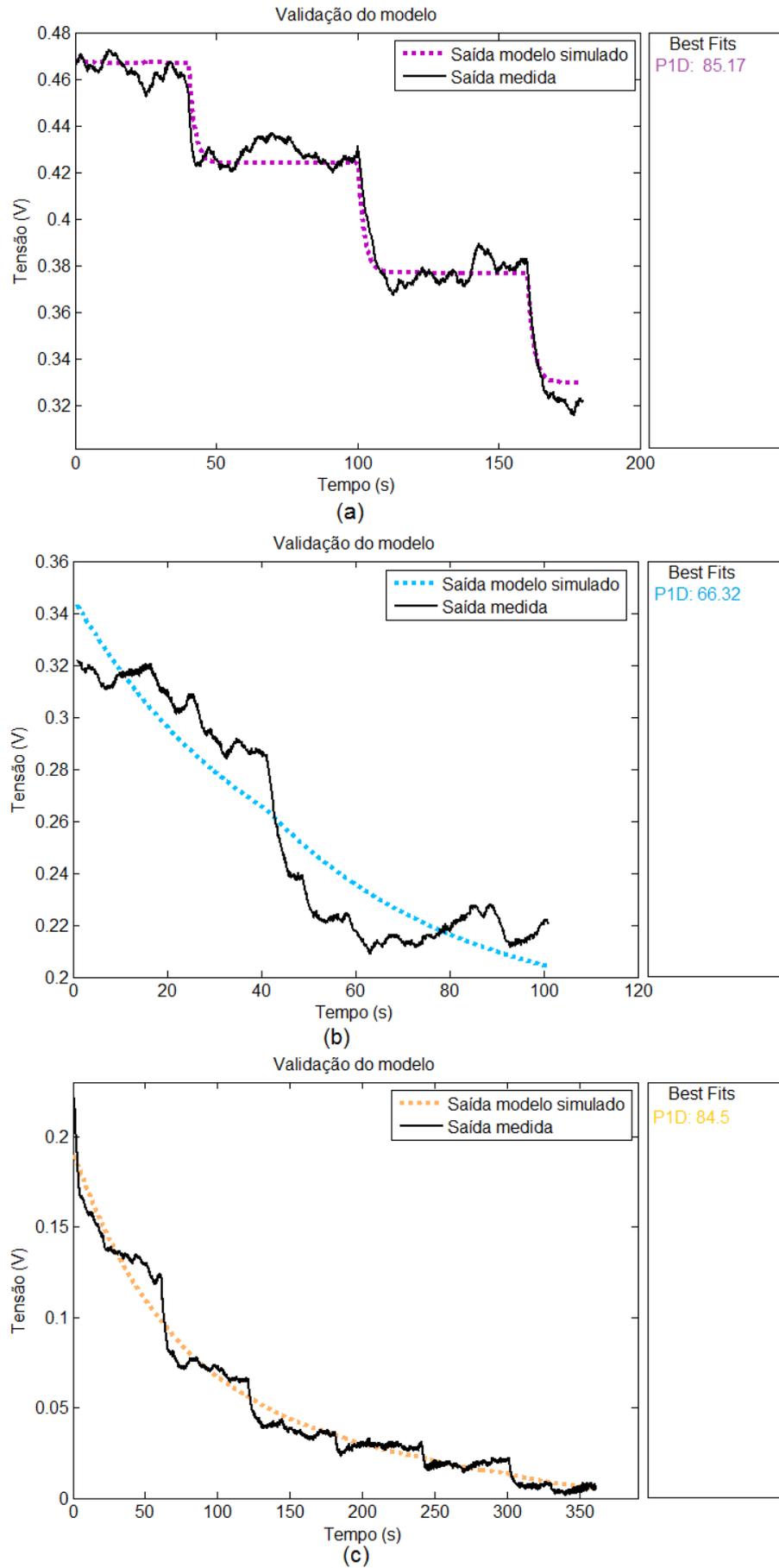


Figura 4.5: Validação dos modelos gerados para o de resfriamento sem carga.

Os modelos gerados pelo *ident* para o aquecimento com carga estão apresentados nas equações (4.7), (4.8) e (4.9). E à esquerda de cada equação estão descritos as faixas de valores de tensão de entrada utilizadas para gerar cada modelo.

$$0V - 1,1V \quad G_{A1}^C(s) = \frac{0,064}{(1,562s + 1)} e^{-0,13s} \quad (4.7)$$

$$1,1V - 1,43V \quad G_{A2}^C(s) = \frac{0,178}{(41,418s + 1)} \quad (4.8)$$

$$1,43V - 2,1V \quad G_{A3}^C(s) = \frac{0,245}{(42,439s + 1)} \quad (4.9)$$

As curvas dos modelos gerados para aquecimento com carga são observados na Figura 4.6. A saída de cada um dos modelos se ajusta em mais que 73,14% com a saída medida.

E os modelos gerados para o resfriamento com carga estão apresentados nas equações (4.10), (4.11) e (4.12). E à esquerda de cada equação estão descritos as faixas de valores de tensão de entrada utilizadas para gerar cada modelo.

$$2,1V - 1,5V \quad G_{R1}^C(s) = \frac{0,233}{(2,020s + 1)} \quad (4.10)$$

$$1,5V - 1,23V \quad G_{R2}^C(s) = \frac{0,166}{(17,393s + 1)} \quad (4.11)$$

$$1,23V - 0V \quad G_{R3}^C(s) = \frac{0,075}{(27,963s + 1)} \quad (4.12)$$

As curvas dos modelos gerados para resfriamento com carga são observados na Figura 4.7. A saída de cada um dos modelos se ajusta em mais que 60,4% com a saída medida.

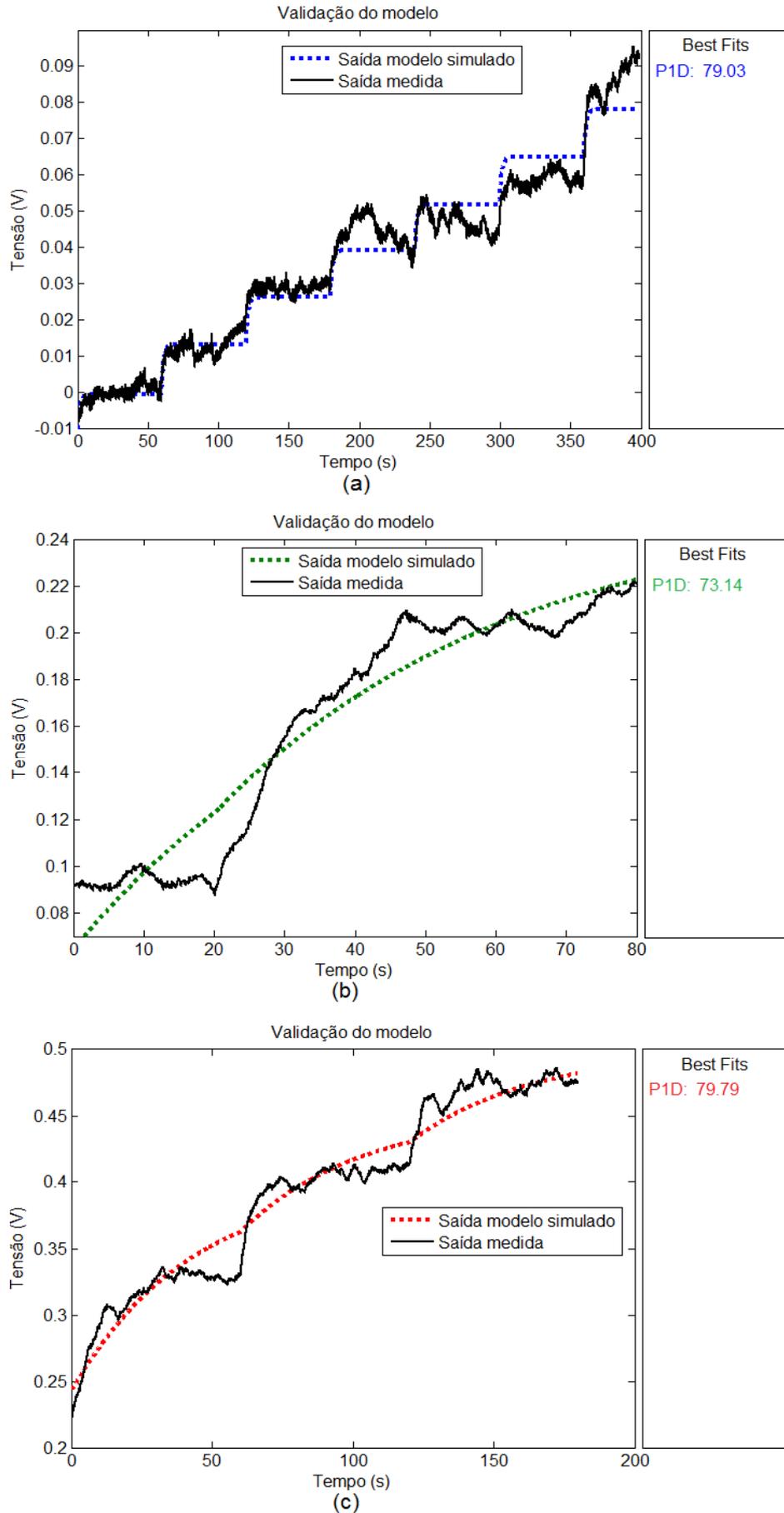


Figura 4.6: Validação dos modelos gerados para o aquecimento com carga.

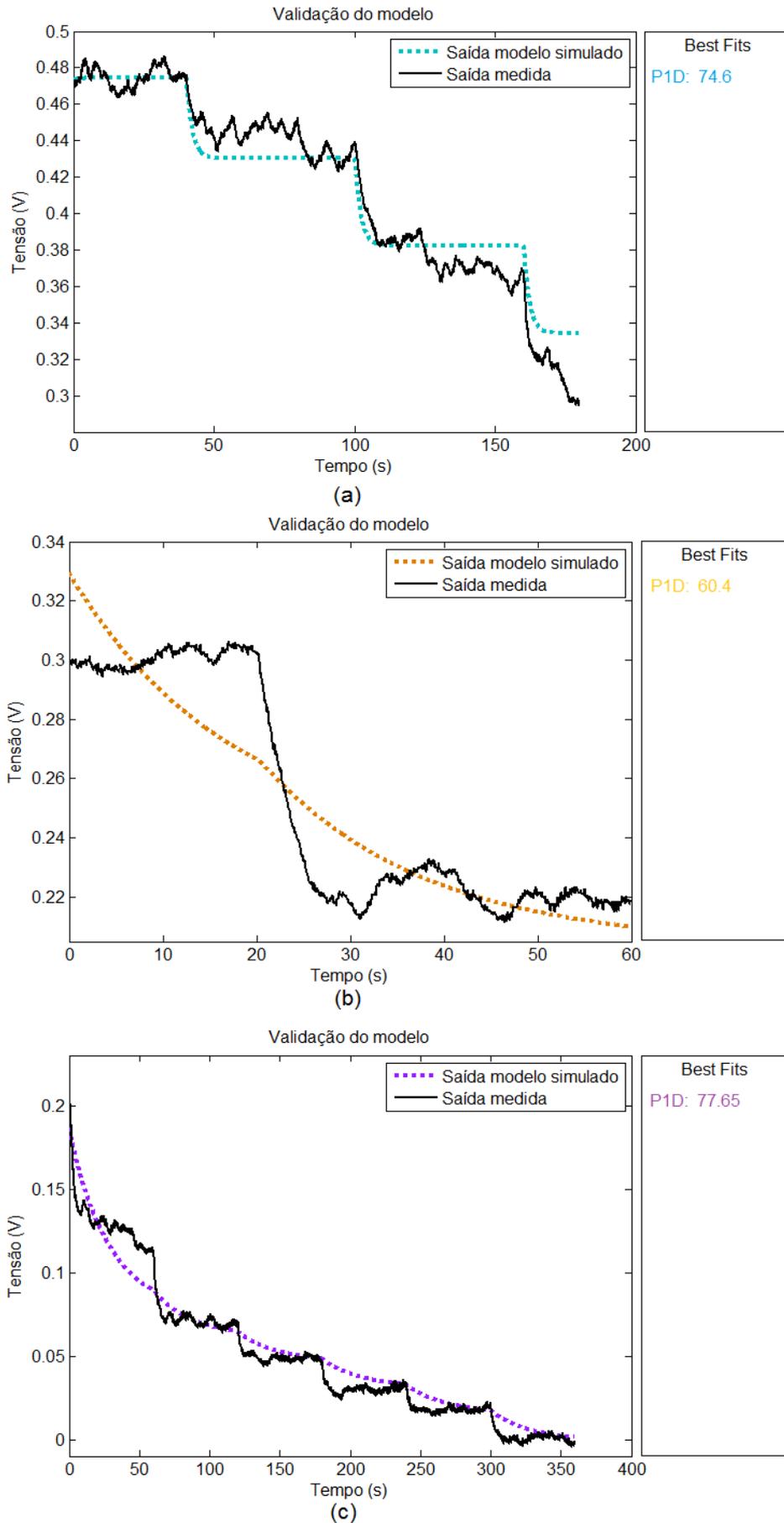


Figura 4.7: Validação para os modelos gerados para o resfriamento com carga.

Após obtidos os modelos para o sistema, foi implementado um programa em LabVIEW para o monitoramento do processo. O programa recebe os sinais do sistema, sinal de entrada e sinal de saída (extensômetro), e quando ocorre a perda do sinal da variável de saída, ou seja, ocorre alguma falha no sensor de deformação. O programa percebe essa perda do sinal e através dos modelos obtidos faz o papel do sensor, ou seja, um sensor virtual.

4.4 INTERFACE GRÁFICA

Uma interface gráfica foi desenvolvida para que se pudesse simular o monitoramento do sistema. Para cada um dos casos mencionados na seção 4.3 desse trabalho foi desenvolvido um programa, ou seja, a escolha do programa depende do teste que vai ser feito, se com ou sem carga e se vai ocorrer aquecimento ou resfriamento. No entanto, a interface para cada programa é a mesma, e as mudanças ocorrem na programação, já que em cada caso os modelos obtidos são diferentes.

A interface é apresentada na Figura 4.8, nessa Figura estão destacados por retângulos e pelas letras A, B, C, D e E em vermelho, alguns pontos importantes para o uso do programa. No detalhe A, o usuário ajusta o *offset* do sinal de saída antes do início dos testes; o ajuste é feito colocando-se o sinal de entrada em 0V e observando-se a saída até essa atingir 0V também. No detalhe B, é feita a mudança do sinal de entrada, e em cada caso, aquecimento ou resfriamento, a mudança deverá ser respectivamente, positiva ou negativa. No detalhe C, tem-se um led que indica a perda ou não do sinal do extensômetro. No detalhe D, é mostrado o gráfico referente ao sinal de saída medido e do sinal do modelo. E no detalhe E, é mostrado o botão, STOP que deve ser pressionado para acabar a simulação, e além disso, os dados obtidos são salvos em variáveis no programa Matlab.

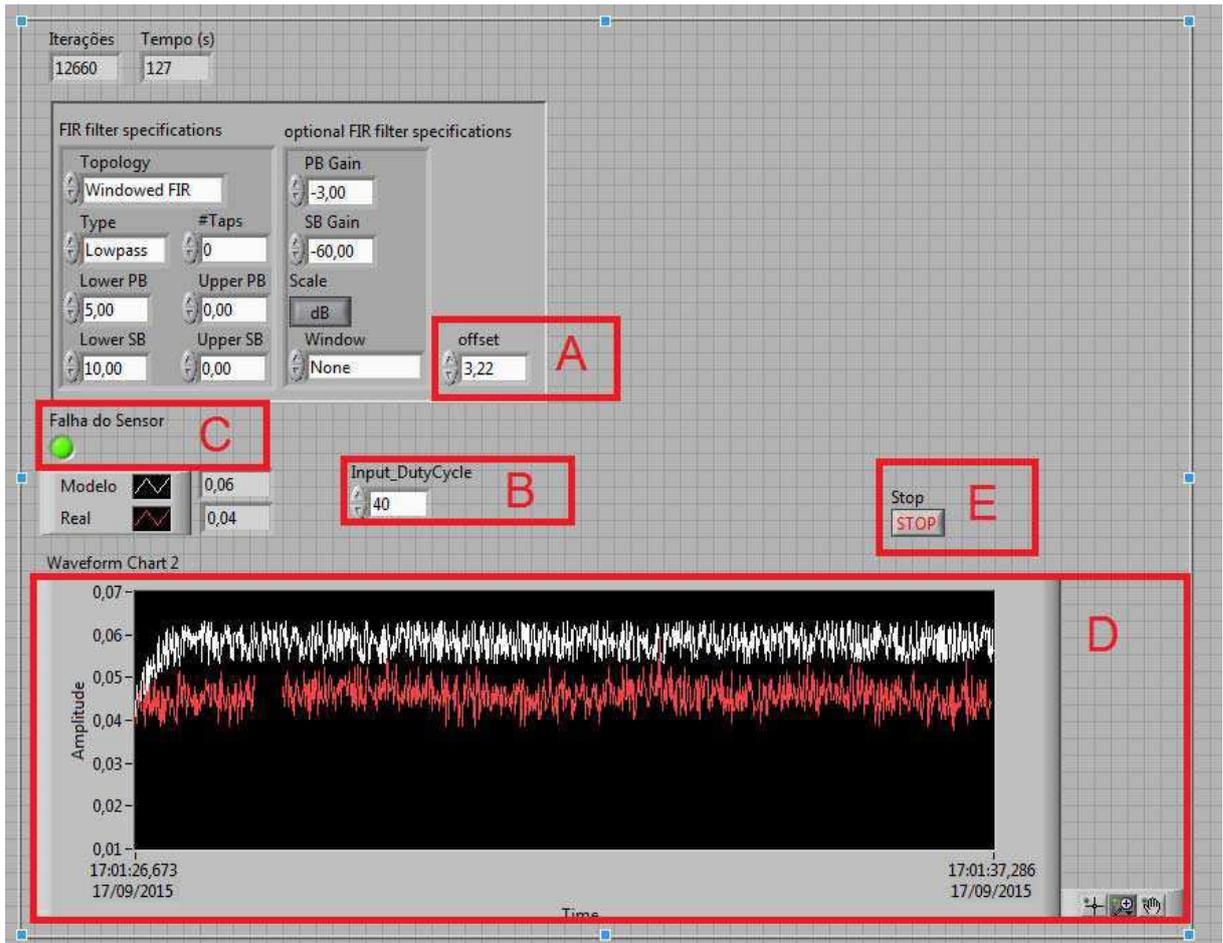


Figura 4.8: Interface gráfica do programa (sensor virtual).

Para simular a perda do sinal do sensor, foram feitos testes retirando-se o sensor do circuito e, como trata-se de um sensor resistivo e de resistência baixa, quando se retira o mesmo do circuito, o circuito fica em aberto, ou seja, a resistência tende a infinito. Pela equação (3.1) (tensão de saída da ponte de Wheatstone), quando um dos sensores é retirado, o valor da tensão de saída cresce bastante em módulo, para valores muito maiores que os valores medidos com o sistema funcionando normalmente. Por essa condição é que foi possível determinar quando ocorre a falha do sensor.

Nesse capítulo são inicialmente apresentados testes gerais. São apresentados também testes experimentais feitos para se comparar o sinal obtido do sensor real e o sinal calculado pelo programa sem que haja a falha do sensor. Em seguida alguns testes em que ocorre a falha do sensor real e o sensor virtual assume o seu papel.

4.5 RESULTADOS PARA SAÍDA MEDIDA E SAÍDA DO MODELO COMPLETO

Na Figura 4.9, tem-se o gráfico do sinal de saída medido e sinal do modelo, para o caso em que ocorre aquecimento sem carga.

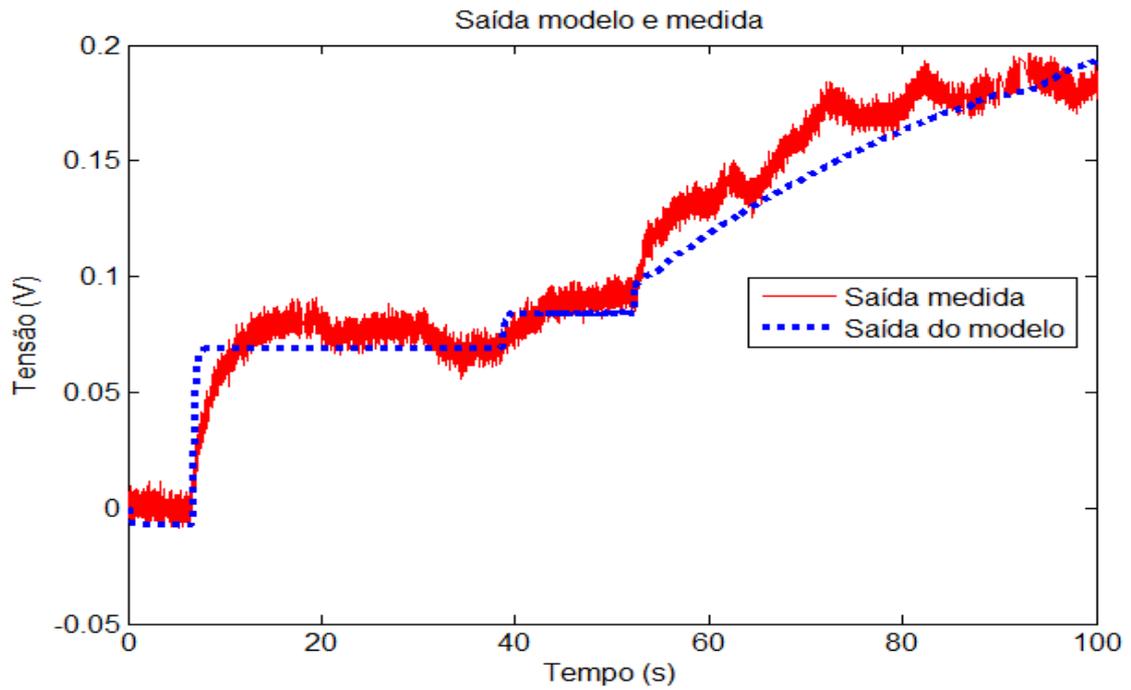


Figura 4.9: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de aquecimento sem carga.

Na Figura 4.10, tem-se o gráfico do sinal de saída medido e sinal do modelo, para o caso em que ocorre resfriamento sem carga.

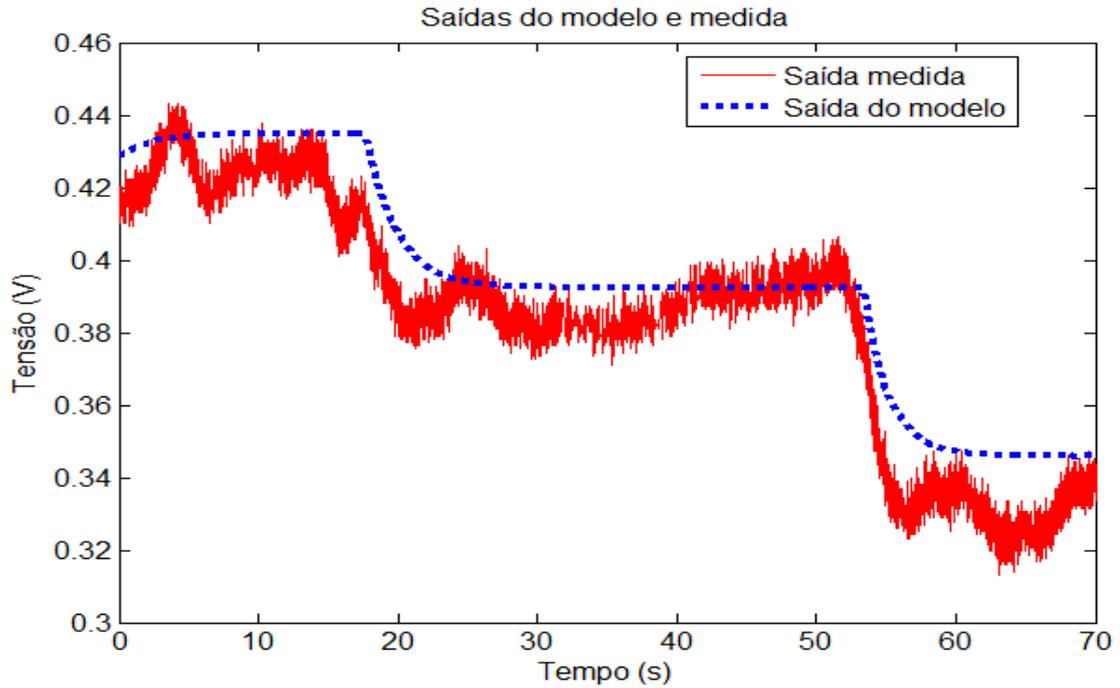


Figura 4.10: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de resfriamento sem carga.

Na Figura 4.11, tem-se o gráfico do sinal de saída medido e sinal do modelo, para o caso em que ocorre aquecimento com carga de 100g.

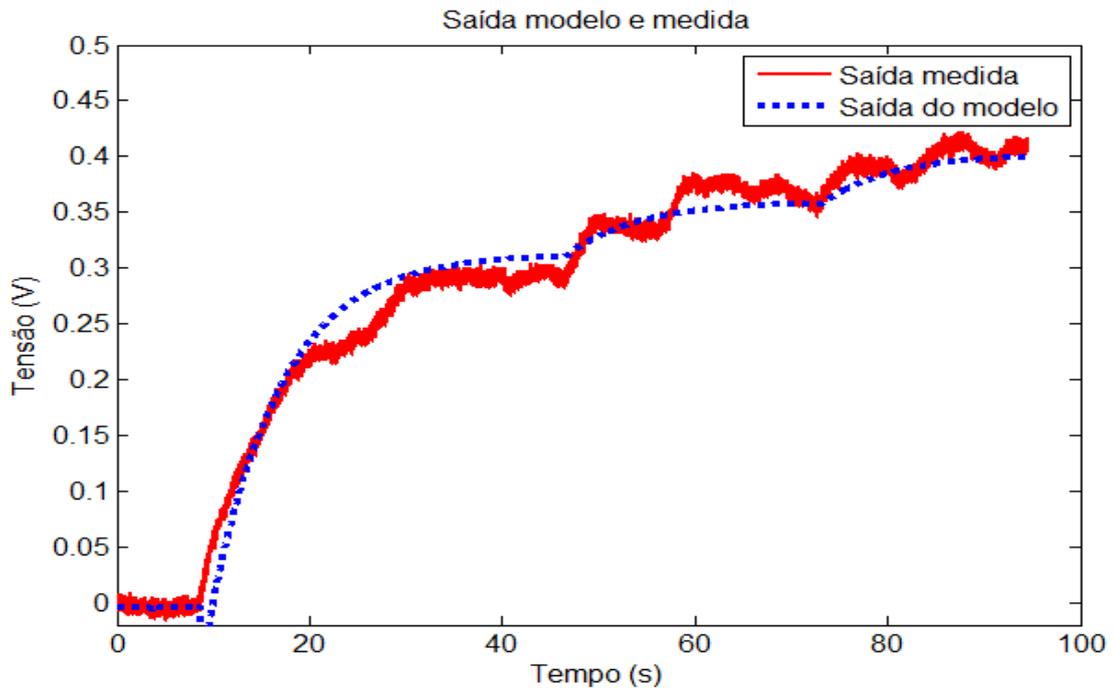


Figura 4.11: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de aquecimento com carga.

Na Figura 4.12, tem-se o gráfico do sinal de saída medido e sinal do modelo, para o caso em que ocorre resfriamento com carga de 100g.

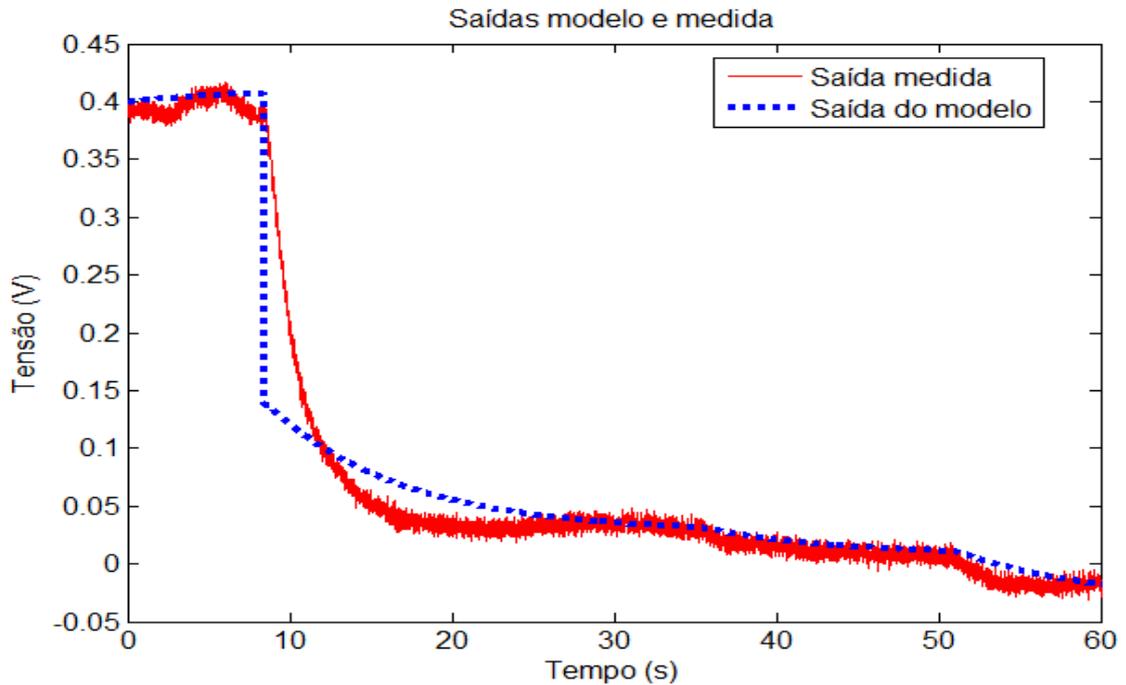


Figura 4.12: Gráfico com sinal medido e sinal do modelo para o caso de resfriamento com carga.

Pode-se notar que o sinal medido e o sinal do modelo são bem próximos, e em alguns pontos do sinal do modelo pode haver alguma descontinuidade. Isso ocorre pelo fato de o sinal do modelo depender de 3 modelos diferentes, onde cada um dos modelos representa parte do sistema completo, e quando se altera o valor do sinal de entrada, o programa verifica qual modelo deverá ser utilizado, e se existir a necessidade de trocar o modelo, nesse momento pode ocorrer uma mudança brusca no sinal. Esse fato pode ser observado mais claramente no gráfico da Figura 4.12, próximo ao ponto 10s e 0,15V.

4.6 TESTES COM FALHA NO SENSOR

Os testes realizados com o programa desenvolvido para monitoramento do sistema estão representados nas Figuras 4.13 a 4.16, para os casos em que ocorre aquecimento sem carga, resfriamento sem carga, aquecimento com uma carga de 100g e resfriamento com uma carga de 100g, respectivamente.

Em cada teste, onde está indicado "Perda do sinal", significa que durante o teste o sensor foi retirado para simular uma falha. Imediatamente o programa substitui o sinal do sensor real pelo sinal calculado pelo modelo. Depois, coloca-se o sensor novamente e o

programa substitui o sinal que estava sendo adquirido do modelo pelo sinal do sensor real, onde está indicado "Recupera o sinal" nos gráficos.

Para verificar o desempenho do sensor virtual, é feito o cálculo do erro relativo entre o sinal do modelo e o sinal real onde ocorre a perda do sinal até esse ser recuperado, para isso utilizou-se a seguinte equação:

Onde \bar{V}_m é valor médio do sinal do modelo e \bar{V}_r o valor médio do sinal real, ou medido.

Na Figura 4.13 quando o sinal é recuperado depois da primeira perda, esse apresenta um erro relativo de 2,84%, já no segundo ponto de recuperação do sinal, apresenta-se um erro relativo de 6,98%.

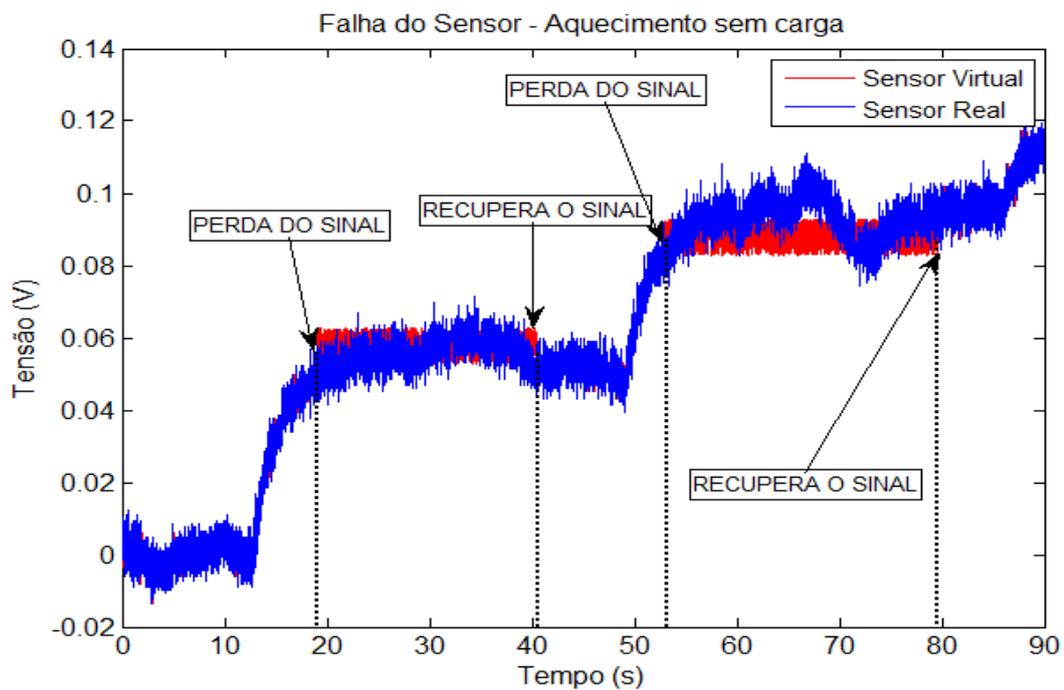


Figura 4.13: Simulação de falha no sensor para o caso de aquecimento sem carga.

Na Figura 4.14, quando o sinal é recuperado depois da primeira perda, esse apresenta um erro relativo de 5,44%, já no segundo ponto de recuperação do sinal, apresenta-se um erro relativo de 9,09%.

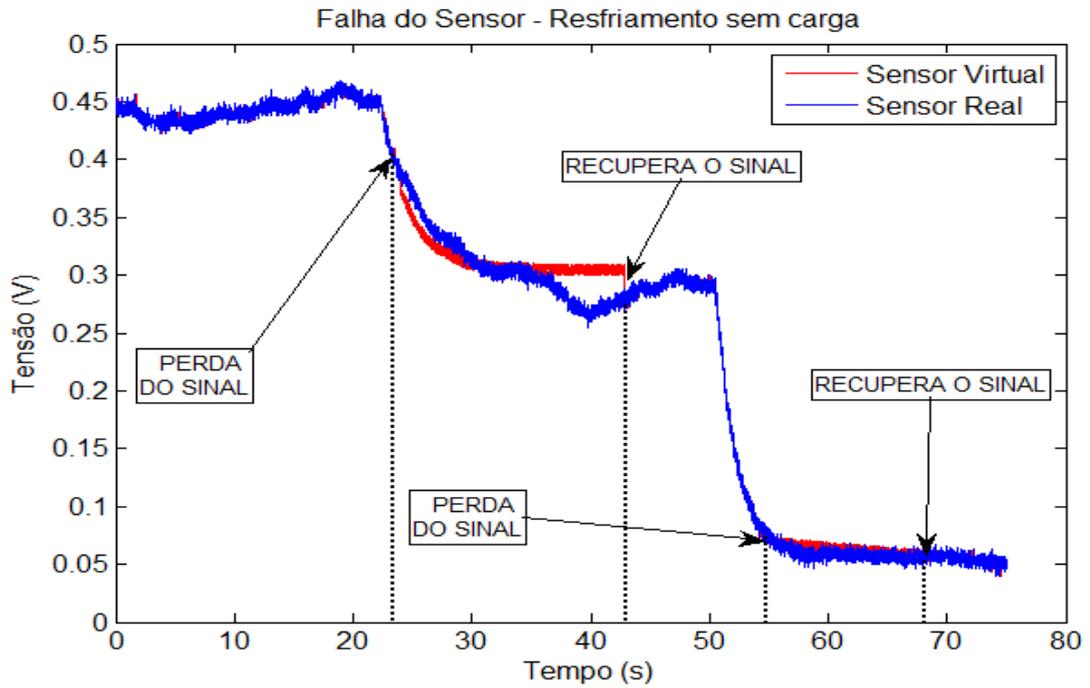


Figura 4.14: Simulação de falha no sensor para o caso de resfriamento sem carga.

Na Figura 4.15, quando o sinal é recuperado depois da primeira perda, esse apresenta um erro relativo de 5,37%, já no segundo ponto de recuperação do sinal, apresenta-se um erro relativo de 1,95%.

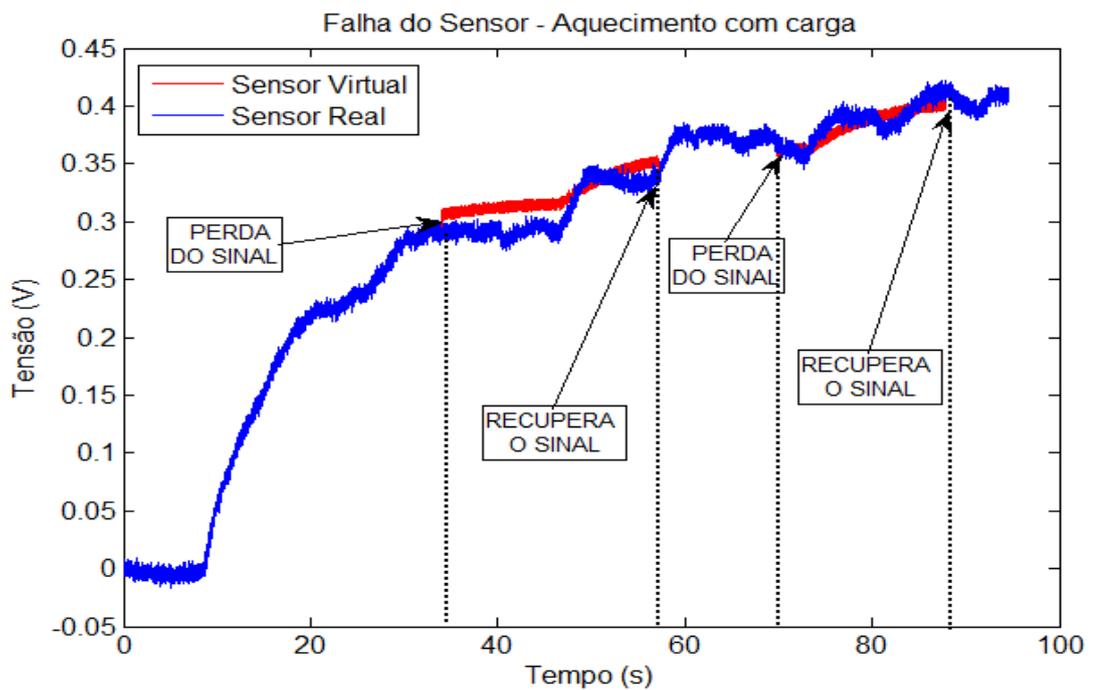


Figura 4.15: Simulação de falha no sensor para o caso de aquecimento com carga.

Na Figura 4.16, quando o sinal é recuperado depois da primeira perda, esse apresenta um erro relativo de 17,60%, já no segundo ponto de recuperação do sinal, apresenta-se um erro relativo de 33,36%, o fato desse erro ser muito maior que os outros testados deve-se ao fato de a perda ter sido realizada em uma região onde o valor medido é muito pequeno, da ordem de 0,01V. Para contornar esse problema seria necessário uma planta muito mais instrumentada e um número maior de modelos para o sistema, tornando as medidas do sensor virtual muito mais precisas.

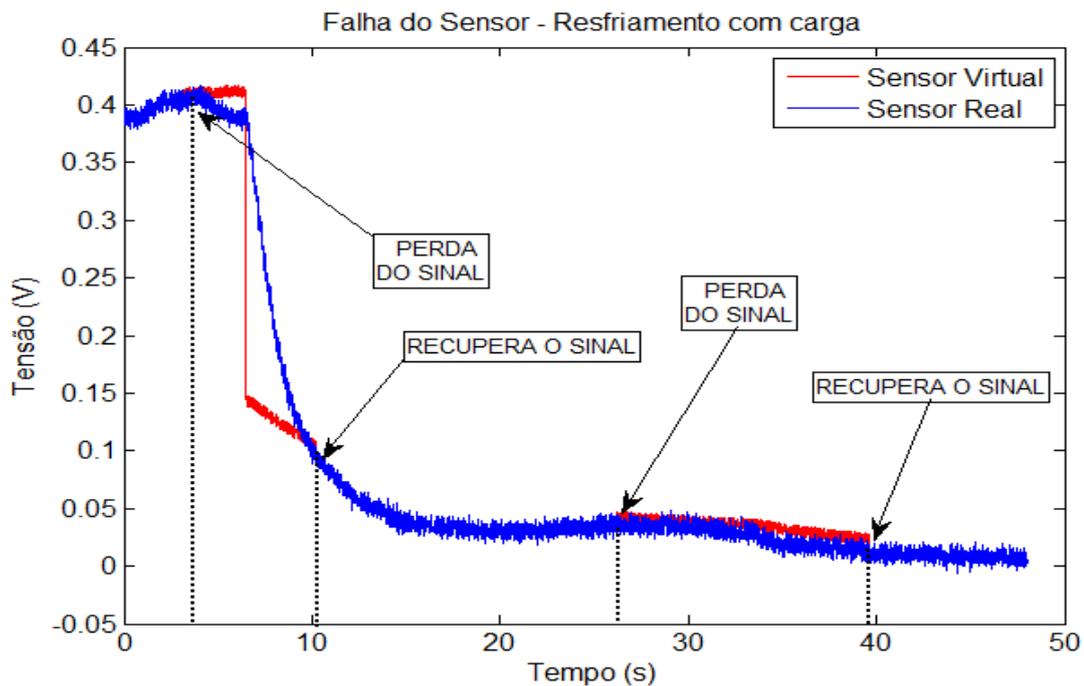


Figura 4.16: Simulação de falha no sensor para o caso de resfriamento com carga.

Analisando os resultados dos gráficos das Figuras 4.13 a 4.16, observa-se que alguns pontos de recuperação o erro relativo é um pouco maior que em outros (com exceção do segundo ponto de recuperação da Figura 4.16 onde o erro relativo foi bem maior). Como apresentado na seção 4.3, dependendo do sinal de entrada, se ocorre aquecimento ou resfriamento e se existe alguma carga, são obtidos modelos diferentes. Quando se altera a entrada, fixando-se os outros dois parâmetros, o modelo é alterado ou não. E pelo fato de os modelos usados terem compatibilidades diferentes com a planta física, alguns pontos de recuperação vão ter maior ou menor coerência entre o sinal do modelo e o sinal do sensor real nesses pontos.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram utilizados os conceitos de sensores virtuais para o monitoramento de uma plataforma de testes de deformação e vibração, na qual utiliza-se um fio de liga com memória de forma (LMF) como atuador. A variável a ser monitorada é a deformação sofrida pela viga.

Com os dados obtidos nos testes iniciais foi observado que a característica de histerese própria do fio de LMF, é passada para comportamento de deformação da viga (Figura 4.3).

Foram então determinados os parâmetros para modelos de primeira ordem com atraso, e a partir desses modelos foi realizada a validação para cada um através da ferramenta de identificação de sistemas (*System Identification Tool* ou *ident*) do Matlab. O qual, utiliza dados de entrada e saída obtidos do sistema, gera e verifica o quão compatível são os modelos em relação ao sistema. Dentre os 12 modelos gerados, 9 tiveram compatibilidade maior que 70% e 3 tiveram compatibilidade entre 60% e 70%.

Comparando-se os modelos obtidos para todos os casos testados (equações de (4.1) a (4.12)), nota-se que seus parâmetros: ganho em regime permanente, constante de tempo e o atraso de transporte apresentam valores diferentes. Portanto, descrever o sistema com apenas uma equação resultaria em um modelo bastante complexo para ser implementado. Por isso foi utilizado um modelo completo, que é formado pela composição desses modelos, que são escolhidos pelo sensor virtual implementado, de acordo com o sinal de entrada, o tipo de teste (aquecer ou resfriar) e da carga aplicada.

Com o monitoramento do processo foi possível garantir que, uma vez perdido o sinal do sensor de deformação (extensômetro ou *strain gauge*) e sabendo-se, a tensão que está sendo aplicada na LMF, se ocorre aquecimento ou resfriamento, e se existe alguma carga (os testes foram feitos para uma carga de 100g), a deformação sofrida pela viga pode ser inferida de forma automática pelos programas implementados. Isso pode ser visto ao fim de cada experimento de monitoramento, onde programa retorna o gráfico com o teste simulado, e observa-se que o sinal do modelo e o sinal do sensor real são bem próximos (Figuras 4.13 a 4.16).

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para continuação deste trabalho são sugeridos as seguintes tarefas:

- Utilização de um número maior de diferentes tipos de sensores para que se possa obter modelos mais confiáveis;
- Maior número de testes e outros modelos para que o sistema tenha possibilidade de lidar com diferentes tipos de perturbações;
- Implementação de um controlador que possa trabalhar em conjunto com o sensor virtual.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Teixeira, R. L. Uma metodologia de projeto de controladores híbridos inteligentes com aplicações no controle ativo de vibrações mecânicas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Maio 2001.
- [2] Aguiar, R. A. A de.; Pacheco, P. M. C. L.; Savi, M. A. Absorvedores de vibrações utilizando ligas com memória de forma – resultados experimentais. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande-PB, 2010.
- [3] Valenzuela, W. A. V.; Cavalcanti, T. C. M.; Lima, A. M. N.; Rocha Neto, J. S. R. Instrumentação eletrônica para atuação e sensoriamento de uma plataforma robótica bípede. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande-PB, 2012.
- [4] Melo, T. R.; Silva, J. J.; Rocha Neto, J. S. Desenvolvimento de um guia de experimento para análise e controle de uma plataforma de testes com uma viga engastada. XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Gramado-RS, 2013.
- [5] Valenzuela, W. A. V. Sistema de Articulação Inteligente por Meio da Liga com Memória de Forma. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2005.
- [6] Silva, J. G. V. da; Araujo, C. J. de; Grassi, E. N. D. Comportamento termomecânico de fio de NiTiNOL microsoldados por descarga capacitiva: Um estudo experimental. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande-PB, 2010.
- [7] Lotufo, F. A.; Garcia, C. Sensores virtuais ou *soft sensors*: Uma introdução. 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, FCT-Unesp, Presidente Prudente-SP, Brasil, 2008.
- [8] Tzovla, V.; Mehta, A. Automated approach to development and *online* operation of intelligent sensors. Proc of ISA. Expo/2001, Houston. USA, 2001.
- [9] Geethalaskshmi, S.; Pappa, N. Artificial neural network based soft sensor for fermentation of recombinant *Pichia Pastoris*. Internacional Conference on Advances in Computer Engineering, 2010.
- [10] Morais, A. A.; Santos, R. R. C.; Sodré, C. H.; Carvalho, F. O.; Vieira, W. G. Uma estratégia de constru o de um "*soft sensor*" para inferenciar a composi o do produto de um processo de destila o utilizando técnica neuro-fuzzy, Mecânica Computacional Vol. XXIX, pp. 9345-9365, Buenos Aires, Argentina, 2010.
- [11] Sampaio, D. de A. Desenvolvimento de sensores virtuais baseados em redes neurais artificiais para a transesterifica o de óleo de soja a altas pressões. Disserta o de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2012.

- [12] Fortuna, L.; Giannone, P.; Grazoani, S.; Xibilia, M. G. Virtual instruments based on stacked neural networks to improve products quality monitoring in a refinery. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 1, pp.95 -101 2007.
- [13] Abusnina, A.; Kudemko, D. Adaptive Soft Sensor based on Moving Gaussian Process Window. Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013. p. 1051-1056.
- [14] Mohler, I.; Bolf, N.; Galinec, G.; Golob, M. Application of Soft Sensor for Monitoring and Control of Refinery Emission. *Avtomatizacija v industriji in gospodarstvu*, 2009.
- [15] Soares, F. M. Aplicações de sensores virtuais na interferência da temperatura de banho no processo de fabricação de alumínio primário. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2009.
- [16] Reda, S.; Cochran, R.; Nowroz, A. N. "Improved thermal tracking for processors using hard and soft sensor allocation techniques", *IEEE Trans. Computers*, vol. 60, no. 6, pp.841 - 851, 2011.
- [17] Fernandes, R. A. S.; Policastro, C. A.; Albuquerque, A. R. L.; Silva, C. B. S.; Silva, I. N. Desenvolvimento de um sensor virtual baseado em redes neurais artificiais para colunas de destilação de etanol. IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Brasília-DF, 2009.
- [18] Atkinson, C. M.; Theresa W. L.; Hanzevack, E. L. Virtual sensing: a neural network-based intelligent performance and emissions prediction system for on-board diagnostics and engine control, *Internacional Congress and Exposition*, Detroit-Mi, 1998.
- [19] Thanayankizil, L. V.; Ghai, S. K.; Chakraborty, D.; Seetharam, D. P. Softgreen-Towards Energy Management of Green Office Buildings with Soft Sensors. 978-1-4673-0298-2/12/\$31.00 c, 2012 IEEE.
- [20] Zanata, D. R. P. Desenvolvimento de Sensor Virtual Empregando Redes Neurais para Medição da Composição em uma Coluna de Destilação. Dissertação de Mestrado em Engenharia (Engenharia de Sistemas), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 229p, 2005.
- [21] Visinsky, M. L. Fault detection and fault tolerance methods for robotics. Thesis Master of Science. Rice University. Houston, Texas, 1991.
- [22] Moallen, M.; Lu, J. Application of Shape Memory Alloy actuators for flexure control: Theory and Experiments. *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on, v. 10, n. 5, p495-501, oct. 2005. ISSN 1083-4435.
- [23] Leong, S. L. Using Shape Memory Alloy as Dampers: Design Methodology. Dissertação – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2005.
- [24] Ljung, L., 1999. *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall, 2nd Edition.
- [25] Silva, A. S. *Fundamentos do controle clássico*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

- [26] EXCEL SENSOR. Fator de Sensibilidade de Extensômetros Coláveis de Resistência Elétrica. [S.l.], 2010.
- [27] NATIONAL INSTRUMENTS. E Series MultiFunction DAQ Datasheet. [S.l.], Dezembro 2010.
- [28] NATIONAL INSTRUMENTS. MultiFunction DAQ Accessories Datasheet. [S.l.], Dezembro 2010.
- [29] Rodrigues, L. M.; Melo, T. R.; Silva, J. J.; Perkusich, A.; Rocha Neto, J. S. Analysis and Modeling of a Platform with Cantilever Beam using SMA as actuator. 7th International Conference on Computer Supported Education - CSEDU, Lisboa, Portugal, 2015.
- [30] Rodrigues, L. M.; Silva, J. J.; Rocha Neto, J. S. Platform tests for Analyzing the behavior of a Shape Memory Alloy (SMA). XI Congresso Internacional de Metrologia Elétrica. Bento Gonçalves, Brasil. 2015.