

**PHILIPPE CÉSAR FERNANDES TEIXEIRA**

**COMPARAÇÃO DE MODELOS PARAMÉTRICOS E  
NÃO PARAMÉTRICOS DE ATUADORES COM  
FLUIDO MAGNETO REOLÓGICO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2017**

**PHILIPPE CÉSAR FERNANDES TEIXEIRA**

**COMPARAÇÃO DE MODELOS PARAMÉTRICOS E NÃO  
PARAMÉTRICOS DE ATUADORES COM FLUIDO MAGNETO  
REOLÓGICO**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Doutor Valder Steffen Jr.

Coorientador: Prof. Doutor Aldemir Aparecido Cavalini Jr.

**Uberlândia - MG**

**2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

T266c      Teixeira, Philippe César Fernandes, 1989-  
2017      Comparação de modelos paramétricos e não paramétricos de atuadores com fluido magneto reológico / Philippe César Fernandes Teixeira. - 2017.  
80 f. : il.

Orientador: Valder Steffen Júnior.

Coorientador: Aldemir Aparecido Cavalini Jr.

Dissertação (mestrado) -- Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.31>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Modelos matemáticos - Teses. 3. Lógica Fuzzy - Teses. 4. Materiais inteligentes - Teses. I. Steffen Júnior, Valder. II. Cavalini Júnior, Aldemir Aparecido, 1983-. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

---

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA



**ALUNO:** Philippe César Fernandes Teixeira

**NÚMERO DE MATRÍCULA:** 11512EMC009

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Mecânica dos Sólidos e Vibrações

**LINHA DE PESQUISA:** Dinâmica de Sistemas Mecânicos

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA:** NÍVEL MESTRADO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**

*“Comparação de Modelos Paramétricos e Não Paramétricos de Atuadores com Fluido Magneto Reológico”*

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Valder Steffen Júnior

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala de Reuniões 1M313 do Bloco 1M, Campus Santa Mônica, em 26 de junho de 2017, às 08:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

<b>NOME</b>	<b>ASSINATURA</b>
Prof. Dr. Valder Steffen Júnior	UFU
Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr	UFU
Prof. Dr. Daniel Dall'Onder dos Santos	UFU
Prof. Dr. José dos Reis Vieira de Moura Júnior	UFG

Uberlândia, 26 de junho de 2017

*Eu dedico esta dissertação de mestrado à minha mãe, Vilma Teixeira Alves, à minha irmã, Anashelle Fernandes Teixeira, à minha namorada, Fabiana Sousa Ribeiro, aos meus amigos, Paulo Renato, Waldete e Eude e a toda minha família.*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade a mim concedida neste Programa de Pós-Graduação e a todos os professores e técnicos envolvidos na minha formação.

À CAPES pelo apoio financeiro e por tornar possível os meus estudos na UFU.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Valder Steffen Jr, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr, pelos ensinamentos, pelas relevantes contribuições ao trabalho e pela confiança, acima de tudo.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis e dos demais laboratórios da instituição.

À Luciene Valente Gomes Perini, do INCT-EIE, pelo apoio e confiança.

À Juliana Freitas por me incentivar a participar do Programa.

Aos professores Edson Hideki Koroishi e Fabian Andres Lara Molina, ambos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, campus de Cornélio Procópio-PR, que dedicaram uma parte do seu tempo para contribuir com essa dissertação durante estágio que realizei naquela instituição.

Aos professores Rosana Sueli Da Motta Jafelice, Faculdade de Matemática da UFU, e Fran Sérgio Lobato, Faculdade de Engenharia Química da UFU, que contribuíram com essa dissertação no tocante à lógica nebulosa e Otimização pelo Algoritmo de Evolução Diferencial, respectivamente.

À professora Núbia dos Santos Saad, aos técnicos administrativos Reinaldo Tomé Paulino, Lazineo e Diego e à aluna de iniciação científica da Engenharia Mecânica, Thaís Montovani, pelo apoio e contribuição na parte experimental desta dissertação.

Aos amigos Ademyr Gonçalves de Oliveira e Regina Kelly de Faria, pelo apoio incondicional demonstrado desde o princípio, quando decidi participar do Programa.

A toda família da minha namorada, em especial, ao senhor Osvaldo Alves de Sousa, avô, que me ajudou em um momento muito delicado dos meus experimentos e à Altemira Maria pela confiança e apoio.

Ao amigo João Martins Neto, da Pro Reitoria de Pós-Graduação da UFU, que desde o primeiro dia em que entrei na universidade foi um ponto de apoio e segurança, de sábias palavras.

À Helena e à Lídia, do pensionato em que vivi durante o período do mestrado, que me ajudaram e deram apoio fora da universidade.

E a Deus, principalmente, que tornou possível a realização deste trabalho e todas as contribuições acima citadas. Obrigado!

TEIXEIRA, P. C. F. **Comparação de Modelos Paramétricos e Não Paramétricos de Atuadores com Fluido Magneto Reológico**. 2017. 80 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

## Resumo

Desde seu surgimento no início da década de setenta, os sistemas semiativos vêm ganhando cada vez mais espaço nos projetos de engenharia. No caso específico dos sistemas semiativos que utilizam fluido magneto reológico, os primeiros produtos com esse material inteligente só foram comercializados com sucesso pela primeira vez em 1998 pela LORD<sup>®</sup> Corporation, que é fornecedora do atuador utilizado neste trabalho. A partir daí as aplicações não pararam de crescer. Desde sistemas de suspensão inteligentes de pontes e edifícios, visando a segurança de pessoas e a saúde estrutural das construções, até assentos de veículos, visando o conforto e segurança do passageiro. O objetivo desse trabalho foi o de apresentar uma metodologia de validação de modelos matemáticos de amortecedores com fluido magneto reológico, tanto paramétricos quanto não paramétricos. Para validação, utilizou-se da técnica de problemas inversos para otimizar o modelo estudado em relação aos dados experimentais, através da minimização do erro relativo, usando a norma da diferença entre as forças obtidas do ensaio experimental realizado e do modelo numérico implementado em ambiente MATLAB<sup>®</sup>, dividida pela norma da força experimental. As vantagens dos modelos matemáticos paramétricos é que permitem rápida convergência dos resultados; já a desvantagem é que, por seguir uma lei de formação bem definida matematicamente, as formas das curvas são “rígidas”, ou seja, sem liberdade para mudar sua configuração. Normalmente, essas curvas seguem uma tendência bem característica. O modelo não paramétrico aplicado neste trabalho é baseado na lógica *fuzzy* (lógica nebulosa), conferindo maior “liberdade” para modelar adequadamente todos os pontos da curva experimental. Contudo, a dificuldade em encontrar os parâmetros *fuzzy* são grandes, a ponto de prejudicar o resultado da validação. Por fim, conclui-se que o modelo histerético, paramétrico, apresentou os melhores resultados, menor custo computacional e maior facilidade de implementação.

---

*Palavras chave: Atuador MR, Modelos Matemáticos, Lógica Fuzzy, Evolução Diferencial, Materiais Inteligentes.*

TEIXEIRA, P. C. F. **Comparison of Parametric and Non Parametric Models of Rheological Magnetic Fluid Actuators**. 2017. 80 f. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

## Abstract

Since the appearance of semiactive systems in the early seventies, they have been gaining more applications in several engineering projects. In the specific case of semiactive systems using magneto rheological fluid, the first commercial products with this intelligent material were only successfully marketed for the first time in 1998 by LORD® Corporation, the same manufacturer of the actuator used in the present research work. Since then, the applications did not stop growing. From intelligent suspension systems to bridges and buildings, aiming at the safety of people and the structural health of buildings, to vehicle seats, aiming at passenger comfort and safety, magneto rheological fluid actuators occupy a large spectrum of applications. The objective of this work is to present a methodology for the validation of mathematical models, both parametric and non-parametric. For validation purposes, inverse problem techniques were used to optimize the model studied with respect to the experimental data, using the minimization of a relative error, based on the norm of the difference between the forces obtained from the test performed and the numerical model implemented in MATLAB® environment, divided by the norm of the experimental force. The advantages of parametric mathematical models are that they led to a rapid convergence to the results, and the disadvantage is that, since they have a well-defined law of formation, the shapes of the characteristic curves of the actuators are "rigid", i.e., they do not have enough freedom to change their shape drastically. Usually these curves follow a well-defined trend. The non-parametric model studied in this work is based on fuzzy logic, which has a greater "freedom" to model all the points of the experimental curve, conveniently. However, the difficulty in finding the fuzzy parameters is very important, to the point of compromising the validation result. Finally, it was concluded that the parametric hysteretic model presented the best results for design purposes, lower computational cost, and easier implementation as compared with competing models.

---

*Keyword: MR actuator, Mathematical Model, Fuzzy Logic, Differential Evolution, Smart Materials.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicação de atuadores com fluido magneto reológico (MR) na suspensão de veículos. ....	2
Figura 1.2 – Aplicações de atuadores com fluido magneto reológico: (a) Edifício Sanwa-Tekki; (b) Ponte Dongting Lake, China.....	3
Figura 1.3 - Assento de motorista com atuador com fluido magneto reológico.....	4
Figura 1.4 – Prótese de perna mecânica Magnetix™ da MOTHEC baseada em atuadores com fluido magneto reológico (CRIVELLARO, 2008).....	4
Figura 1.5 - Próteses semiativas com atuadores com fluido magneto reológico em amputados transfemural (CRIVELLARO, 2008).....	5
Figura 2.1 - Partículas magnéticas: (a) sem a ação do campo magnético; (b) com a ação do campo magnético (TRUONG; AHN, 2012).....	8
Figura 2.2 – Comportamento da tensão x taxa de cisalhamento para o fluido Newtoniano e o fluido de Bingham. ....	10
Figura 2.3 - Desenho esquemático de um atuador com fluido MR. ....	10
Figura 2.4 - Vista em corte longitudinal de um atuador: (a) sem campo magnético aplicado; (b) com campo magnético aplicado. ....	11
Figura 2.5 - Vista em perspectiva do atuador com fluido MR. ....	12
Figura 2.6 – Esquema do algoritmo de evolução diferencial (TSURUTA, 2015) .....	15
Figura 3.1 - Máquina de ensaios MTS <i>Landmark</i> ®.....	17
Figura 3.2 - Deslocamento aplicado no atuador com fluido magneto reológico.....	17
Figura 3.3 - Atuador com fluido magneto reológico RD-8040-1 <sup>1</sup> da LORD Corporation®.....	18
Figura 3.4 - Detalhes do suporte utilizado para realizar o ensaio do atuador com fluido magneto reológico. ....	18
Figura 3.5 - Atuador fixado na máquina de ensaios MTS <i>Landmark</i> ®. ....	19
Figura 3.6 - Controlador de corrente LORD Wonder Box® (LORD, 2006). ....	21
Figura 3.7 – (a) Instrumentação usada na caracterização do controlador e (b) Diagrama de montagem do experimento. ....	22

Figura 3.8 - Resultado da caracterização do controlador de corrente. ....	23
Figura 3.9 - Montagem final do ensaio.....	24
Figura 3.10 - Resposta da força x tempo (experimental).....	25
Figura 3.11 – Resposta da força x deslocamento (experimental).....	26
Figura 3.12 - Resposta da força x velocidade (experimental).....	27
Figura 3.13 - (a) temperatura: 28,8°C [ $i = 0,2$ A] e (b) temperatura: 44,3°C [ $i = 1,0$ A].....	28
Figura 4.1 - Modelo físico de Bingham para o fluido MR (TRUONG; AHN, 2012). ....	31
Figura 4.2 – Convergência do ajuste do modelo de Bingham. ....	32
Figura 4.3 - Comportamento da força x velocidade (modelo de Bingham x experimento); ...	34
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	34
Figura 4.4 - Comportamento da força x tempo (modelo de Bingham x experimento); .....	35
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	35
Figura 4.5 - Comportamento da força x deslocamento (Modelo Bingham x experimento); ...	36
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	36
Figura 4.6 - Modelo de Bingham estendido (Adapatado de DYKE, 1996). ....	37
Figura 4.7 - Modelo físico de Bouc-Wen (Adapatado de DYKE, 1996).....	38
Figura 4.8 - Modelo físico de Bouc-Wen modificado (Adapatado de DYKE, 1996). ....	40
Figura 4.9 - Comportamento da força x velocidade (Bouc-Wen modificado x experimento);	41
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	41
Figura 4.10 – Convergência da otimização do modelo de Bouc-Wen modificado. ....	42
Figura 4.11 - Comportamento da força x tempo (Bouc-Wen modificado x experimento); ....	43
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	43
Figura 4.12 - Comportamento da força x deslocamento (Bouc-Wen modificado x	
experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	43
Figura 4.13 - Modelo físico histerético (TRUONG; AHN, 2012).....	46
Figura 4.14 - Esquema do modelo histerético no Simulink®. ....	46
Figura 4.15 – Convergência observada na otimização do modelo histerético. ....	47
Figura 4.16 - Variação dos parâmetros do Modelo histerético. ....	48
Figura 4.17 - Comportamento da força x tempo (modelo histerético x experimento);.....	49
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	49
Figura 4.18 - Comportamento da força x deslocamento (modelo histerético x experimento);	
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	49
Figura 4.19 - Comportamento da força x velocidade (modelo histerético x experimento); ....	50
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	50
Figura 4.20 - Apresentação comparativa dos erros entre modelos paramétricos. ....	52

Figura 5.1 - Fluxograma simplificado do sistema <i>fuzzy</i> baseado em regras (OLIVEIRA JR <i>et al.</i> , 2007).....	56
Figura 5.2 - Diagrama de blocos do modelo <i>Fuzzy</i> (Adaptado de LIEM; TRUONG; AHN, 2015). .....	58
Figura 5.3 - Funções de pertinência do bloco <i>Gain</i> (TRUONG; AHN, 2012).....	59
Figura 5.4 - Funções de pertinência do bloco “Lyapunov” (TRUONG; AHN, 2012).....	60
Figura 5.5 – Comportamento da força x tempo ( <i>Fuzzy</i> x experimento); .....	64
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	64
Figura 5.6 – Comportamento da força x deslocamento ( <i>Fuzzy</i> x experimento); .....	64
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	64
Figura 5.7 - Comportamento da força x deslocamento ( <i>Fuzzy</i> x experimento); .....	65
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz, $i = 1,0$ A).....	65
Figura 6.1 - Comparação dos erros percentuais para cada modelo otimizado.....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

### SÍMBOLOS LATINOS

$V$	Tensão elétrica
$i$	Corrente elétrica
$t$	Tempo
$f_c$	Atrito seco
$f_0$	Força no acumulador
$F$	Força exercida pelo atuador
$c_0, c_1, c$	Constantes de amortecimento viscoso
$x, x_3$	Deslocamento da haste do atuador
$x_1, x_2$	Deslocamentos
$\dot{x}, \dot{x}_3, x_{pt}$	Velocidade do pistão
$sign(\bullet)$	Função sinal
$E$	Função erro relativa baseada na norma euclidiana
$\ \bullet\ $	Norma euclidiana de um vetor
$F_{modelo}$	Força do atuador obtida do modelo matemático
$F_{Experimento}$	Força do atuador obtida experimentalmente
Amp	Amplitude máxima do deslocamento senoidal aplicado no atuador
freq	Frequência aplicada no deslocamento senoidal
$k_0, k_1, k_2$	Constantes de rigidez
$\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{y}$	Velocidades
$ \bullet $	Módulo de um número real
$z$	Variável histerética ou evolutiva
$\dot{z}$	Derivada temporal da variável histerética

$n$	Parâmetro do modelo de Bouc-Wen e Bouc-Wen modificado
$y$	Deslocamento
$u$	Variável resultante de um filtro de primeira ordem
$\dot{u}$	Filtro de primeira ordem
$c_{0a}, c_{0b}$	Coefficientes de $c_0$ no modelo Fenomenológico
$c_{1a}, c_{1b}$	Coefficientes de $c_1$ no modelo Fenomenológico
$in_2$	Deslocamento no modelo <i>Fuzzy</i>
$in_3$	Velocidade no modelo <i>Fuzzy</i>
$f_{MR\_est}$	Força estimada do atuador no modelo <i>Fuzzy</i>
$k_{GFI}$	Saída do bloco <i>Gain Fuzzy Inference</i>
$u_{LFI}$	Saída do bloco <i>Lyapunov-Fuzzy Inference</i>
$in_1$	Corrente elétrica no modelo <i>Fuzzy</i>
$Z$	“Zero”: função de pertinência triangular
VS	“Muito pequeno”: função de pertinência triangular ou constante
S	“Pequeno”: função de pertinência triangular ou constante
M	“Médio”: função de pertinência triangular ou constante
B	“Grande”: função de pertinência triangular ou constante
VB	“Muito grande”: função de pertinência constante ( <i>singleton</i> )
NB	“Negativo grande”: função de pertinência triangular ou constante
NS	“Negativo pequeno”: função de pertinência triangular ou constante
ZE	“Zero”: função de pertinência triangular ou constante
PS	“Positivo pequeno”: função de pertinência triangular ou constante
PB	“Positivo grande”: função de pertinência triangular ou constante
$V(x)$	Função candidata do critério de estabilidade de Lyapunov
$\ddot{x}$	Aceleração
$A_i$	Deslocamento associado a uma função de pertinência triangular
$B_i$	Velocidade associada a uma função de pertinência triangular
$C_i$	Valor de $u_{LFI}$ associado a uma função de pertinência constante

## SÍMBOLOS GREGOS

$\tau$	Tensão de cisalhamento do fluido
--------	----------------------------------

$\tau_0$	Tensão limite de escoamento do fluido
$\mu_0$	Viscosidade plástica do fluido
$\dot{\theta}$	Taxa de cisalhamento do fluido
$\alpha$	Fator de escala
$\Delta$	Operador de variação
$\gamma, \beta, \delta, \lambda$	Parâmetros de modelos
$\alpha_a, \alpha_b$	Coefficientes de $\alpha$ no modelo Fenomenológico
$v$	Tensão elétrica de entrada
$\eta$	Fator de escala do filtro de primeira ordem

### LISTA DE ABREVIações

MR	Magneto reológico
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas “Prof. José Eduardo Tannús Reis”
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
ANFIS	<i>Adaptative Neuro-Fuzzy Inference System</i>
MRFMAD	<i>Magnetorheological Fluid Modeling, Analysis and Design</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
MLP	<i>Multi Layer Perceptron</i>
DC	<i>Direct Current</i> (corrente contínua)

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. JUSTIFICATIVA .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. <i>Objetivos gerais</i> .....	5
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	6
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	6
<b>CAPÍTULO II</b> .....	8
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
2.1. FLUIDO MAGNETO REOLÓGICO.....	8
2.2. OTIMIZAÇÃO .....	12
<b>CAPÍTULO III</b> .....	16
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	16
3.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO.....	16
3.1.1. <i>O atuador Magneto Reológico Linear</i> .....	18
3.1.2. <i>O controlador de corrente</i> .....	20
3.2. RESULTADOS DO ENSAIO.....	24
3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	27
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	30
<b>4. MODELOS PARAMÉTRICOS DE UM ATUADOR COM FLUIDO MAGNETO REOLÓGICO</b> .....	30
4.1. MODELO DE BINGHAM.....	30
4.2. MODELO DE BINGHAM ESTENDIDO.....	36
4.3. MODELO DE BOUC-WEN .....	38
4.4. MODELO DE BOUC-WEN MODIFICADO .....	39

4.5. MODELO FENOMENOLÓGICO .....	44
4.6. MODELO HISTERÉTICO.....	45
4.7. ANÁLISE DOS MODELOS.....	51
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>54</b>
<b>5. MODELO NÃO PARAMÉTRICO DE UM ATUADOR COM FLUIDO MAGNETO REOLÓGICO.....</b>	<b>54</b>
5.1. MODELO <i>FUZZY</i> .....	55
5.1.1. O bloco “Gain Fuzzy Inference”.....	59
5.1.2. O bloco “Lyapunov Fuzzy Inference”.....	60
5.2. COMPARAÇÃO MODELO <i>FUZZY</i> X EXPERIMENTOS .....	63
5.3. DISCUSSÃO .....	65
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>67</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>67</b>
6.1. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	69
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	70
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>77</b>
A.1- Dados Técnicos do Atuador MR RD-8040-1 e 8041-1 da LORD Corporation®.....	77
A.2- Instruções para usar o dispositivo controlador de corrente LORD Wonder Box® LORD Corporation®. .....	79

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a justificativa, os objetivos gerais e específicos, além de mostrar como a dissertação está organizada e as principais contribuições deixadas por esse trabalho.

### 1.1. Justificativa

A área de vibrações mecânicas tem sido cada vez mais investigada com o passar dos anos. Ultimamente, assuntos relacionados ao controle de vibrações, modelamento matemático de sistemas e identificação de parâmetros sensíveis ao projeto têm sido motivo de preocupação e de investimento, tanto financeiro como humano, visando o melhor entendimento sobre o funcionamento dos sistemas de engenharia. Isso se torna mais complicado quando existem comportamentos não lineares envolvidos, tornando seu modelamento mais complexo e a previsão do seu comportamento dinâmico mais difícil de ser caracterizado.

Sobre sistemas absorvedores de energia, Bai; Wereley; Cho (2016) explicam que os absorvedores de energia passivos só podem ser adaptados para um nível ou tipo de excitação específica e uma determinada carga útil. Complementam ainda que o atuador com fluido magneto reológico parece ser apropriado para melhorar o desempenho e atenuar as vibrações de um sistema dinâmico, sendo possível adaptar a força de atuação para diferentes configurações de excitação e de carregamento.

Em relação à suspensão semiativa, quando do surgimento de seu conceito, no início da década de 70, os pesquisadores viram nessa nova arquitetura de suspensão uma oportunidade para diversas aplicações de engenharia (CROSBY; KARNOPP, 1973). Klinger *et al.* (1976), em seu trabalho, usam o conceito de suspensão semiativa para veículos ferroviários. Margolis e Hrovat (1976) aplicaram em amortecedores com estas características em tratores e veículos fora de estrada e Miller e Nobes (1998) dedicaram-se ao uso desta tecnologia em veículos militares (PASCHOAL, 2011).

A motivação para se usar os atuadores com fluido magneto reológico passa pelo fato deste requerer pouca energia para seu funcionamento. Além disso, possui a vantagem de alterar o estado de magnetização das partículas magnéticas instantaneamente, são controláveis e completamente reversíveis. Essas características são importantes do ponto de vista de aplicações de controle (CAVALINI JR. *et al.*, 2015).

A seguir, a Fig. 1.1 ilustra a utilização de atuadores com fluido magneto reológico em veículos automotivos. Note que há uma bateria que fornece a corrente para o sistema de atuadores e um controlador à frente que libera o sinal de controle apropriado para cada situação a que o carro estiver submetido em seu deslocamento.

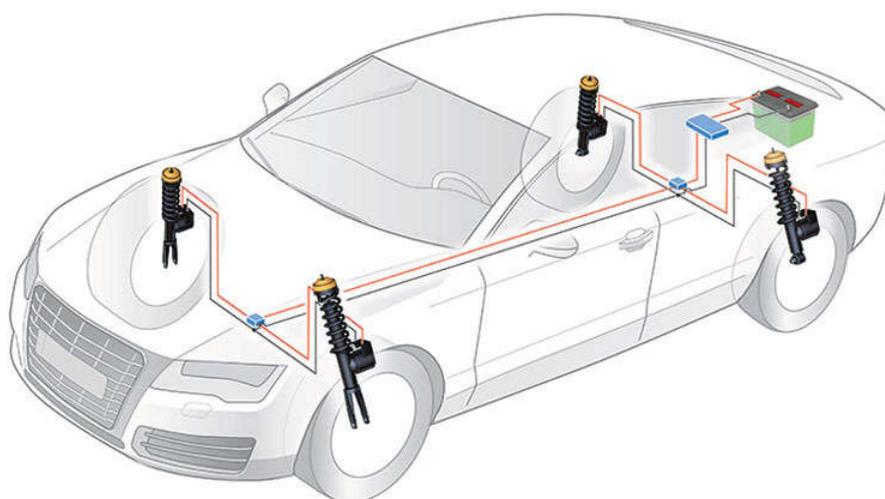


Figura 1.1 - Aplicação de atuadores com fluido magneto reológico (MR) na suspensão de veículos.

(<http://www.designboom.com/technology/worlds-first-fully-regenerative-active-suspension-system/> (acessado em 22/03/2017)).

A Figura 1.2 ilustra outra aplicação de atuadores com fluido magneto reológico muito importante para países que sofrem com abalos sísmicos frequentes. Nestes países, a construção de pontes, edifícios e estruturas, de um modo geral, necessitam de projetos e estruturas que tenham liberdade para se movimentarem de forma controlada e absorvedores dinâmicos de vibração capazes de dissipar energia mecânica. Sem estes dispositivos, toda a estrutura pode se comprometer durante um abalo sísmico, levando a catástrofes. Nesse sentido, a Fig. 1.2 (a) ilustra a aplicação de atuadores com fluido magneto reológico em um edifício e, na Fig. 1.2 (b), em uma ponte na China.



Figura 1.2 – Aplicações de atuadores com fluido magneto reológico: (a) Edifício Sanwa-Tekki; (b) Ponte Dongting Lake, China.

([https://www.researchgate.net/figure/227907177\\_fig1\\_Figure-2-Applications-of-MR-Dampers-at-Sanwa-Tekki-Building-left-and-at-the-Dongting](https://www.researchgate.net/figure/227907177_fig1_Figure-2-Applications-of-MR-Dampers-at-Sanwa-Tekki-Building-left-and-at-the-Dongting) (acessado em 23/03/17)).

Outra aplicação que encoraja mais estudos nessa área de suspensão inteligente com o uso de atuadores com fluido magneto reológico é a aplicação objetivando o conforto de passageiros. No caso da Fig. 1.3, o assento tem a sua base com esse tipo de suspensão. Isto permite que em manobras inesperadas ou imperfeições na pista possam, ainda assim, manter o conforto adequado.



Figura 1.3 - Assento de motorista com atuador com fluido magneto reológico.  
(<http://www.suspa.com/us/products/dampers/range/driver-seat-damper/> (acessado em 23/03/17)).

Ainda sobre conforto, o uso destes atuadores na reabilitação de pacientes que sofreram trauma nos membros inferiores é uma aplicação de grande alcance social. Nos últimos anos, muitos estudos nas áreas de biomecânica têm contribuído para a criação de próteses cada vez mais confortáveis, seguras e que deem maior estabilidade aos movimentos executados pelo usuário. As Figuras 1.4 e 1.5 mostram esquematicamente uma prótese de perna mecânica usada por um paciente. O uso do atuador com fluido magneto reológico contribui para reduzir o impacto do contato com o solo sentido pelo usuário.

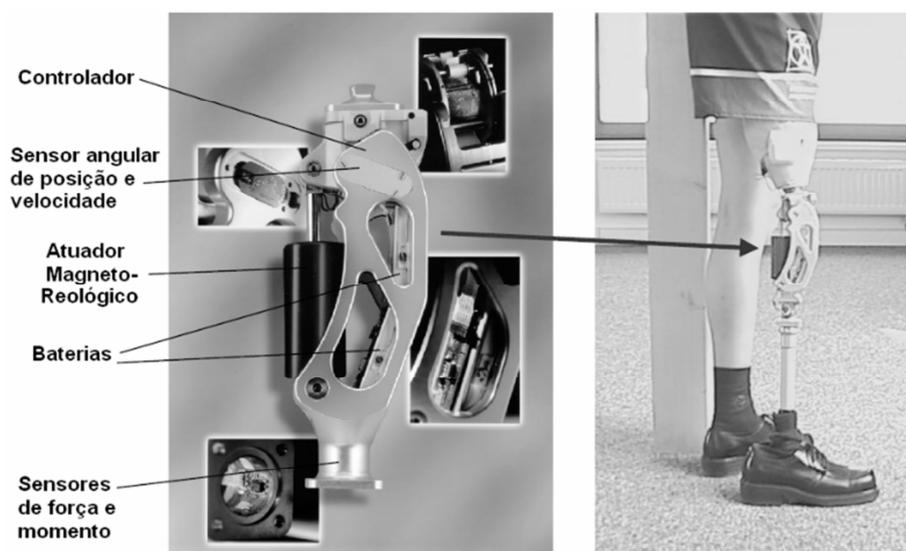


Figura 1.4 – Prótese de perna mecânica Magnetix™ da MOTHEC baseada em atuadores com fluido magneto reológico (CRIVELLARO, 2008).

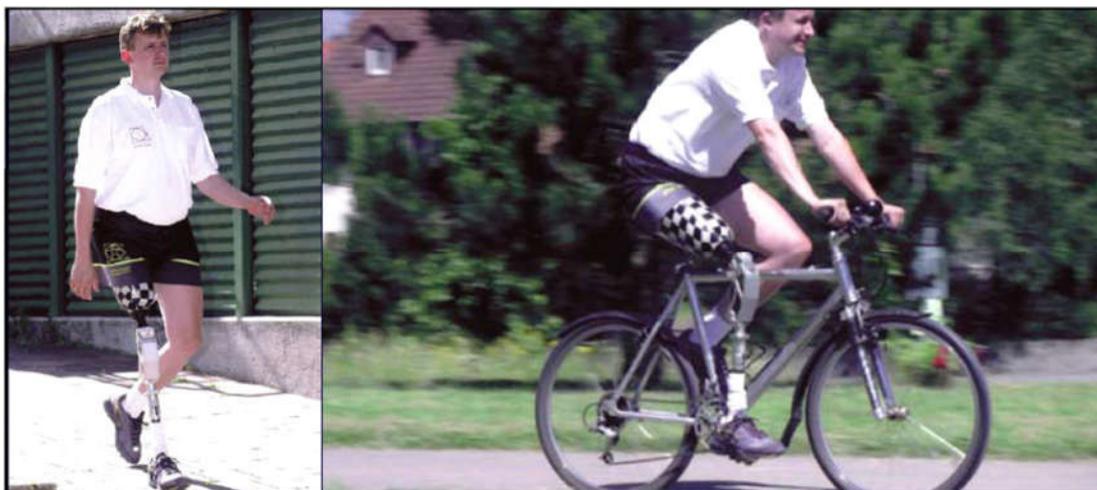


Figura 1.5 - Próteses semiativas com atuadores com fluido magneto reológico em amputados transfemural (CRIVELLARO, 2008).

Desta forma, nota-se que o uso de atuadores com fluido magneto reológico vem para contribuir com o conforto das pessoas, com a saúde estrutural de prédios, pontes e veículos de uma forma geral. Além disso, seu uso, em detrimento do uso de sistemas ativos, é mais barato, levando a resultados semelhantes. Salienta-se, ainda, que os sistemas semiativos permitem atuar em uma faixa de aplicações mais ampla do que os sistemas passivos, conferindo a eles maior flexibilidade e aplicabilidade.

Pensando nesses benefícios, esta dissertação dedica-se ao estudo dos modelos matemáticos existentes dos amortecedores com fluido magneto reológico, como forma de contribuir com metodologias de projeto de sistemas de engenharia que contém este tipo de dispositivo. Neste sentido, esta dissertação deve permitir uma melhor compreensão dos modelos utilizados, à vista de seu comportamento experimental.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. *Objetivos gerais*

Dentre os objetivos gerais, pode-se citar:

- Estudar os atuadores magneto reológicos como uma solução para o controle semiativo de sistemas dinâmicos.
- Caracterizar o comportamento desses atuadores e obter um modelo otimizado representativo de um tipo de atuador com fluido magneto reológico disponível no LMEst

(Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof<sup>o</sup> José Eduardo Tannús Reis) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC/UFU, visando aplicações futuras.

### 1.2.2. *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Caracterizar o comportamento real do atuador magneto reológico, tanto com modelos matemáticos paramétricos como não paramétricos.
- Obter os parâmetros otimizados dos modelos de Bingham, de Bouc-Wen modificado, do modelo histerético e do modelo *Fuzzy*.
- Comparar todos esses modelos e escolher o modelo mais adequado para representar o comportamento do atuador, atentando para os custos computacionais e para os resultados experimentais para fins de validação.

## 1.3. **Organização do texto**

O texto foi planejado do seguinte modo:

- O capítulo 1 trata da introdução do trabalho. Neste capítulo são apresentadas as motivações para a pesquisa, bem como os objetivos gerais e específicos, além da organização geral do texto e as principais contribuições deste trabalho.
- O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica utilizada, com foco especial nas contribuições mais recentes ao tema. A leitura deste capítulo levará o leitor a fundamentar-se e inteirar-se do conteúdo bibliográfico estudado pelo autor e que o auxiliará na compreensão dos assuntos abordados nos capítulos seguintes.
- O capítulo 3 trata dos resultados obtidos nos ensaios experimentais em laboratório. Sua leitura deve permitir ao leitor uma melhor compreensão da metodologia utilizada na realização dos ensaios, bem como sobre os materiais e métodos utilizados para que os ensaios fossem realizados com êxito. Ao final, espera-se que o leitor perceba a influência da corrente elétrica sobre a força exercida pelo atuador e observe também o comportamento não linear do sistema, conforme caracterizado pela histerese. As informações e, principalmente, os resultados deste capítulo serão de fundamental importância para os capítulos 4 e 5, onde alguns modelos serão ajustados por meio de técnicas de otimização.

- O capítulo 4 apresenta alguns dos principais modelos matemáticos paramétricos existentes. O objetivo deste capítulo é o de apresentar ao leitor alguns modelos que são usados comumente. Alguns destes modelos encontrados na literatura foram otimizados tomando como referência os ensaios experimentais. Pode-se acompanhar, ainda que não de forma exaustiva, a evolução dos modelos, desde o mais simples até um dos mais recentemente estudados.
- O capítulo 5 trata de um modelo matemático não paramétrico, baseado na lógica *fuzzy*. O principal objetivo, neste caso, foi o de apresentar uma abordagem diferente da paramétrica. Procura-se explicar as vantagens e desvantagens de cada abordagem, facilitando a melhor escolha, dentro de uma dada aplicação.
- O capítulo 6 é a conclusão. Nela serão apresentadas vantagens de maior destaque quanto à decisão de se usar o atuador com fluido magneto reológico. Além disso, é feita uma breve comparação de todos os modelos otimizados, tanto os paramétricos quanto o não paramétrico, ressaltando os melhores resultados em relação à precisão e ao custo computacional associado ao modelo. Ao final, ainda são apresentadas, também, as principais contribuições desta dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros. A essa altura, espera-se também que o leitor tenha se interessado mais pelo assunto e tenha compreendido o material colocado à disposição nesta dissertação.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Fluido Magneto Reológico

A *U.S. National Bureau of Standards* reconheceu a descoberta do fluido magneto reológico (MR) ao engenheiro e inventor Jacob Rabinow, em 1940. O fluido neste caso é uma suspensão de partículas ferromagnéticas imersas em um fluido que pode ser óleo sintético ou mineral, água ou glicol. O diâmetro da partícula magnética varia entre 0,5 e 10  $\mu m$  e, em fluidos MR convencionais, a porcentagem em massa dessas partículas na suspensão pode variar de 20% a 80%. Na presença de campo magnético, essas partículas se orientam de acordo com as linhas de campo formadas (ZEINALI *et al.* 2016). Essa orientação das partículas é responsável por dificultar o escoamento do fluido pelos orifícios do êmbolo do atuador, favorecendo o aumento da força. A Figura 2.1 (a) ilustra como as partículas ficam dispersas no fluido sem a atuação das linhas de campo magnético; já a Fig. 2.1 (b) apresenta a forma como as partículas se orientam após a aplicação de campo magnético.



Figura 2.1 - Partículas magnéticas: (a) sem a ação do campo magnético; (b) com a ação do campo magnético (TRUONG; AHN, 2012).

Zhang *et al.* (2016) explicam que, sem o acréscimo do campo magnético, o fluido magneto reológico (MR) comporta-se como um fluido Newtoniano, com baixa viscosidade e boa fluidez. Em atuadores com fluido magneto reológico, a ausência de campo magnético faz com que o atuador se comporte como um dispositivo passivo, como absorvedores e isoladores. Porém, ao aplicar um campo magnético, suas propriedades reológicas são modificadas consideravelmente, aumentando sua viscosidade e passando a ter um comportamento viscoplástico, como mostra a Fig. 2.1. As vantagens decorrentes desse arranjo são as seguintes: as mudanças ocorrem instantaneamente, são controláveis e completamente reversíveis. Essas características são importantes do ponto de vista de aplicações de controle (CAVALINI JR. *et al.*, 2015). Além disso, estes argumentam também que as propriedades de amortecimento e rigidez são alteradas quando o fluido está sujeito a um campo magnético.

Em relação às técnicas passivas, largamente utilizadas na área de controle, elas possuem largura de banda de frequência limitada, não sendo, portanto, recomendadas quando é necessária alguma mudança nas características do sistema (CAVALINI JR. *et al.* 2015). Já a técnica de controle ativo possui normalmente custos associados mais elevados. Quanto às técnicas semiativas, estas atenuam a vibração de uma maneira indireta, ou seja, aplica-se uma corrente elétrica que, ao passar pela bobina do embolo do atuador, cria um campo magnético. Daí as partículas ferromagnéticas imersas alinham-se com essas linhas de campo, fazendo com que o fluido tenha um comportamento de um material viscoplástico quase que instantaneamente. O resultado disto é um atuador com maior força de atuação.

Zhang *et al.* (2016) estudam o efeito do tamanho das partículas ferromagnéticas do fluido magneto reológico. Para isso, realizaram três diferentes experimentos com partículas de diferentes tamanhos. O resultado mostrou que fluidos magneto reológicos com partículas entre 1,5 e 2,8  $\mu m$  de diâmetro, em média, são os mais indicados para atender os requisitos das aplicações de engenharia.

A seguir, a Fig. 2.2 ilustra a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento do fluido magneto reológico quando não se encontra sob a ação do campo magnético (Newtoniano) e quando está submetido a ação do campo magnético conforme duas intensidades diferentes (Bingham – comportamento viscoplástico). A medida que o coeficiente linear da reta no gráfico vai aumentando, significa que o campo magnético vai se intensificando.

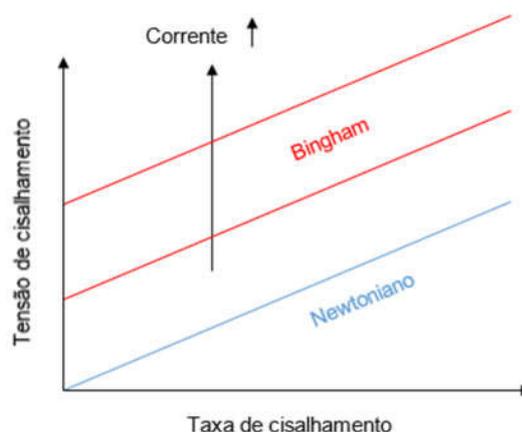


Figura 2.2 – Comportamento da tensão x taxa de cisalhamento para o fluido Newtoniano e o fluido de Bingham.

Barber (2013) diz que o fluido magneto reológico e os dispositivos que o utilizam foram comercializados com sucesso pela primeira vez em 1998 pela LORD® Corporation. Trata-se do mesmo fabricante do atuador utilizado neste trabalho. Na ocasião, foi comercializado um produto denominado *Motion Master™*, que era um sistema de suspensão para um assento de veículos.

No decorrer de seu trabalho, Barber (2013) descreve sobre o uso do fluido MR na fabricação de amortecedores para sistemas de suspensão de veículos. Iniciou-se por instalar este tipo de suspensão em um Corvette, em 2002. Na década posterior, o avanço da área permitiu expandir para suspensões de outros veículos comerciais, passando por veículos da General Motors e da Audi, até chegar, mais recentemente, ao Range Rover Evoque. A Figura 2.3 ilustra esquematicamente a configuração de um atuador com fluido magneto reológico.

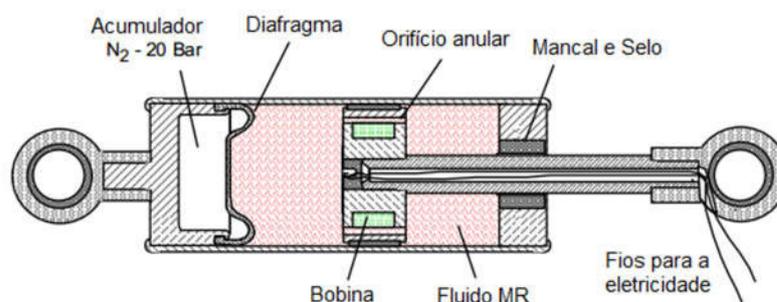


Figura 2.3 - Desenho esquemático de um atuador com fluido MR.

(Adaptado de [http://smartstructures.wikispaces.com/Smart\\_Materials71?showComments=1](http://smartstructures.wikispaces.com/Smart_Materials71?showComments=1)

(Acessado em 22/03/2017)).

No esquema apresentado nas Figs. 2.3 e 2.4 nota-se que quando a haste e o êmbolo se movimentam o fluido magneto reológico se movimenta de um lado para o outro através do orifício anular encontrado no êmbolo.

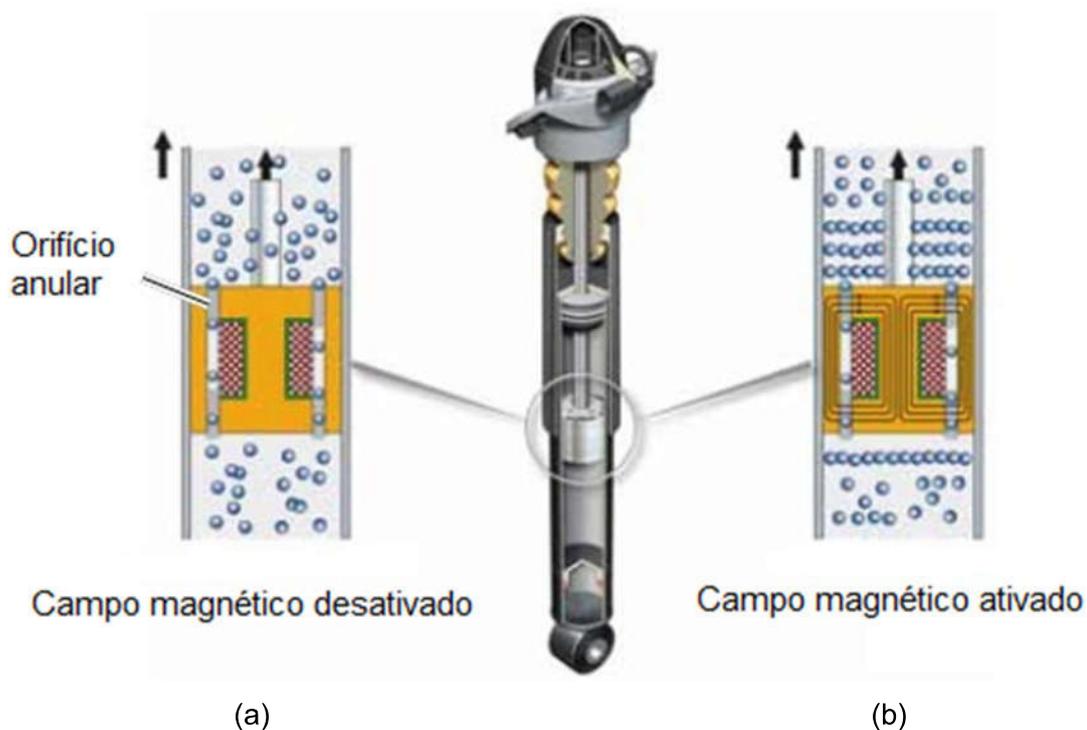


Figura 2.4 - Vista em corte longitudinal de um atuador: (a) sem campo magnético aplicado; (b) com campo magnético aplicado.

([http://s1366.photobucket.com/user/ttf\\_kb/media/mr2\\_zpsf5843cc2.jpg.html](http://s1366.photobucket.com/user/ttf_kb/media/mr2_zpsf5843cc2.jpg.html) (Acessado em 22/03/2017)).

A Figura 2.4 ilustra bem as duas situações às quais o atuador é submetido. Na Figura 2.4 (a), o fluido MR escoava naturalmente pelos orifícios anulares presentes no êmbolo do pistão. Contudo, na Fig. 2.4 (b), ao passar a corrente elétrica pelos fios, um campo magnético é gerado na bobina localizada no êmbolo e, então, as partículas magnéticas, representadas na Fig. 2.4 como pequenas esferas, são alinhadas de acordo com a direção das linhas de campo.

Já a Figura 2.5 apresenta uma vista em perspectiva que auxilia a visão da parte interna do atuador, mostrando uma representação da disposição dos orifícios anulares por onde o fluido atravessa, e como ficam dispostas as linhas de campo. A orientação das partículas

magnéticas devido à ação do campo magnético é o que agrega maior esforço e dificuldade para o embolo se deslocar, resultando maiores forças de atuação.

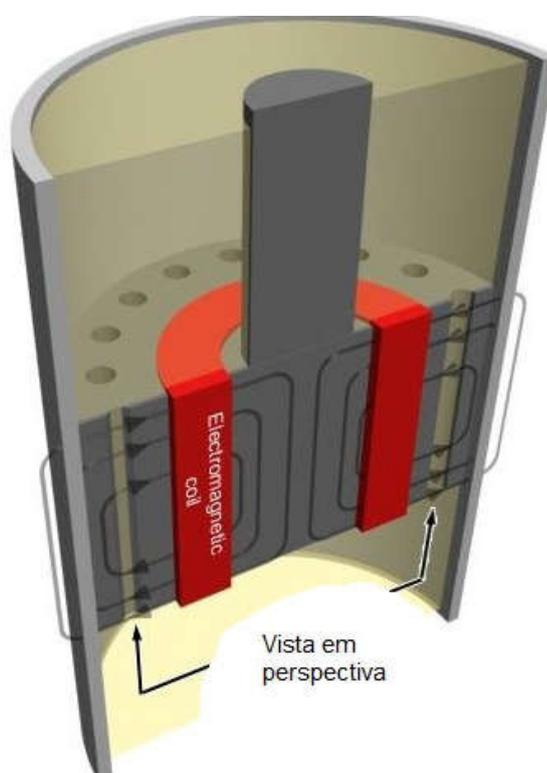


Figura 2.5 - Vista em perspectiva do atuador com fluido MR.

([https://s-media-cache-](https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/d7/ac/dd/d7acdd680f18c565257f1b36fb89cff5.jpg)

[ak0.pinimg.com/736x/d7/ac/dd/d7acdd680f18c565257f1b36fb89cff5.jpg](https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/d7/ac/dd/d7acdd680f18c565257f1b36fb89cff5.jpg) (Acessado em 22/03/2017)).

## 2.2. Otimização

Diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo do projeto ótimo de sistemas mecânicos e mecatrônicos e, também, ao tratamento de problemas inversos em engenharia. Uma ferramenta de projeto bastante utilizada é o uso de técnicas de otimização, tanto as clássicas como as heurísticas, sendo que estas últimas vêm se tornando mais usuais com o aprimoramento constante da computação digital.

Neste tópico serão apresentados alguns trabalhos anteriores, cujos autores incorporaram diferentes técnicas de otimização, particularmente com a finalidade de fazer o ajuste de modelos matemáticos, usando como referência resultados experimentais.

Schurter e Roschke (2000) propõem um modelo *fuzzy* para o atuador com fluido magneto reológico e, para encontrar os melhores parâmetros do modelo, utilizam o ANFIS (*Adaptative Neural Fuzzy Inference System*). Assim, este método de otimização foi utilizado para determinar 27 parâmetros não lineares e 96 parâmetros lineares que foram usados para descrever o comportamento do modelo do atuador SD-1000. O uso do ANFIS contribuiu para aumentar a viabilidade da simulação em tempo real.

Kwok *et al.* (2006) desenvolvem em seu trabalho o modelo histerético de atuadores com fluido magneto reológico. Em suas contribuições, eles optam por usar a técnica de otimização conhecida como *Particle Swarm Optimization*. Ao final do trabalho, eles ainda apresentam os parâmetros que foram identificados no modelo e evidenciam a precisão da metodologia utilizada.

Ahmadkhanlou (2008) usou um procedimento de otimização para encontrar as melhores dimensões possíveis do atuador com fluido magneto reológico. Eles avaliam, em seu trabalho, parâmetros como o peso do atuador, o custo, dimensões (comprimento e diâmetro do atuador), além de otimizarem a energia utilizada por ele e a força resultante. Toda essa otimização é feita no ambiente do *software* MRFMAD (*Magnetorheological Fluid Modeling, Analysis and Design*).

Ahn; Truong; Islam (2009) utilizaram o método das redes neurais artificiais para buscar a melhor configuração de parâmetros que influem no projeto de atuador com fluido magneto reológico, usando como referência um modelo matemático característico. A ideia proposta por eles foi a de usar o algoritmo *Back Propagation* para ajustar primeiramente as entradas das funções de pertinência e os pesos das regras *fuzzy*, objetivando a minimização da função erro.

Paschoal (2011) faz uso do *Toolbox* do *software* MATLAB® e otimiza o modelo fenomenológico considerado (SPENCER *et al.*, 1996), usando a função "*fminsearch*". Os resultados encontrados foram considerados satisfatórios para o sistema estudado.

Gagg Filho (2012) fez uso de uma técnica de algoritmos genéticos para obter o projeto ótimo de um controlador *fuzzy* utilizado por ele proposto para o controle semiativo de suspensões veiculares.

Priyandokoa; Syakirinr; Mailah (2013) apresentam um novo modelo não paramétrico do atuador com fluido magneto reológico utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA), incorporando o método do enxame de partículas no otimizador. Na abordagem em questão, o método *Back Propagation* também é utilizado juntamente com a técnica de redes neurais, através da arquitetura MLP (*Multi Layer Perceptron*), para treinar e atualizar os pesos das regras *fuzzy* em tempo real.

Cavalini *et al.* (2015) propõem o uso de uma técnica de otimização, a Evolução Diferencial (STORN e PRICE, 1995), para determinar os parâmetros desconhecidos do modelo fenomenológico proposto por (SPENCER *et al.*, 1996). Neste caso, a aplicação considerada é voltada para o controle de vibração de um rotor flexível.

O presente trabalho utiliza-se da mesma técnica de otimização empregada por Cavalini *et al.* (2015). O algoritmo de Evolução Diferencial (STORN e PRICE, 1995) representa uma abordagem recente, de fácil implementação, que dificilmente a solução converge para soluções locais, que tem permitido a obtenção de resultados bastante satisfatórios para uma gama importante de problemas de engenharia, o que justifica plenamente sua escolha nesta dissertação de mestrado.

Do ponto de vista conceitual desta técnica de otimização, Tsuruta (2015) explica que a evolução diferencial é um minimizador estocástico de funções matemáticas baseado na evolução de um conjunto de possíveis soluções (população) e que foi desenvolvido por Storn e Price (1995). Relata ainda que, em uma população de indivíduos (soluções potenciais), um número fixo de vetores são inicializados aleatoriamente e, então, inicia-se o processo de varredura no espaço de projeto a fim de se encontrar o melhor indivíduo que fará com que a função objetivo do problema seja minimizada. A cada iteração do algoritmo, novos vetores são gerados através da combinação de vetores escolhidos aleatoriamente da população atual, o que no processo de seleção natural é conhecido por “mutação”. Os vetores gerados desta combinação são então recombinados com um vetor alvo predeterminado para produzir um “vetor tentativa”. Este “vetor tentativa” é que passará pelo processo da seleção natural conhecido como “seleção”, em que ele somente será escolhido caso esse indivíduo (vetor tentativa) consiga minimizar o valor da função objetivo do problema em questão.

A Figura 2.6 ilustra um esquema de como é o passo a passo de um algoritmo de Evolução Diferencial.

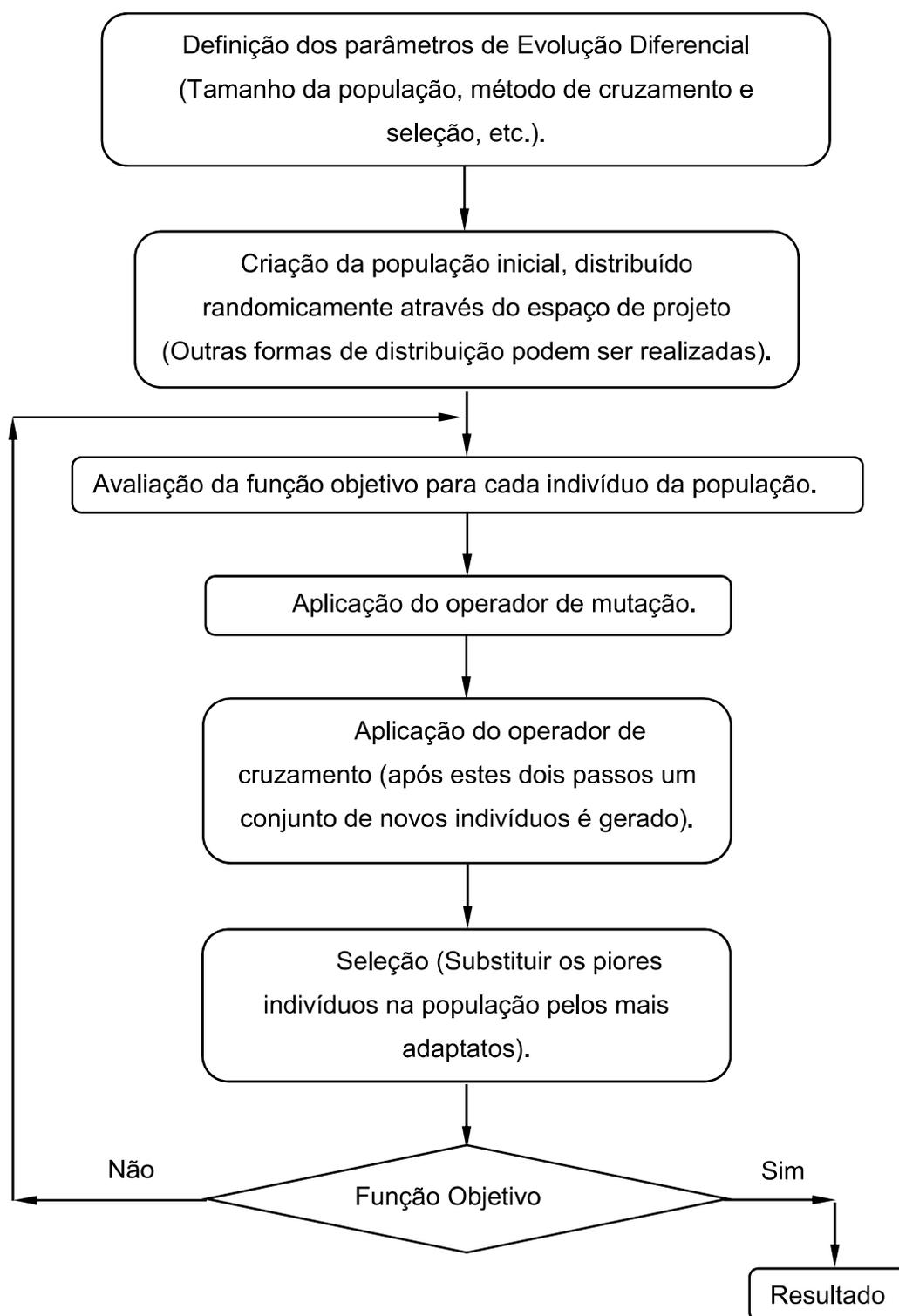


Figura 2.6 – Esquema do algoritmo de evolução diferencial (TSURUTA, 2015)

# CAPÍTULO III

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Depois de uma revisão sobre alguns dos principais modelos matemáticos paramétricos e de um modelo não paramétrico existentes na literatura, foram feitos ensaios experimentais em um atuador com fluido magneto reológico linear para a caracterização do seu comportamento dinâmico. Para tanto, as forças geradas pelo atuador foram medidas considerando a amplitude e frequência do movimento aplicado e cinco níveis de corrente elétrica.

A seguir, será feita uma descrição do ensaio realizado, bem como a apresentação de alguns resultados obtidos, além de uma breve discussão final.

### 3.1. Descrição do Ensaio

O ensaio para determinar o comportamento dinâmico do atuador com fluido magneto reológico foi realizado em uma máquina de ensaios servo hidráulica, MTS *Landmark*<sup>®</sup>, modelo 370.10, que se encontra no LMEst. A Figura 3.1 mostra a máquina onde os ensaios foram realizados.



Figura 3.1 - Máquina de ensaios MTS *Landmark*®.

Com o objetivo de observar os níveis de força provenientes do atuador com fluido magneto reológico, para diferentes correntes elétricas aplicadas em sua bobina, foi considerado um deslocamento senoidal com amplitude de 3 mm pico a pico (pp) e frequência de 10 Hz.

A Figura 3.2 ilustra o sinal de deslocamento aplicado no atuador pela máquina de ensaios MTS *Landmark*®.

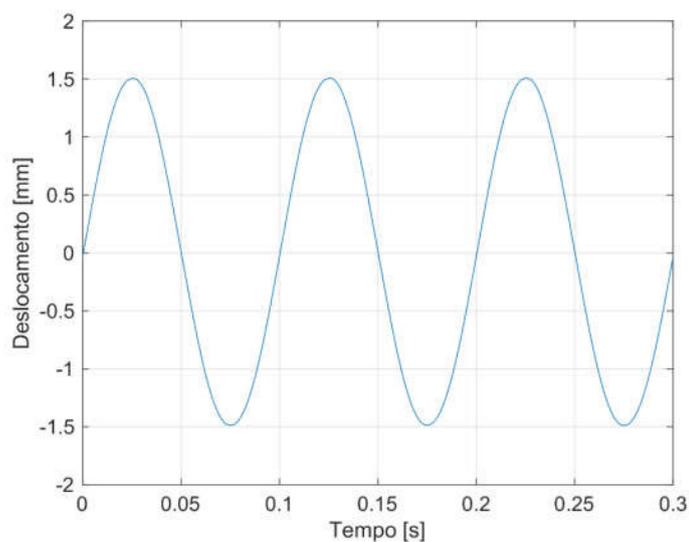


Figura 3.2 - Deslocamento aplicado no atuador com fluido magneto reológico

### 3.1.1. O atuador Magneto Reológico Linear

Em trabalhos recentes, alguns autores desenvolveram estudos sobre atuadores com fluido magneto reológico, como Truong e Ahn (2012) e Liem, Truong e Ahn (2015), que utilizaram em seus experimentos o atuador RD-1005-3, e Paschoal (2011), que utilizou o atuador RD-1005-1. Os dois tipos de atuadores utilizados foram produzidos pela LORD Corporation®.

No presente trabalho, foi usado o atuador com fluido magneto reológico modelo RD-8040-1, também da LORD Corporation®. A Figura 3.3 ilustra o atuador utilizado nos testes.



Figura 3.3 - Atuador com fluido magneto reológico RD-8040-1<sup>1</sup> da LORD Corporation®.

A Figura 3.4 apresenta o atuador com os suportes utilizados para fixar o sistema na máquina de ensaios MTS Landmark®.

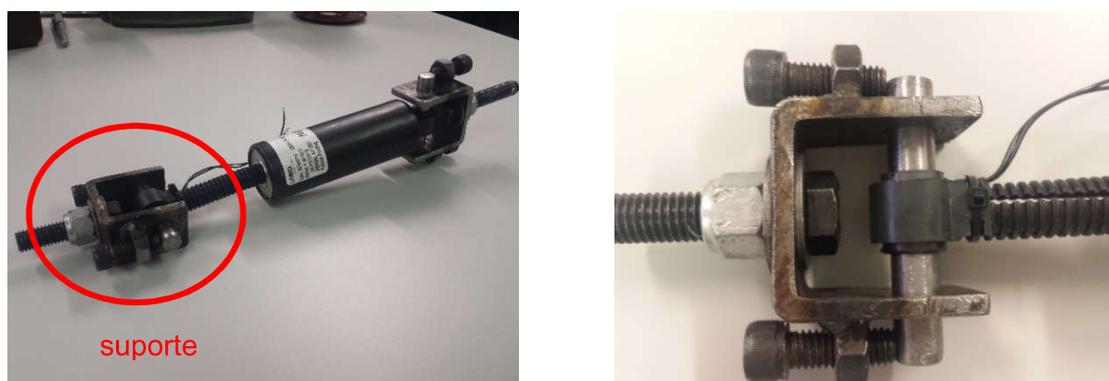


Figura 3.4 - Detalhes do suporte utilizado para realizar o ensaio do atuador com fluido magneto reológico.

<sup>1</sup> Preço do atuador com fluido MR RD-8040-1: US\$ 400.00  
(Fonte: [www.lordmrstore.com/lord-mr-products](http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products)).

Optou-se por realizar o ensaio com a haste do atuador deslocada em torno de 30 mm, contados a partir do seu comprimento distendido. Para tanto, foi aplicada uma pré-carga de 31,3 N de compressão no amortecedor. Assim sendo, todos os valores de força, tanto experimentais como numéricos (obtidos dos modelos matemáticos), foram subtraídos de suas médias. A Figura 3.5 ilustra a montagem de todo o equipamento na máquina de ensaios.



Figura 3.5 - Atuador fixado na máquina de ensaios MTS *Landmark*®.

A Tabela 3.1 apresenta propriedades típicas do atuador com fluido magneto reológico, RD-8040-1 da LORD *Corporation*®. A Tabela 3.2 apresenta as suas propriedades elétricas.

Tabela 3.1 - Propriedades do atuador RD-8040-1 da LORD *Corporation*® (LORD, 2009).

Curso	0,055 m
Comprimento estendido	0,208 m
Diâmetro do corpo	0,0421 m (máx)
Diâmetro do eixo	0,010 m
Resistência à tração	8.896 N (máx)
Temperatura de operação	71 ° C (máx)
<b>Forças do amortecedor</b>	
0,05 m/s, 1 A	> 2.447 N (pp)
0,20 m/s, 0 A	< 667 N (pp)

Tabela 3.2 - Propriedades elétricas do atuador RD-8040-1 da LORD Corporation® (LORD, 2009).

Tensão elétrica de entrada	12 V (DC)
<b>Corrente elétrica de entrada</b>	
Contínua por 30 segundos	1,0 A (máx)
Intermitente	2,0 A (máx)
<b>Resistência elétrica</b>	
Temperatura ambiente	5 $\Omega$
71° C	7 $\Omega$

Para mais informações técnicas a respeito dos atuadores com fluido magneto reológico RD-8040-1 e RD-8041-1 da LORD Corporation®, consultar o anexo A.1.

Tendo conhecimento das propriedades inerentes ao atuador com fluido magneto reológico, foi feito um planejamento para que se pudesse escolher uma frequência para o deslocamento senoidal da haste do atuador e uma faixa de corrente elétrica que capaz de garantir segurança nos ensaios.

Resolveu-se, então, realizar os ensaios usando uma frequência de 10 Hz e uma faixa de corrente elétrica de 0 a 1,0 A, com passos de 0,2 A. Adotou-se a amplitude do deslocamento senoidal como sendo de 3 mm pico a pico (pp). A escolha da frequência e da amplitude foi feita visando aplicações em sistemas dinâmicos, de tal forma que sejam respeitados os limites operacionais do equipamento, conforme informa LORD (2009).

Antes da aplicação da corrente na bobina do atuador, foram feitos testes considerando o sistema em vazio. Na ausência de corrente elétrica na bobina do atuador, este funciona como um amortecedor convencional com valores fixos de constantes de amortecimento e de rigidez (LIEM; TRUONG e AHN, 2015).

A seguir, faz-se uma breve explanação sobre o uso e a caracterização do controlador de corrente utilizado.

### 3.1.2. O controlador de corrente

Para a realização dos ensaios foi preciso caracterizar o controlador de corrente do atuador LORD Wonder Box®<sup>1</sup> (ver anexo A.2). Com essa caracterização, a sensibilidade do

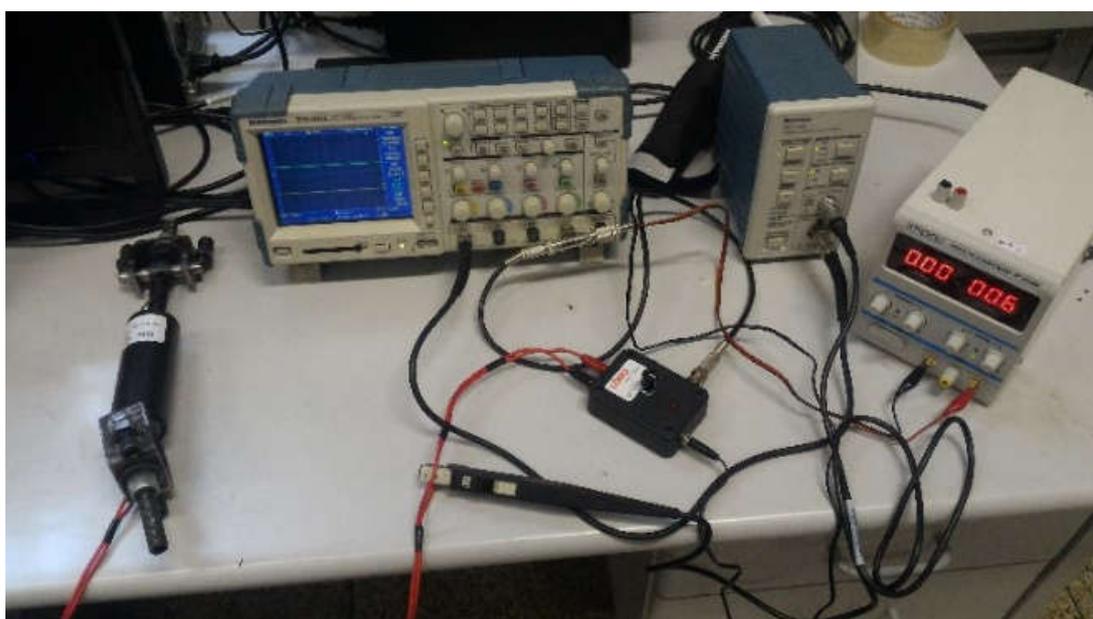
<sup>1</sup> Preço do controlador de corrente LORD Wonder Box®: US\$ 350.00  
(Fonte: [www.lordmrstore.com/lord-mr-products](http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products)).

controlador (V/A) pode ser determinada. A Figura 3.6 ilustra o controlador de corrente utilizado.

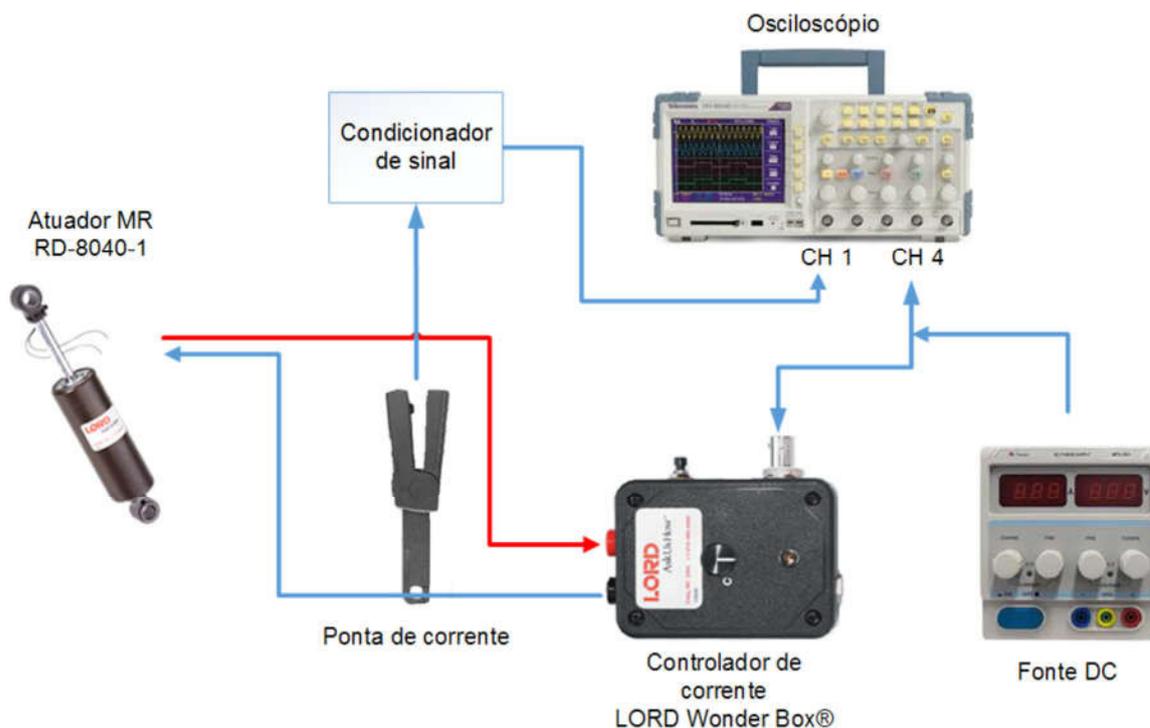


Figura 3.6 - Controlador de corrente LORD Wonder Box® (LORD, 2006).

A Figura 3.7 (a) mostra os equipamentos utilizados para fazer a caracterização do controlador e a Fig. 3.7 (b) ilustra um diagrama de montagem do experimento realizado. Foi utilizada uma fonte DC (corrente contínua) de 30 V e 2,0 A para enviar um sinal de tensão para o controlador de corrente LORD Wonder Box® que, por sua vez, transmite a corrente recebida para o atuador. Concomitantemente, o osciloscópio da marca Tektronix, modelo TPS 2014 recebe no canal 4 o sinal de tensão emitido pela fonte DC e, no canal 1, as informações de corrente medidas na saída do controlador pelo conjunto condicionador de sinal-ponteira de medição de corrente (marca Tektronix). O uso do osciloscópio neste experimento se deve à necessidade de aferição e validação dos valores aplicados e medidos.



(a)



(b)

Figura 3.7 – (a) Instrumentação usada na caracterização do controlador e (b) Diagrama de montagem do experimento.

Uma vez instalada toda a instrumentação para a caracterização do controlador, adotou-se uma resolução de 50 mV entre uma aquisição e outra dos valores de tensão aplicados até que se obtivesse a faixa de corrente desejada para os experimentos (correntes entre 0 e 1,0 A).

A Figura 3.8 apresenta o resultado dessa caracterização do controlador, ao mostrar o comportamento da tensão aplicada em função da corrente de saída.

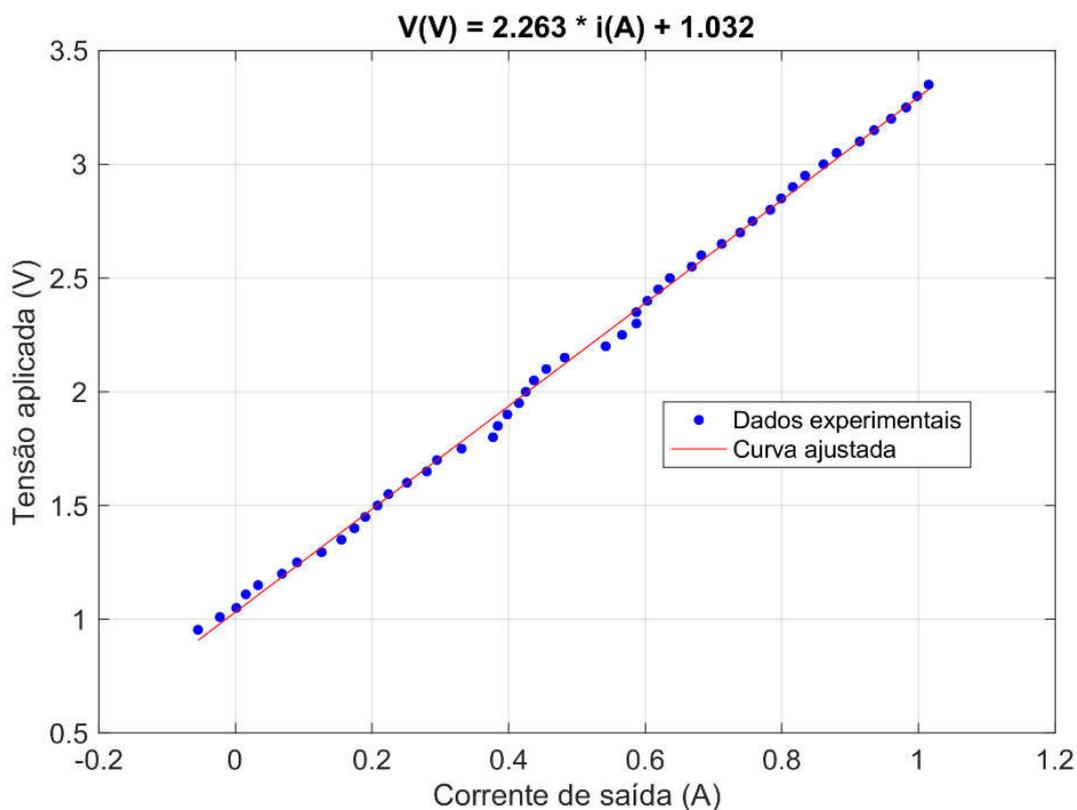


Figura 3.8 - Resultado da caracterização do controlador de corrente.

Observa-se que foi feito na Fig. 3.8 um ajuste de curva polinomial de primeira ordem no intervalo do gráfico que interessa para o ensaio (para correntes entre 0 e 1,0 A). Através da obtenção da curva de primeiro grau ajustada para os dados experimentais da caracterização do controlador, notou-se que a sensibilidade do aparelho é 2,263 V/A. Com isso, a tensão aplicada no atuador, necessária para se obter a corrente elétrica desejada, pode ser determinada pela Eq.(3.1). Assim, a voltagem  $V$ , em volts, representa a tensão aplicada nos terminais do atuador e a corrente  $i$ , em ampère, representa a corrente que percorre a bobina situada no êmbolo do atuador.

$$V = 2,263 \cdot i + 1,032 \quad (3.1)$$

Encerrada a caracterização do controlador de corrente, foi possível dar continuidade aos ensaios. Foram então aplicados valores de tensão no controlador para obter as correntes

correspondentes. A Figura 3.9 mostra como ficou a montagem final do ensaio, incorporando agora o controlador de corrente e o analisador de sinal.

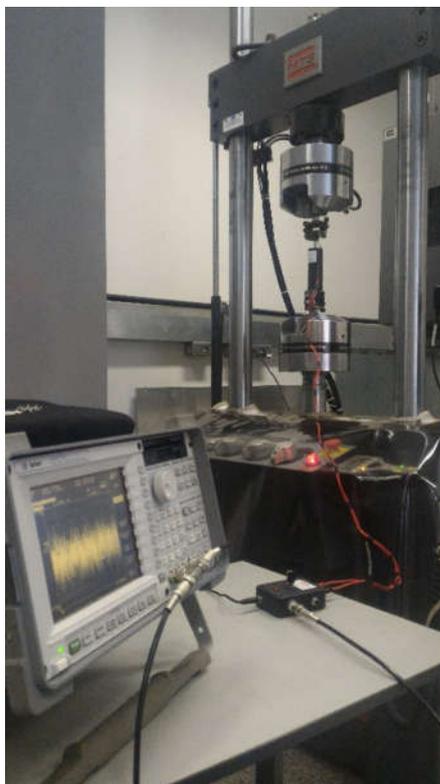


Figura 3.9 - Montagem final do ensaio.

### 3.2. Resultados do ensaio

Os resultados obtidos no ensaio realizado são apresentados através dos sinais temporais de deslocamento da haste do atuador e do sinal de força medido. Com isso, a Fig. 3.10 apresenta o comportamento do atuador para um deslocamento senoidal de amplitude 3 mm pico a pico (pp) e frequência de 10 Hz, com a corrente elétrica variando de 0 a 1,0 A.

Para maior refinamento dos ensaios, alterou-se a taxa de aquisição de dados da máquina de ensaios MTS *Landmark*<sup>®</sup> de tal forma que o intervalo de tempo entre uma aquisição e outra fosse de um  $\Delta t = 9,7656 \cdot 10^{-4} s$ , ou seja, o menor intervalo de tempo admissível da máquina.

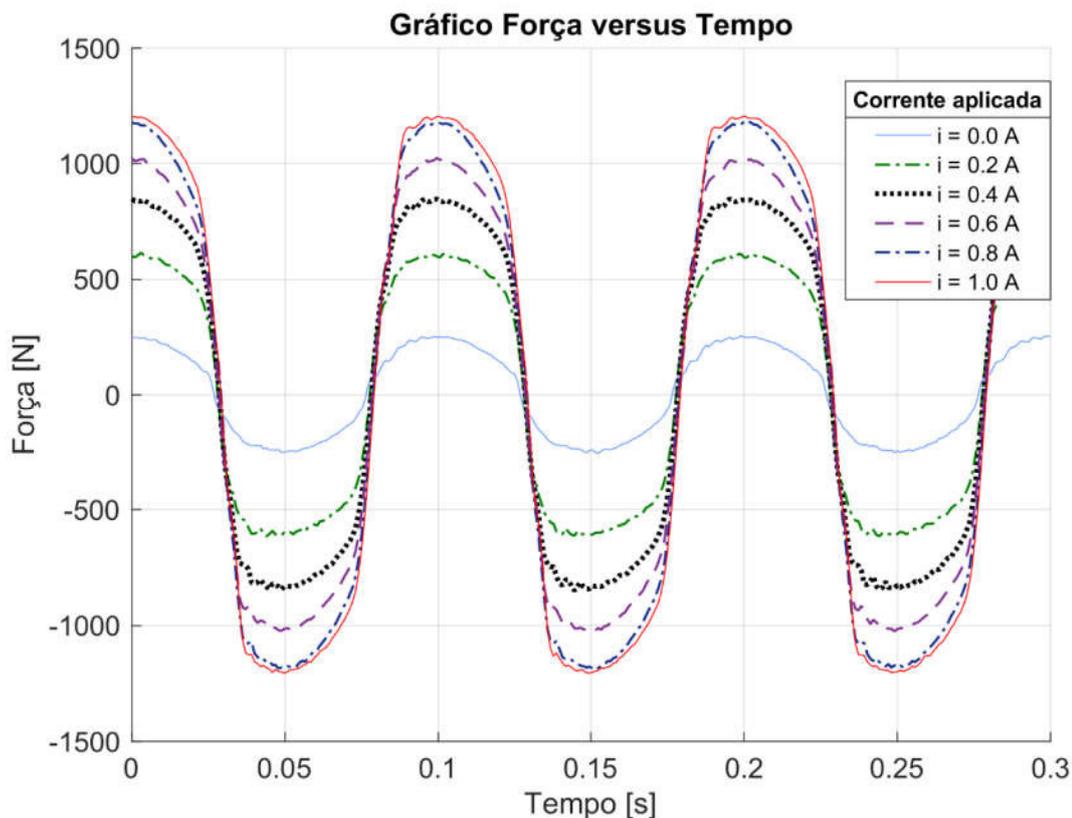


Figura 3.10 - Resposta da força x tempo (experimental).

Nota-se que a força gerada pelo atuador aumenta com a corrente elétrica aplicada. Além disso, é possível observar que existe uma região de saturação para um valor de corrente próximo a 1,0 A. Isto é evidenciado pela diferença entre as forças máximas observadas para dois valores de corrente elétrica subsequentes. A diferença entre as forças diminui à medida que a corrente elétrica aumenta. Note que a menor diferença é dada entre as forças obtidas para as correntes elétricas iguais a 0,8 A e 1,0 A.

No entanto, é importante salientar que o ensaio não foi realizado em condições capazes de controlar a temperatura interna do fluido MR. Assim, com o aumento da temperatura, a viscosidade do fluido diminui e este efeito pode ter contribuído para uma diminuição abrupta entre as forças observadas com corrente elétrica de 0,8 A e de 1,0 A.

Além disso, os diferentes níveis de corrente foram aplicados em sequência, na ordem crescente de intensidade. Utilizou-se de ventilação forçada direcionada diretamente sobre o atuador, como forma de reduzir o aumento de temperatura e, assim, minimizar os efeitos desta sobre a viscosidade do fluido e sobre os níveis de força do atuador observados no experimento.

O comportamento da força do atuador em relação ao deslocamento da haste é ilustrado na Fig. 3.11 para diferentes níveis de corrente elétrica.

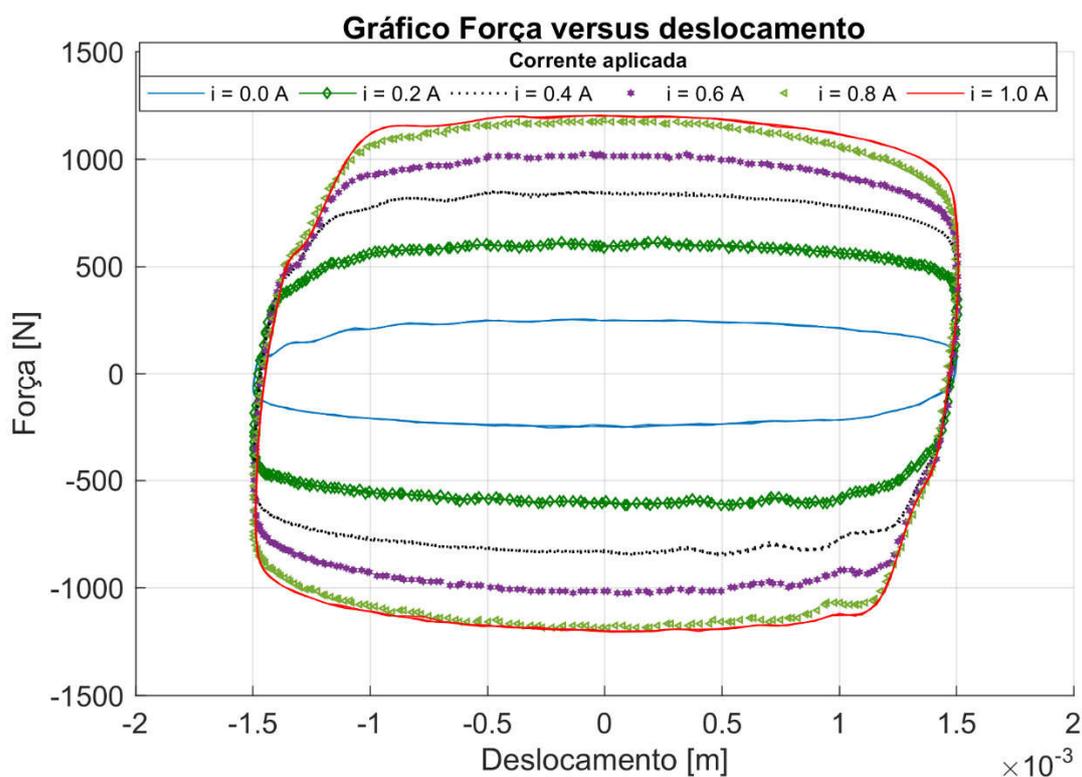


Figura 3.11 – Resposta da força x deslocamento (experimental).

Nota-se um padrão para os diferentes níveis de corrente elétrica e que o seu aumento acarreta em um ganho de força para o atuador. Observa-se também que, à medida que se aumenta os níveis de corrente elétrica, a diferença entre as forças exercidas pelo atuador diminui.

A Figura 3.12 mostra a relação da força do atuador com a velocidade desenvolvida pela haste durante o experimento. Note o aparecimento de ciclos de histerese, comportamento característico de atuadores com fluido magneto reológico.

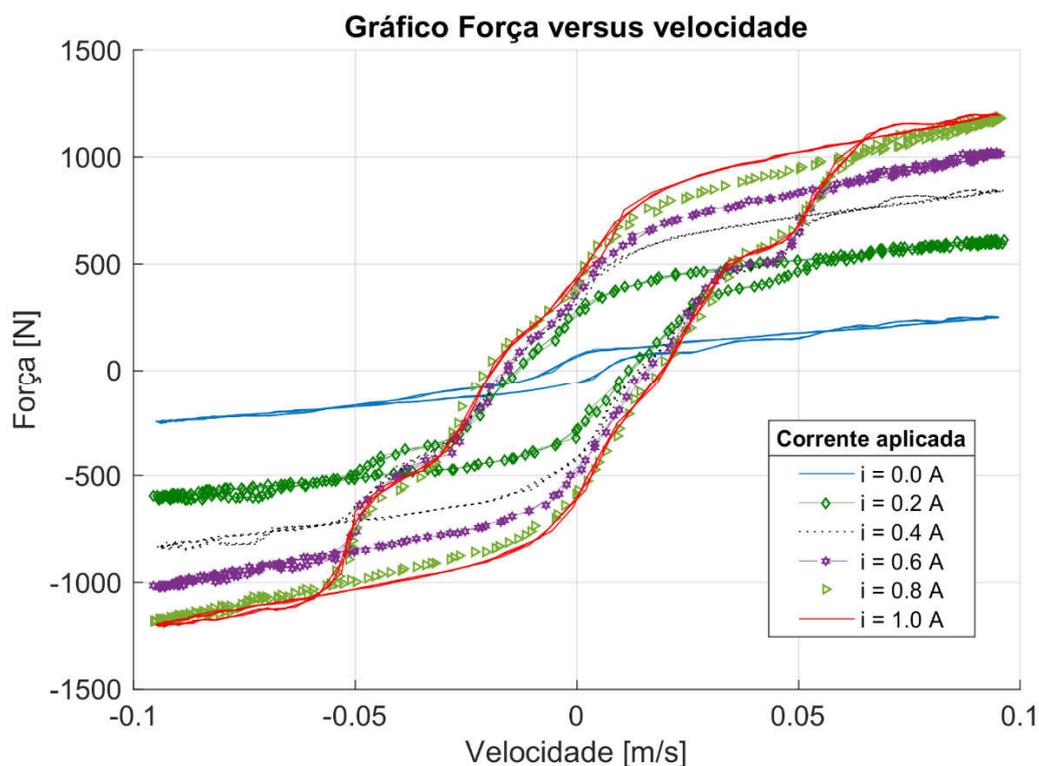


Figura 3.12 - Resposta da força x velocidade (experimental).

É importante salientar que cada ensaio teve um tempo de duração de trinta segundos. Os dados obtidos e apresentados nesse trabalho foram selecionados tomando-se os instantes finais do experimento, já que o objetivo é o de obter os dados no regime permanente.

### 3.3. Análise dos resultados

Os resultados observados nos ensaios são compatíveis com aqueles da literatura. Nesse sentido, as características das curvas encontradas para as relações Força x Tempo, Força x Deslocamento e Força x Velocidade são semelhantes às curvas observadas nos trabalhos de Truong e Ahn (2012), Gagg Filho (2013) e Liem; Truong e Ahn (2015).

É possível observar por meio dos resultados encontrados que a corrente elétrica estabelece uma relação clara para a força aplicada pelo atuador. Isso tem a ver com o aumento da viscosidade aparente do fluido, devido ao alinhamento das partículas magnéticas presentes, decorrente da ação do campo magnético gerado pela corrente elétrica.

Vale ressaltar que os ensaios realizados não foram conduzidos em ambiente com temperatura controlada. Os fluidos magneto reológicos sofrem mudanças nas suas propriedades reológicas quando submetidos à variação de temperatura. Essa influência não foi avaliada no presente trabalho, mas pode ser responsável, por exemplo, pela diminuição abrupta da diferença entre as forças observadas quando da aplicação das correntes elétricas de 0,8 A e de 1,0 A. Além disso, cada ensaio foi realizado durante 30 s. Esse tempo também contribui para que o atuador receba mais calor dissipado por efeito Joule na bobina que está presente no êmbolo.

A Figura 3.13 mostra o aumento da temperatura medida diretamente no atuador ao longo do ensaio.

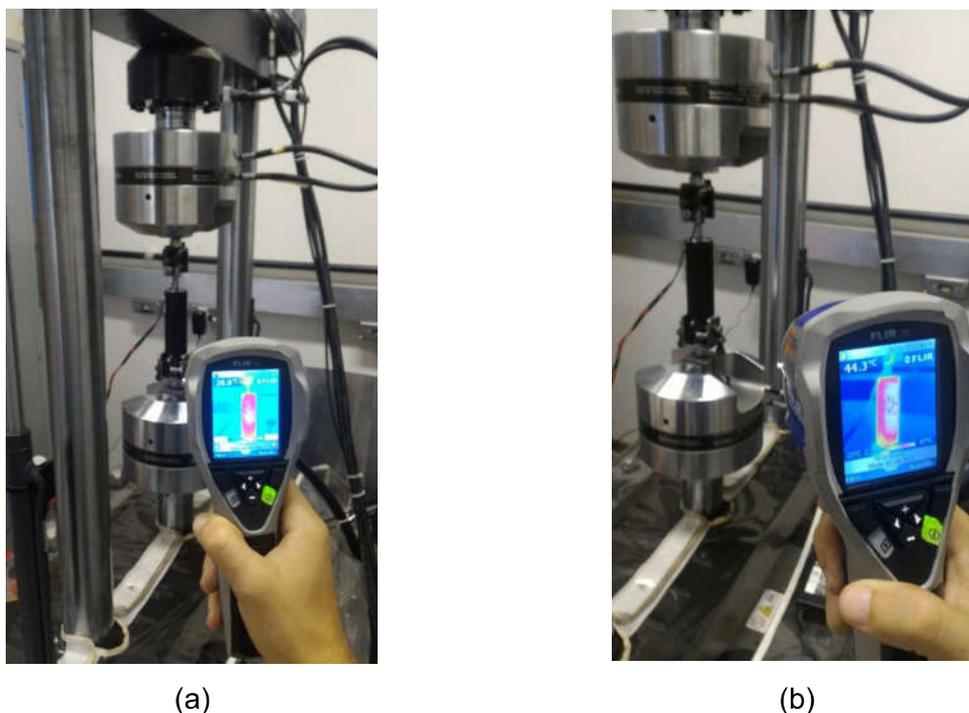


Figura 3.13 - (a) temperatura: 28,8°C [ $i = 0,2$  A] e (b) temperatura: 44,3°C [ $i = 1,0$  A].

Como observado nas Figs 3.10, 3.11 e 3.12, à medida que a corrente aumenta, de forma gradual e uniforme, a diferença entre os níveis de força diminuem, até que as forças máximas sejam aproximadamente as mesmas, para valores de corrente iguais a 0,8 A e 1,0 A. Com o aumento dos níveis de corrente elétrica, ocorre uma saturação da corrente que percorre a bobina. Isto leva a uma diminuição significativa na diferença entre os níveis de força

verificados na máquina para valores de corrente subsequentes, somado ao fato do aumento da temperatura poder influenciar na viscosidade do fluido.

# CAPÍTULO IV

## MODELOS PARAMÉTRICOS DE UM ATUADOR COM FLUIDO MAGNETO REOLÓGICO

Caicedo; Jiang; Baxter (2016) observaram que diversos autores publicaram trabalhos dedicados ao ajuste de modelos matemáticos paramétricos representativos de atuadores lineares com fluido magneto reológico usando técnicas de otimização. Neste sentido, os autores procuram minimizar uma função de erro construída a partir da comparação dos resultados experimentais com aqueles provenientes de simulação computacional.

Neste capítulo serão apresentados alguns modelos paramétricos selecionados da literatura, sendo que alguns foram devidamente ajustados, usando técnicas de otimização, tomando como referência resultados dos ensaios experimentais. Assim sendo, o autor escolheu otimizar os seguintes modelos: Modelo de Bingham, Modelo de Bouc-Wen modificado e o Modelo Histerético. Estes foram escolhidos por serem considerados representativos no contexto deste trabalho. As simulações computacionais, realizadas para se obter os parâmetros dos modelos ajustados, foram feitas em um computador (*Desktop*) com processador Intel® Core™ i7-4770 e com memória RAM instalada de 16,0 GB.

### 4.1. Modelo de Bingham

O modelo de fluido de Bingham é usualmente utilizado para descrever o comportamento da curva tensão-deformação de fluidos magneto reológicos (fluidos MR) (DYKE, 1996). Da mesma forma, Truong e Ahn (2012) relataram que o comportamento tensão-deformação do

modelo viscoplástico de Bingham é muito utilizado como forma de descrever a atuação dos fluidos MR. Trata-se de um modelo bastante simplificado, já que possui poucos parâmetros. Isso implica diretamente o fato do modelo não conseguir representar adequadamente uma das características mais importantes do comportamento real do atuador que é o comportamento de histerese. A Equação (4.1) representa o modelo viscoplástico de Bingham.

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu_0 \cdot \dot{\theta}, & \text{se } \tau > \tau_0 \\ \dot{\theta} = 0 & , \text{ se } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

em que  $\tau$  é a tensão a que o fluido MR está submetido,  $\tau_0$  é a tensão limite de escoamento,  $\mu_0$  é a viscosidade plástica e  $\dot{\theta}$  é a taxa de cisalhamento do fluido.

O modelo físico do comportamento do fluido MR, idealizado por Stanway; Sproston; Stevens (1985, 1987), baseado no modelo de Bingham, é ilustrado na Fig. 4.1.

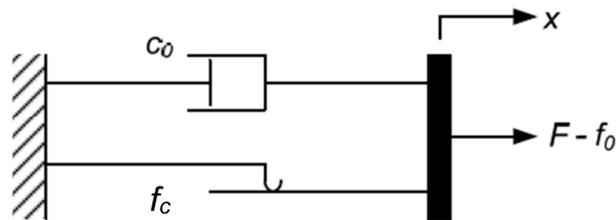


Figura 4.1 - Modelo físico de Bingham para o fluido MR (TRUONG; AHN, 2012).

Na Figura 4.1,  $c_0$  representa o amortecimento viscoso,  $f_c$  representa o atrito seco,  $f_0$  representa a força no acumulador e  $F$  é a força exercida pelo atuador quando aplicado um deslocamento  $x$ . A equação que governa esse modelo físico é dada pela Eq.(4.2):

$$\mathbf{F} = f_c \text{sign}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (4.2)$$

em que  $\text{sign}(\dot{x})$  representa a função sinal em relação à velocidade da haste do atuador linear com fluido magneto reológico (atuador MR).

O algoritmo de otimização denominado como Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995) foi utilizado para determinar os parâmetros ótimos desse modelo matemático ( $f_c, c_0, f_0$ ) em relação aos dados obtidos nos ensaios. A função objetivo adotada foi baseada no erro relativo entre as forças obtidas no modelo matemático e as forças obtidas no ensaio realizado, conforme é mostrado na Eq.(4.3).

$$E = \frac{\|F_{Modelo} - F_{Experimento}\|}{\|F_{Experimento}\|} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Os parâmetros escolhidos para o otimizador são os seguintes: 100 indivíduos para a população inicial, número máximo de iterações igual a 200, taxa de perturbação de 0,5 e probabilidade de cruzamento de 80 %. Vale ressaltar que, mesmo adotando um número máximo de iterações igual a 200, a otimização convergiu com apenas 20 iterações, ainda que o erro associado estivesse bem elevado. Com essas configurações de simulação, o tempo de processamento foi de 1 min e 24 segundos, evidenciando o baixo custo computacional do modelo, relativo ao computador anteriormente especificado. A Figura 4.2 ilustra como foi a convergência da função objetivo, representada pela Eq.(4.3) para as várias iterações.

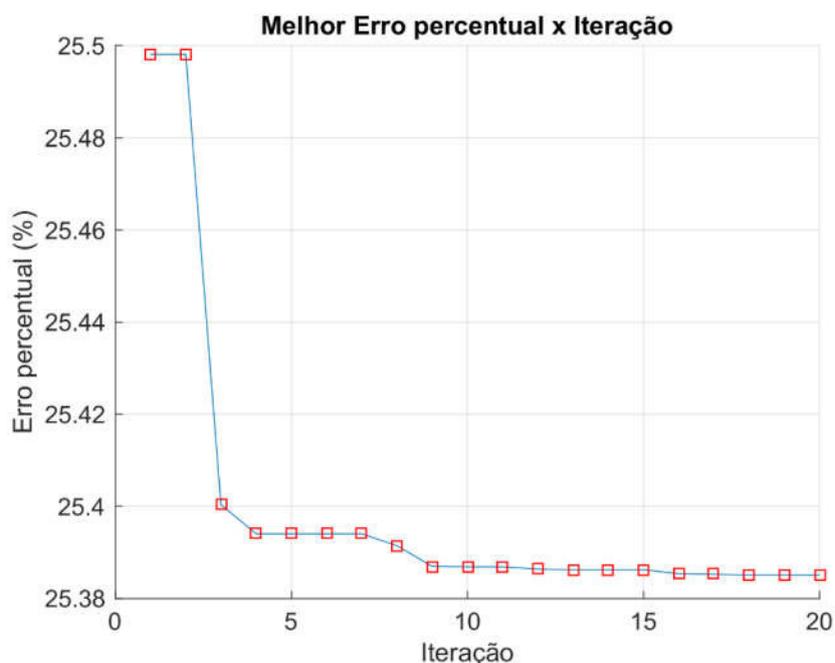


Figura 4.2 – Convergência do ajuste do modelo de Bingham.

Por se tratar de um modelo matemático paramétrico, a partir de uma determinada configuração não é possível conseguir melhores resultados já que o modelo responde a uma lei matemática bem definida. As seguintes considerações de entrada do modelo foram feitas: amplitude de 3 mm pico a pico, frequência de 10 Hz e corrente de 1,0 A. A Equação (4.4) mostra os valores ótimos encontrados.

$$\begin{aligned} f_c &= 250 \quad [N] \\ c_0 &= 11100 \quad [Ns / m] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Lembrando que  $f_0$  é a força no acumulador obtida durante a realização do ensaio, conforme foi visto no capítulo III, sendo  $f_0 = -31,3N$  (carga de compressão) em média.

Portanto, o modelo final de Bingham, para a configuração apresentada, pode ser escrito de acordo com a Eq.(4.5).

$$F = 250 \cdot \text{sign}(\dot{x}) + 11100 \cdot \dot{x} - 31,3 \quad (4.5)$$

sendo que  $F$  é a força (N) gerada pelo atuador MR e  $\dot{x}$  (m/s) é a velocidade da haste.

Neste modelo final, representado pela Eq.(4.5),  $f_c = 250N$  está diretamente relacionado com a tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ). Assim sendo, interpreta-se que o atuador MR permanece em repouso até que uma força superior a  $f_c$  atue sobre ele. Após ser submetido a um esforço maior do que este valor, a haste do atuador passa a se movimentar. Note também que  $f_c$  está relacionado com o valor de corrente elétrica aplicado já que, no capítulo III, a Fig. 3.12 mostra a relação da força do atuador com a corrente aplicada e foi possível observar o aumento nos níveis de força com o aumento da corrente. Ainda há o parâmetro  $c_0 = 11100Ns / m$ , que está relacionado com a viscosidade plástica ( $\mu_0$ ) e que depende das propriedades do fluido MR. O parâmetro  $f_0 = -31,3N$  indica apenas um deslocamento inicial da haste do atuador.

A Figura 4.3 compara a curva força *versus* velocidade obtida experimentalmente com os dados obtidos a partir do modelo de Bingham com parâmetros ótimos. Note que a

simplicidade do modelo matemático implica em um comportamento que não corresponde satisfatoriamente ao comportamento real do amortecedor. A principal característica do comportamento real, o fenômeno da histerese, não é bem representada pelo modelo matemático de Bingham.

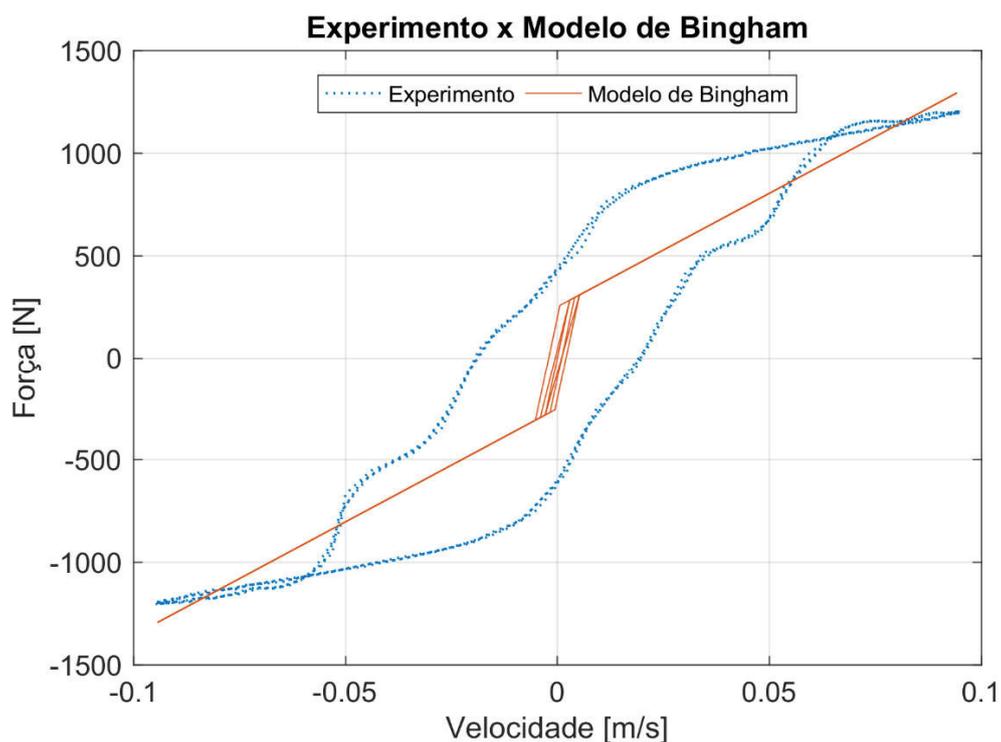


Figura 4.3 - Comportamento da força x velocidade (modelo de Bingham x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

A Figura 4.4 mostra como se comporta a força gerada pelo atuador MR no domínio do tempo com os resultados determinados pelo modelo de Bingham. Note que há muitas diferenças em relação aos resultados experimentais, principalmente onde há inversão no sentido de movimento (nas regiões onde a amplitude da força é máxima e mínima).

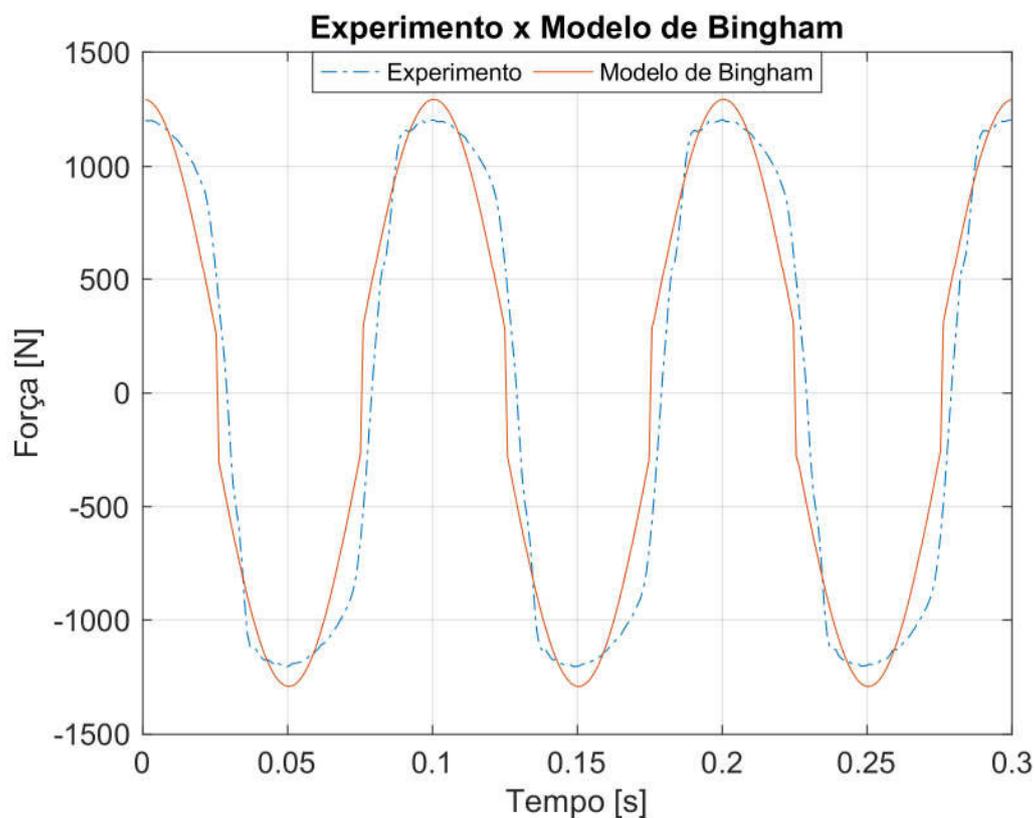


Figura 4.4 - Comportamento da força x tempo (modelo de Bingham x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

A Figura 4.5 ilustra a força em relação ao deslocamento da haste do atuador com fluido MR. Pode-se observar que há o cruzamento de pontos dos modelos experimentais e matemáticos. Contudo, o comportamento de ambas as curvas diverge em muitos pontos, evidenciando que o modelo não é mesmo representativo o suficiente.

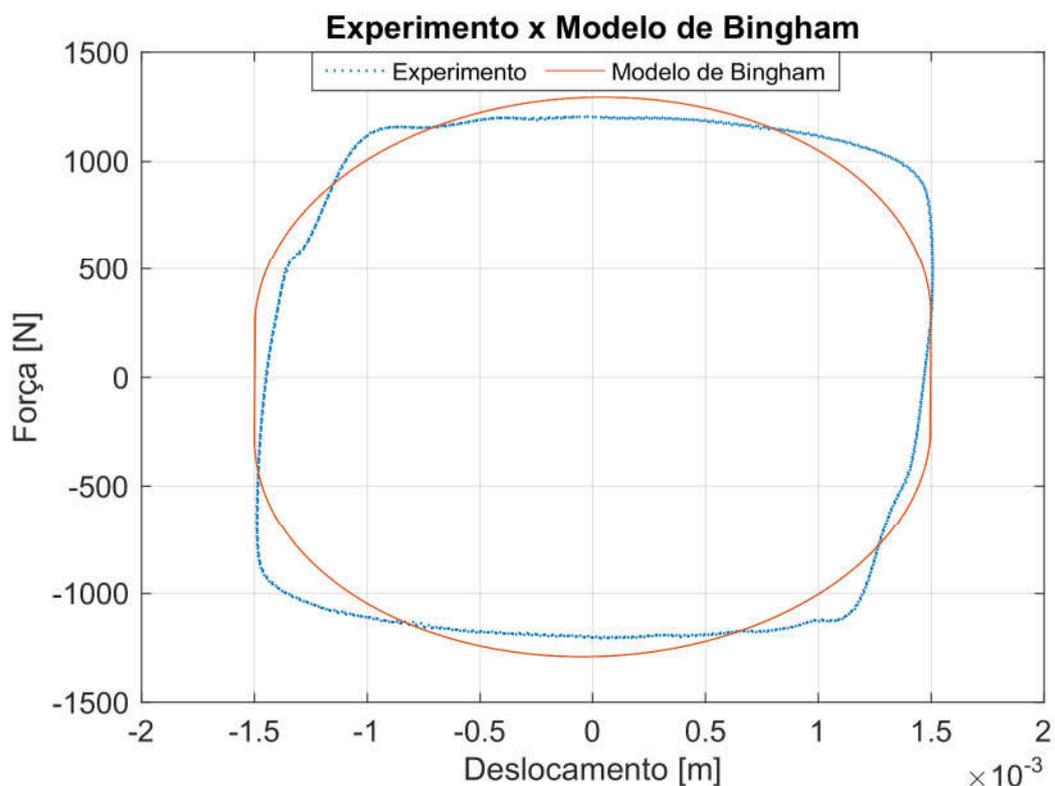


Figura 4.5 - Comportamento da força x deslocamento (Modelo Bingham x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

A otimização que resultou no modelo matemático de Bingham, observado na Eq.(4.5), resultou em um erro relativo percentual de 25,39% do modelo matemático em relação aos dados do ensaio, conforme observado na Fig.4.2. O erro relativo percentual foi calculado conforme Eq.(4.3).

Dessa forma, o modelo de Bingham mostrou-se insuficiente para descrever o comportamento físico do atuador com fluido MR. Com isso, no decorrer dos anos, viu-se a necessidade de explicar melhor os fenômenos envolvidos e, dessa forma, foram empreendidos esforços para obter um modelo mais representativo, capaz de contemplar satisfatoriamente o comportamento de histerese observado na Fig. 4.3.

## 4.2. Modelo de Bingham Estendido

Gamota; Filisko (1991) propuseram uma modificação no modelo de Bingham para prever o comportamento de dispositivos eletro reológicos. Esse modelo é uma extensão do

modelo de Bingham proposto inicialmente por Stanway; Sproston; Stevens (1987) e foi construído a partir da inclusão de um modelo viscoelastoplástico em série com o modelo anterior (DYKE, 1996), conforme ilustra a Fig. 4.6.

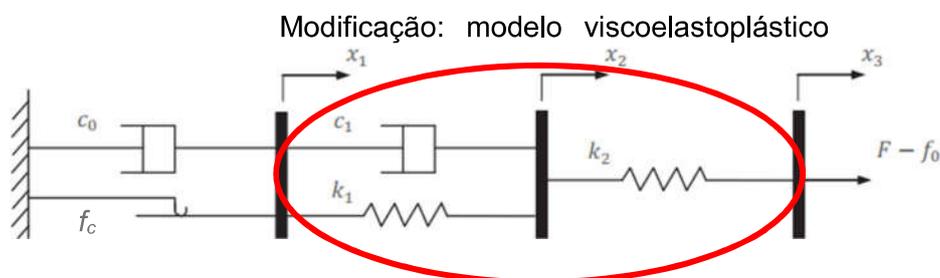


Figura 4.6 - Modelo de Bingham estendido (Adapatado de DYKE, 1996).

O modelo matemático que descreve esse comportamento é dado pela Eq.(4.6) e pela Eq.(4.7).

$$\begin{cases} F = k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \\ F = c_0\dot{x}_1 + f_c \text{sign}(\dot{x}_1) + f_0 \\ F = k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{cases}, |F| > f_c \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} F = k_1(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_2 + f_0 \\ F = k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{cases}, |F| \leq f_c \quad (4.7)$$

em que  $F$  é a força exercida pelo atuador,  $c_0$  é o coeficiente de amortecimento associado ao modelo de Bingham,  $k_1$  e  $k_2$  são os coeficientes de rigidez elástica,  $c_1$  é o coeficiente de amortecimento viscoso,  $f_0$  é a força presente no acumulador,  $f_c$  é a força de atrito de Coulomb,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  são deslocamentos e  $\dot{x}_1$ ,  $\dot{x}_2$  e  $\dot{x}_3$  são velocidades. Nesse caso,  $x_3$  e  $\dot{x}_3$  são, respectivamente, o deslocamento e velocidade da haste do atuador com fluido MR.

A proposta de modificação elaborada por Gamota e Filisko (1991) contribuiu para aproximar as respostas do modelo e do atuador com fluido MR, mas ainda assim traz consigo uma desvantagem importante, qual seja seu comportamento em baixas velocidades. Por outro

lado, podem ser apresentadas duas vantagens dessa modificação em relação ao modelo inicial de Bingham:

1. A diminuição do coeficiente de amortecimento  $c_1$  pode produzir um comportamento semelhante ao observado nos experimentos (curva força versus velocidade) quando a velocidade se aproxima de zero. Porém, são necessários passos de tempo muito pequenos para simular corretamente o sistema (DYKE, 1996; PASCHOAL, 2011);
2. Os resultados desse modelo conseguem melhorar a resposta em relação à atuação real do amortecedor.

Contudo, as desvantagens que ainda persistem tornam necessária a busca por um modelo mais completo. Mesmo com as modificações, o modelo não consegue responder de forma adequada ao comportamento do atuador para baixas velocidades do atuador (PASCHOAL, 2011). Observa-se nesses pontos uma influência maior do comportamento não linear do amortecedor. Além disso, há uma grande dificuldade de simular numericamente esse modelo. Este exige um passo de integração da ordem de  $10^{-6}$  segundos, podendo levar instabilidade do procedimento gerada por erro numérico (DYKE, 1996).

#### 4.3. Modelo de Bouc-Wen

O modelo de Bouc-Wen (WEN, 1976) é capaz de responder satisfatoriamente ao comportamento de histerese. Trata-se de um modelo cujo tratamento numérico é simples e direto, sendo, conseqüentemente, mais fácil de ser implementado (DYKE, 1996; PASCHOAL, 2011). A Figura 4.6 ilustra como se apresenta a arquitetura do modelo físico proposto.

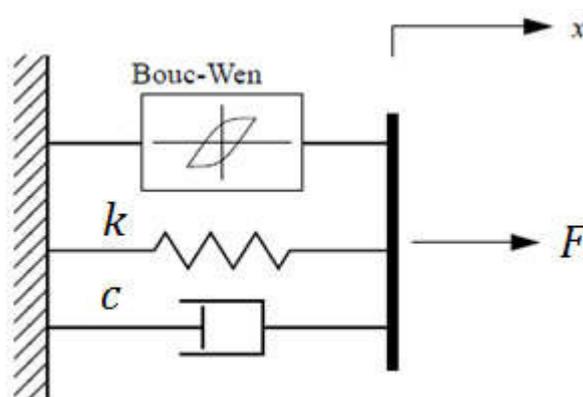


Figura 4.7 - Modelo físico de Bouc-Wen (Adaptado de DYKE, 1996).

Neste modelo,  $F$  é a força do atuador,  $c$  a constante de amortecimento viscoso,  $k$  a constante de rigidez,  $x$  o deslocamento aplicado e, finalmente, o elemento denominado como Bouc-Wen representa a componente do modelo que busca responder adequadamente ao comportamento de histerese do atuador com fluido MR.

A formulação matemática que descreve o modelo de Bouc-Wen é descrita pela Eq.(4.8) e pela Eq.(4.9).

$$F = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (4.8)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + \delta\dot{x} \quad (4.9)$$

em que  $F$  é a força,  $f_0$  é a força no acumulador,  $c$  é o coeficiente de amortecimento viscoso,  $k$  é a constante de rigidez,  $\dot{x}$  é a velocidade da haste,  $x$  é o deslocamento,  $\alpha$  é o fator de escala,  $z$  é a variável histerética ou evolutiva e  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  e  $n$  são parâmetros do modelo a serem identificados (DYKE, 1996).

#### 4.4. Modelo de Bouc-Wen Modificado

O modelo de Bouc-Wen foi modificado de duas formas diferentes. A primeira, que será apresentada nesta seção, foi proposta conforme Truong e Ahn (2012) e Liem; Truong; Ahn (2015), adotando todos os parâmetros como sendo uma função de primeiro grau em relação à corrente elétrica. A segunda, que será apresentada na seção 4.5, é aqui denominada como Modelo Fenomenológico.

Truong e Ahn (2012) e Liem; Truong; Ahn (2015) desenvolveram o modelo de Bouc-Wen sem a modificação. Neste trabalho, a ideia utilizada por eles foi estendida, acrescentando mais dois elementos mecânicos, conforme Dyke (1996). Assim, adicionou-se ao modelo de Bouc-Wen original um amortecimento viscoso em série  $c_1$  e uma rigidez em paralelo  $k_1$ , conforme ilustra a Fig.4.8.

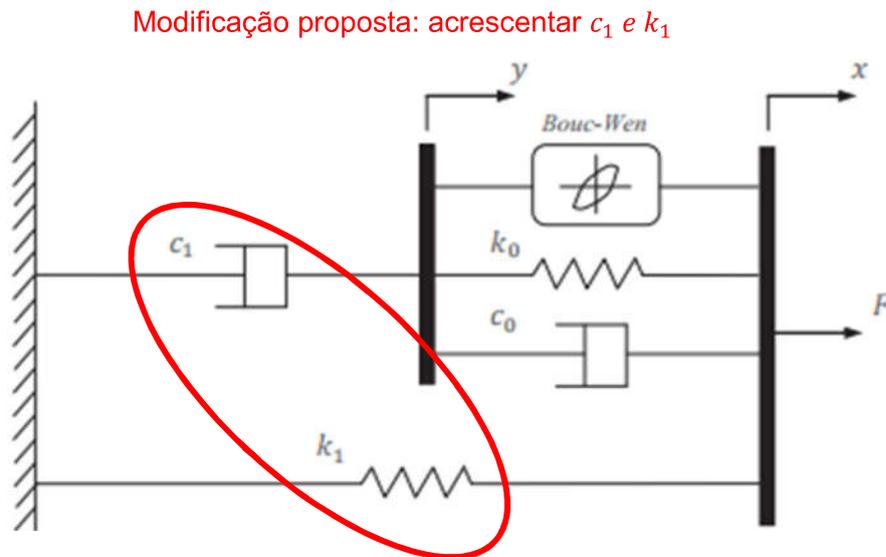


Figura 4.8 - Modelo físico de Bouc-Wen modificado (Adaptado de DYKE, 1996).

O acréscimo proposto tenta fazer com que o modelo de Bouc-Wen possua melhores respostas dinâmicas, principalmente nas regiões de baixas velocidades. É nessas regiões onde se observam de forma mais acentuada os fenômenos não lineares.

O modelo matemático que descreve o comportamento físico apresentado na Fig. 4.8 é dado pelas Eqs. (4.10), (4.11) e (4.12).

$$\mathbf{F} = c_1 \mathbf{y} + k_1 (\mathbf{x} - \mathbf{x}_\theta) \quad (4.10)$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha \mathbf{z} + c_0 \dot{\mathbf{x}} + k_0 (\mathbf{x} - \mathbf{y})] \quad (4.11)$$

$$\dot{\mathbf{z}} = -\lambda |\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{y}}| \mathbf{z} |\mathbf{z}|^{n-1} - \gamma (\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{y}}) |\mathbf{z}|^n + \beta (\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{y}}) \quad (4.12)$$

Neste trabalho, estes parâmetros, assim como as demais constantes, foram identificados de forma semiempírica usando uma técnica para solução de um problema inverso baseada em otimização, que será detalhada a seguir. Assim, os parâmetros foram ajustados em relação aos ensaios experimentais. Para isso, tomou-se por hipótese que todos os parâmetros envolvidos no modelo são função de primeiro grau da corrente elétrica aplicada nos terminais elétricos do atuador, conforme Truong e Ahn (2012) e Liem; Truong; Ahn (2015).

A Figura 4.9 mostra o resultado do modelo Bouc-Wen modificado com os parâmetros otimizados em relação aos resultados do ensaio experimental para uma configuração de deslocamento senoidal aplicado na haste do atuador com fluido MR, com 3 mm pico a pico (pp), frequência de 10 Hz e corrente aplicada de 1,0 A.

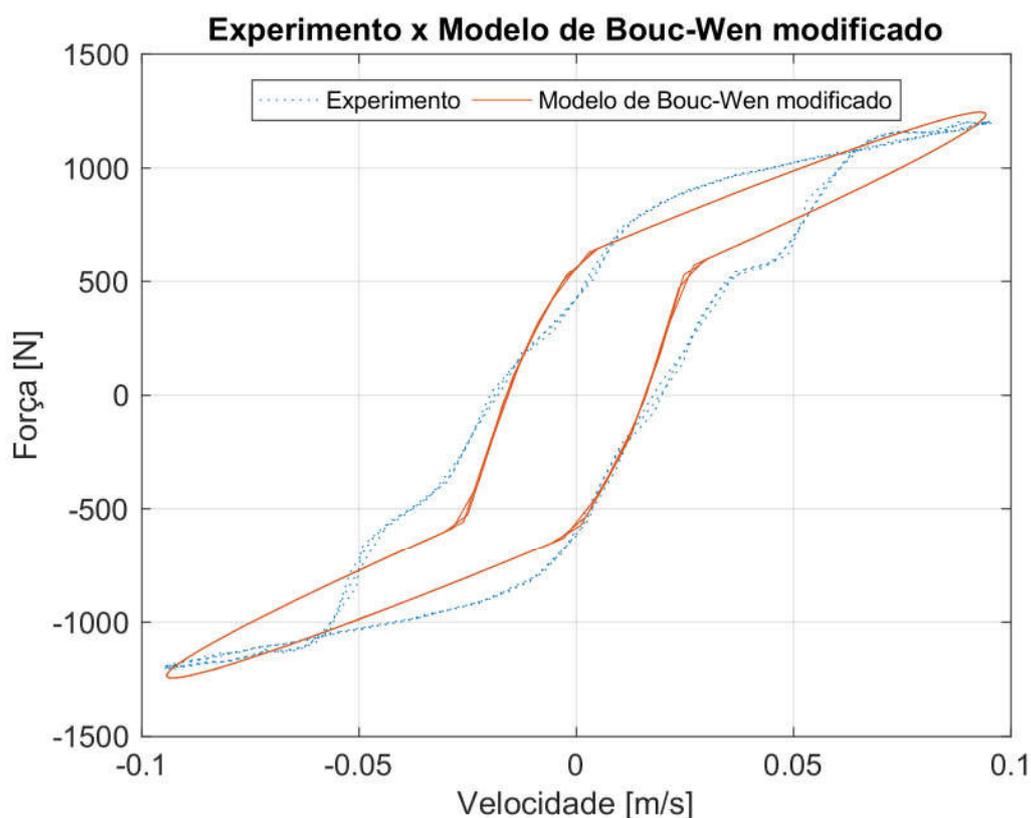


Figura 4.9 - Comportamento da força x velocidade (Bouc-Wen modificado x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

Assim como na otimização do modelo de Bingham, para a otimização deste modelo foi considerada a função objetivo descrita pela Eq. (4.3) e o algoritmo de otimização Evolução de Diferencial (STORN; PRICE, 1995). Foram adotados arbitrariamente, como parâmetros do otimizador, uma população inicial de 200 indivíduos e 250 gerações. Com estas configurações, o tempo de processamento computacional foi de 1h4min. O tempo de processamento foi bem maior que o ajuste do modelo de Bingham pela maior complexidade do modelo de Bouc-Wen modificado, além de se adotar mais indivíduos na população inicial e por escolher um número maior de iterações. A Figura 4.10 ilustra a convergência verificada, minimizando o erro relativo, segundo o modelo de Bouc-Wen modificado.

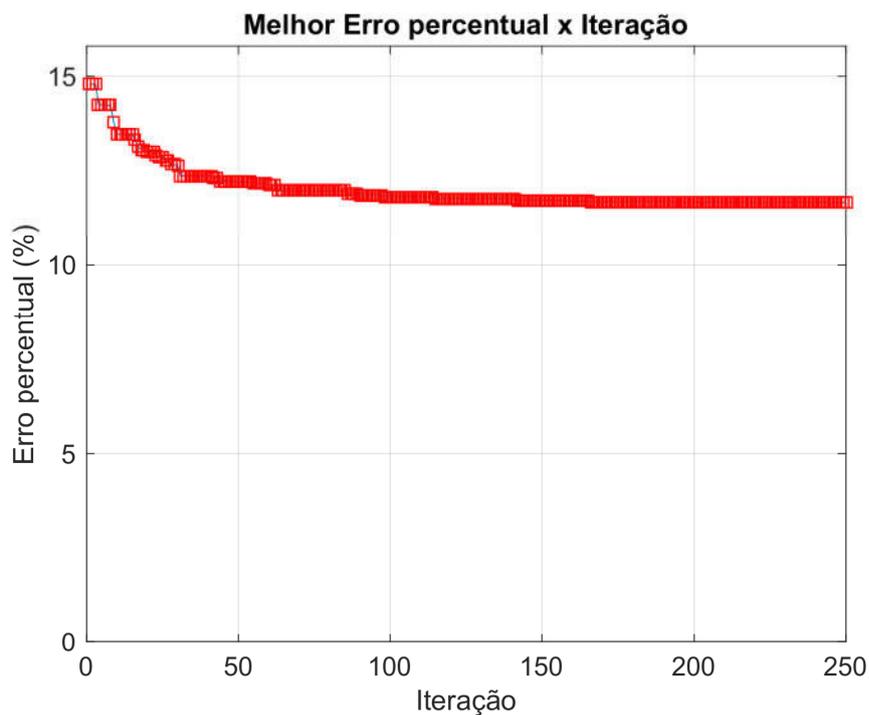


Figura 4.10 – Convergência da otimização do modelo de Bouc-Wen modificado.

A seguir, a Eq.(4.13) apresenta os parâmetros que foram levados em consideração durante o processo de otimização, bem como os valores finais obtidos.

$$\begin{array}{ll}
 c_0 = 5230 \cdot i + 2863 & \gamma = 203670 \cdot i + 300122 \\
 k_0 = 7000 \cdot i + 39789 & \delta = 0,0 \cdot i + 30000 \\
 \alpha = 549 \cdot i + 7,8 & \beta = -899247 \cdot i + 500000 \\
 f_0 = 2500 \cdot i + 100 & c_1 = 782296 \\
 n = 4,0 \cdot i + 5,0 & k_1 = 39101
 \end{array} \quad (4.13)$$

Todos os parâmetros apresentados na Eq. (4.13) estão representados no Sistema Internacional de Unidades (SI).

A seguir, a Fig. 4.11 evidencia como varia a força no domínio do tempo.

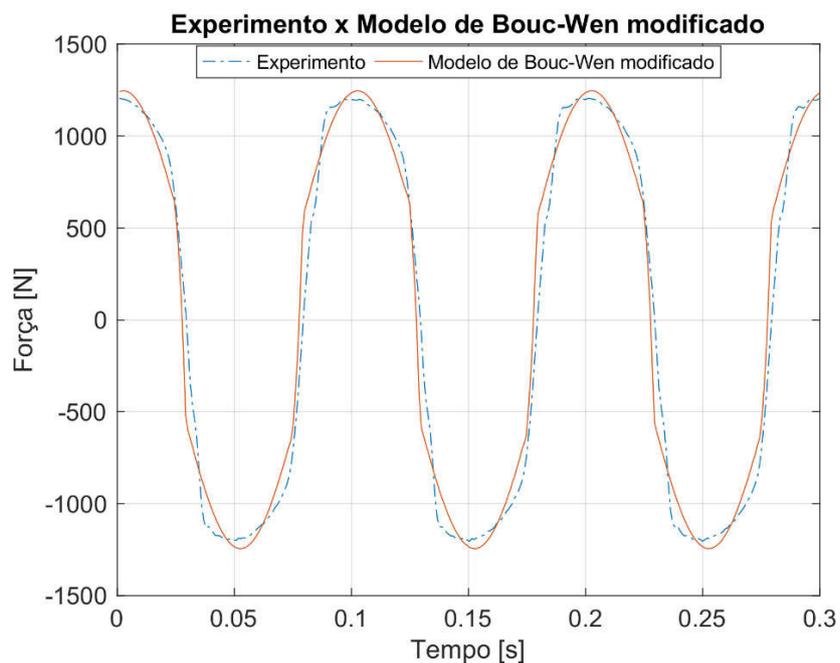


Figura 4.11 - Comportamento da força x tempo (Bouc-Wen modificado x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

Já a Figura 4.12 ilustra a variação da força com o deslocamento aplicado na haste do atuador.

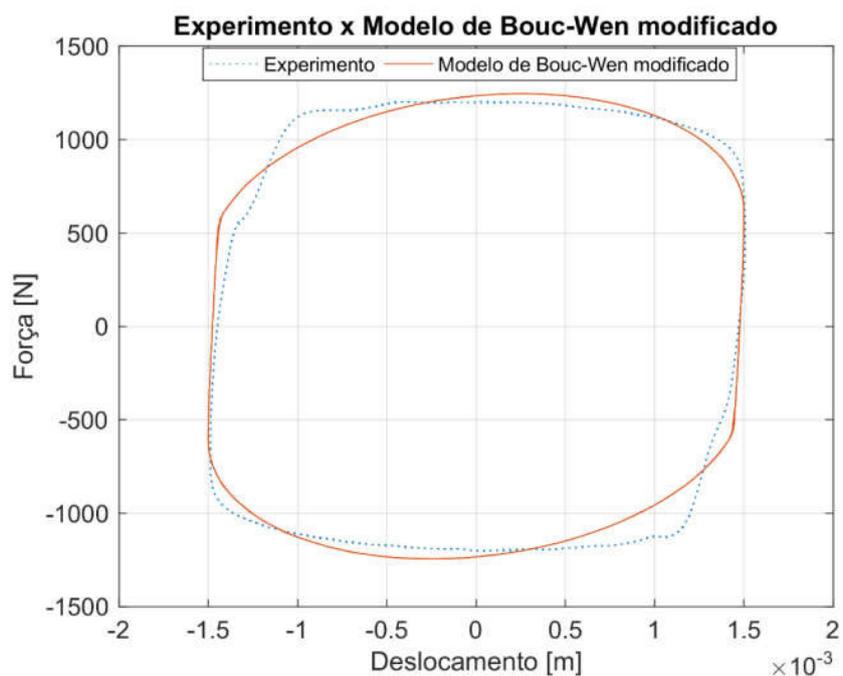


Figura 4.12 - Comportamento da força x deslocamento (Bouc-Wen modificado x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

É possível observar que o modelo de Bouc-Wen modificado é capaz de representar de maneira satisfatória tanto a histerese como o comportamento não linear do atuador com fluido MR. Além disso, as Figs. (4.10), (4.11) e (4.12) mostram que a resposta do modelo matemático de Bouc-Wen modificado apresentou resultado melhor em relação ao modelo inicial de Bingham. Contudo, este modelo ainda não consegue responder de forma completamente aceitável o comportamento do atuador com fluido MR. Para a situação mostrada nas Figs. (4.10), (4.11) e (4.12), encontrou-se um erro de 11,67%, calculado conforme a Eq.(4.3).

#### 4.5. Modelo Fenomenológico

Paschoal (2011) e Cavalini Jr *et al.* (2015) utilizaram o modelo fenomenológico por se tratar de um modelo matemático paramétrico que responde bem ao comportamento de histerese, além de ser melhor comportado numericamente. Esse modelo também é uma modificação do modelo inicial de Bouc-Wen. Entretanto, o entendimento de como a voltagem/corrente elétrica é associada aos parâmetros do modelo é diferente aqui.

Na modificação proposta na seção 4.4 deste trabalho, todos os parâmetros do modelo foram representados como funções de primeiro grau da corrente elétrica aplicada. Nesta seção, será apresentado um modelo fenomenológico (SPENCER JR *et al.*, 1996), onde apenas o fator de escala  $\alpha$  e as constantes de amortecimento viscoso  $c_0$  e  $c_1$  variam com a tensão elétrica aplicada, de acordo com um filtro de primeira ordem, como mostram as Eqs. (4.14), (4.15), (4.16) e (4.17).

$$\alpha(\mathbf{u}) = \alpha_a + \alpha_b \mathbf{u} \quad (4.14)$$

$$c_0(\mathbf{u}) = c_{0a} + c_{0b} \mathbf{u} \quad (4.15)$$

$$c_1(\mathbf{u}) = c_{1a} + c_{1b} \mathbf{u} \quad (4.16)$$

$$\dot{\mathbf{u}} = -\eta(\mathbf{u} - \nu) \quad (4.17)$$

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $c_0$  e  $c_1$  são modelados como funções de primeiro grau da variável  $\mathbf{u}$ . Esta variável é resultante de um filtro de primeira ordem (Eq.4.17), que representa o atraso

da corrente elétrica presente no circuito elétrico em relação à tensão de entrada  $v$  (PASCHOAL, 2011).

O modelo físico usado para caracterizar o modelo fenomenológico é o mesmo apresentado na Fig. 4.7. Ao acrescentar a constante de amortecimento viscoso  $c_1$  e a constante de rigidez da mola  $k_1$ , o modelo se torna mais adequado para descrever o comportamento de dispositivos que apresentam rápida redução da força, justamente quando a velocidade do pistão passa pelo zero (PASCHOAL, 2011).

As equações matemáticas que representam o comportamento dinâmico do modelo fenomenológico são as mesmas apresentadas pelas Eqs. (4.10), (4.11) e (4.12). A seguir, será apresentado o modelo matemático paramétrico que mais se aproximou dos resultados experimentais apresentados no Capítulo III deste trabalho, sendo, portanto, objeto de nossa maior consideração.

#### 4.6. Modelo Histerético

Kwok *et al.* (2006) propuseram um modelo paramétrico simples que não requer muito tempo computacional. Em seu trabalho, eles desenvolveram o modelo e calibraram os parâmetros para prever a força gerada pelo atuador com fluido MR modelo RD-1005-3 da LORD Corporation®. Para encontrar os parâmetros ótimos, foi utilizada uma técnica de otimização por enxame de partículas.

No presente trabalho, o atuador utilizado foi o RD-8040-1, também da fabricante LORD Corporation®. Com isso, ensaios foram feitos para diversas configurações e o modelo foi ajustado com o objetivo de reduzir o erro percentual entre a curva real e aquela proveniente do modelo proposto. Contudo, ao invés de usar a técnica do enxame de partículas, neste trabalho optou-se por utilizar o algoritmo de Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995).

O modelo proposto por Kwok *et al.* (2006) objetivou modelar o comportamento histerético da relação força *versus* velocidade para o atuador com fluido MR. A Figura 4.13 apresenta o modelo físico histerético proposto.

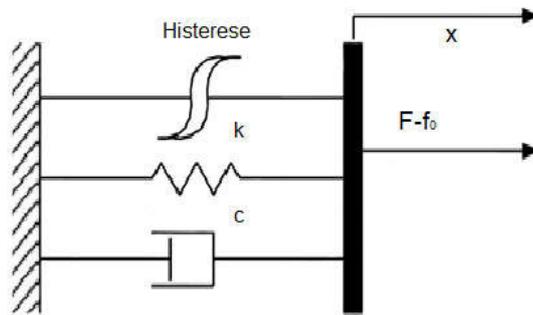


Figura 4.13 - Modelo físico histerético (TRUONG; AHN, 2012).

As equações do movimento que respondem a esse modelo são dadas pelas Eqs.(4.18) e (4.19).

$$F = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (4.18)$$

$$z = \tanh(\beta\dot{x} + \delta \text{sign}(x)) \quad (4.19)$$

A Figura 4.14 ilustra o modelo histerético implementado no ambiente Simulink®, por meio do qual foi feita a otimização do modelo.

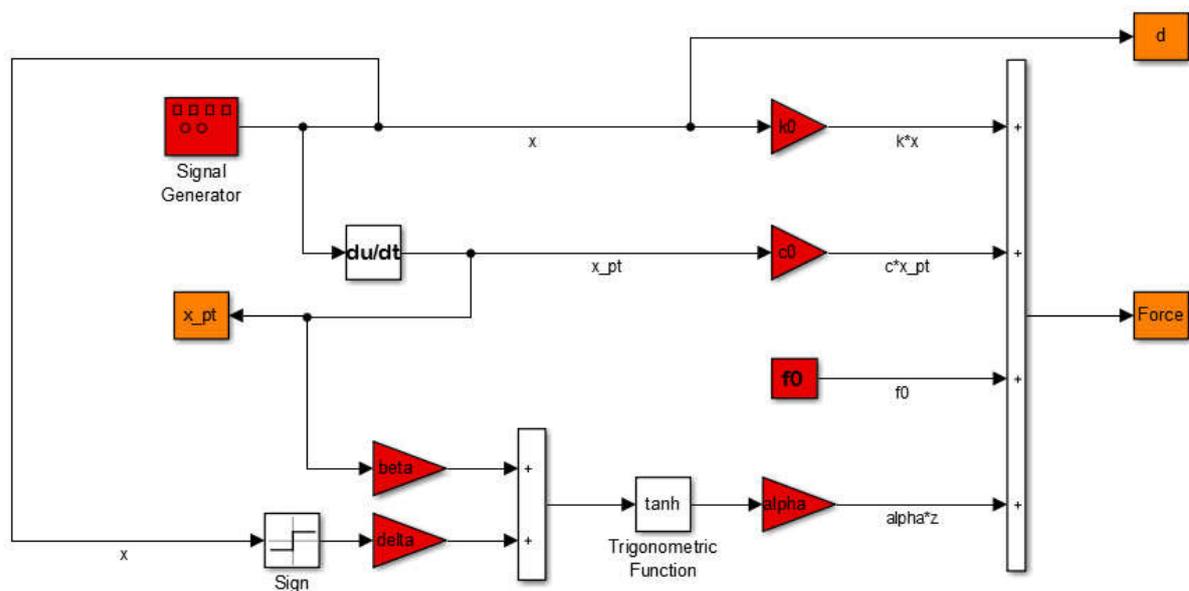


Figura 4.14 - Esquema do modelo histerético no Simulink®.

Na Figura 4.14 os blocos em vermelho indicam os parâmetros de entrada. Exceto o bloco “*Signal Generator*”, todos os outros blocos, em vermelho, tiveram seus parâmetros ajustados. Os blocos em laranja são as saídas do modelo ( $Force = F$ ,  $x_{pt} = \dot{x}$  e  $d = x$ ).

Para o ajuste dos parâmetros, utilizou-se da técnica de otimização Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995), com uma população inicial de 240 indivíduos (foi escolhida arbitrariamente como sendo 20 vezes a quantidade de variáveis de projeto) e um número máximo de 40 gerações. A função objetivo avaliada foi a mesma utilizada nos outros modelos (Eq.(4.2)). Devido à simplicidade do modelo, o resultado da otimização levou 6 min. O resultado da convergência do modelo pode ser observado através da Fig. 4.15.

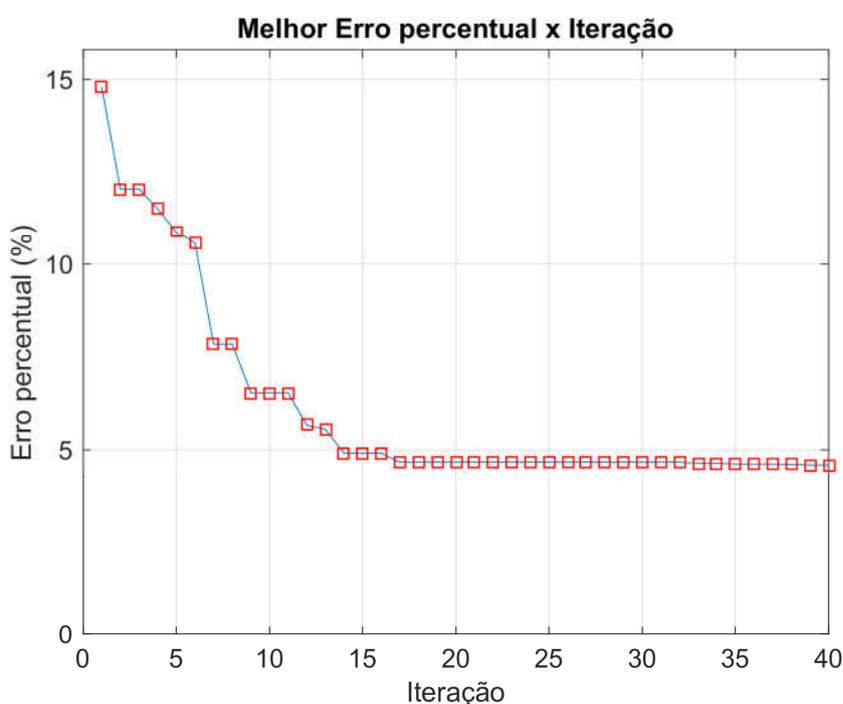


Figura 4.15 – Convergência observada na otimização do modelo histerético.

Kwok *et al.* (2006) também relacionaram os parâmetros do modelo utilizado com o comportamento de histerese do atuador com fluido MR real. Eles perceberam que a viscosidade, representada pelo produto  $c\dot{x}$ , é responsável pela inclinação da curva força *versus* velocidade quando em altas velocidades, como mostra a Fig. 4.16, feita através de dados reais obtidos em relação aos ensaios realizados com o atuador utilizado neste trabalho e variando os parâmetros em torno dos valores ajustados. A rigidez  $k$  é responsável pelo

espaçamento vertical da curva de histerese. Valores elevados de  $k$  indicam o aumento do espaçamento interno da curva, tanto em baixas quanto em altas velocidades.

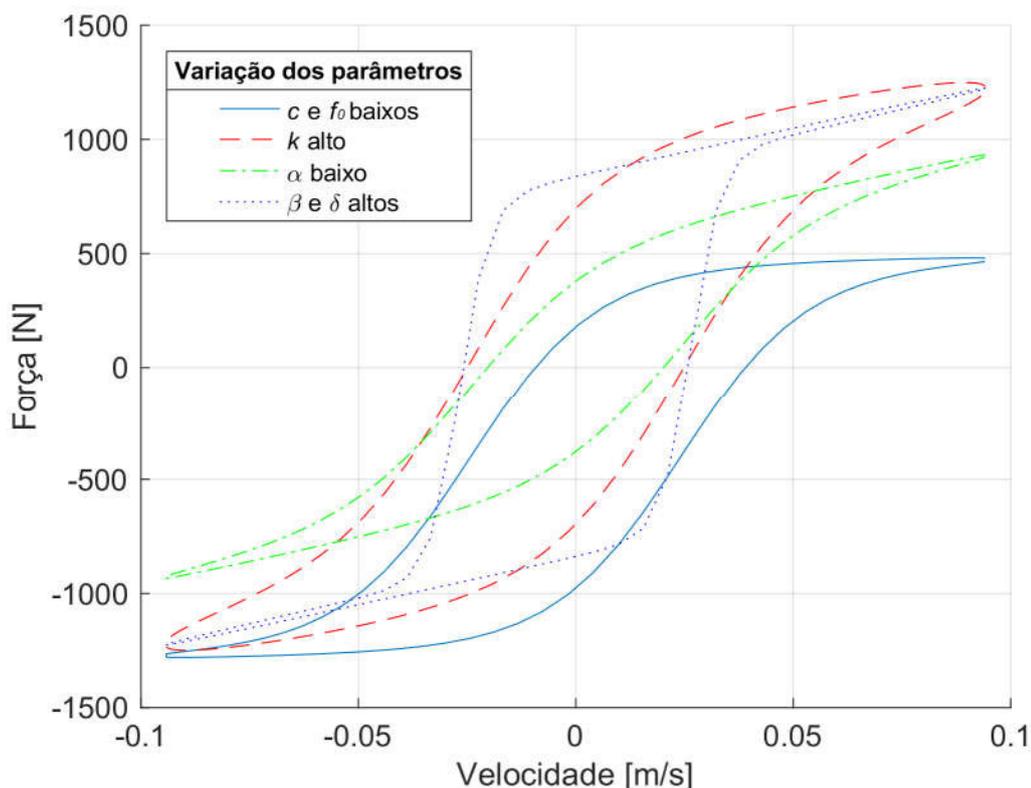


Figura 4.16 - Variação dos parâmetros do Modelo histerético.

O comportamento de histerese apresentado na Fig. 4.16 é determinado pelo parâmetro  $\beta$ . Um valor grande de  $\beta$  acarreta maior declividade da curva força *versus* velocidade nas baixas velocidades. Quanto ao parâmetro  $\delta$ , ele é o responsável pela largura da curva histerese, enquanto o fator de escala  $\alpha$  determina a altura desta curva.

A Figura 4.16 mostra a influência de cada um dos parâmetros e sua importância no modelo para se chegar a respostas mais representativas do atuador com fluido MR real. Nessa questão, o ajuste (por meio de técnicas de otimização) desses parâmetros busca encontrar uma situação ótima dessas características, buscando representar de forma fidedigna a situação real de operação. A seguir, as Figs. (4.17), (4.18) e (4.19) ilustram o modelo ajustado, usando Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995), comparando com dados reais.

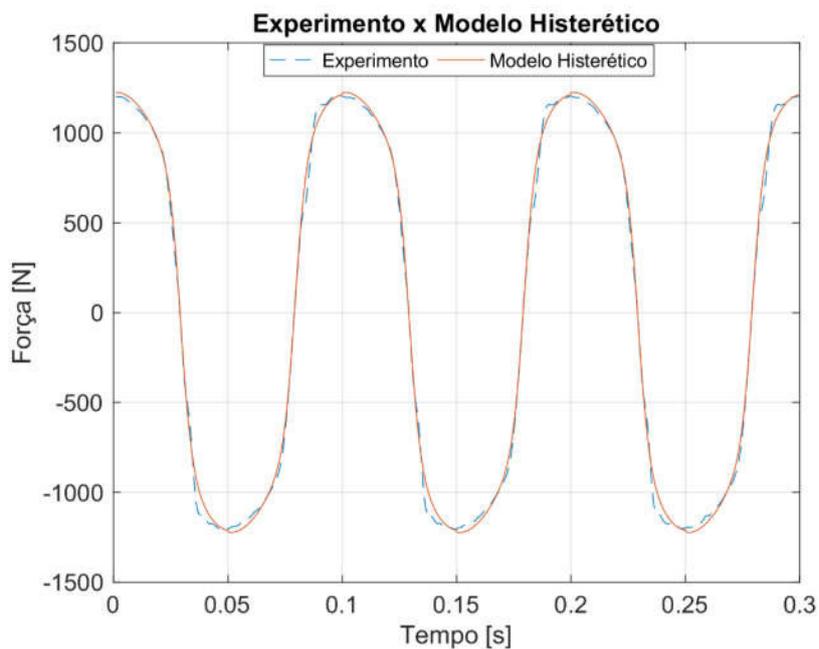


Figura 4.17 - Comportamento da força x tempo (modelo histerético x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

A otimização do modelo histerético resultou em um erro percentual de 4,59% , baseado na norma entre as curvas, conforme Eq.(4.3).

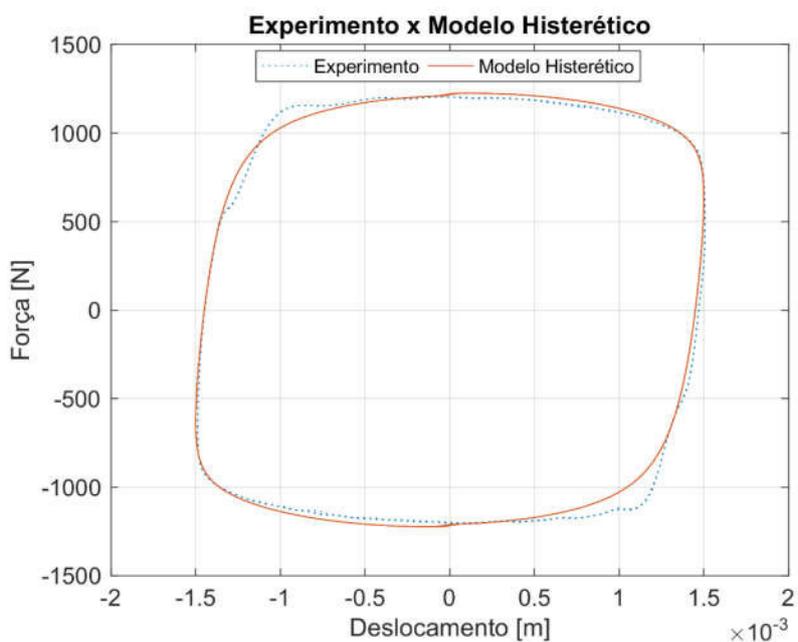


Figura 4.18 - Comportamento da força x deslocamento (modelo histerético x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

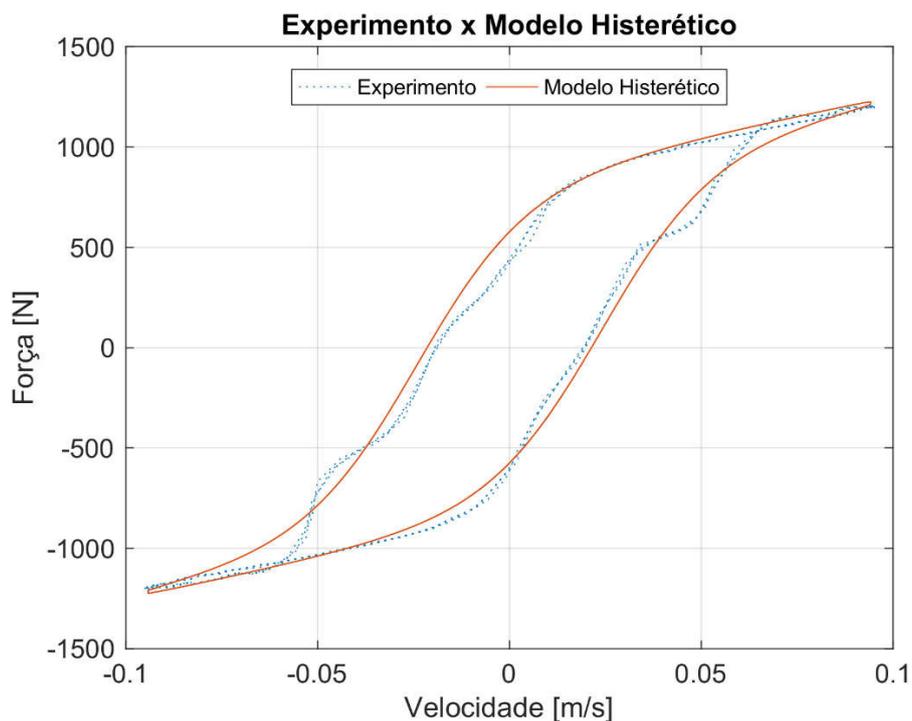


Figura 4.19 - Comportamento da força x velocidade (modelo histerético x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

Como pode ser observado nas Figs. (4.17), (4.18) e (4.19), o modelo histerético ajustado aproxima-se bastante dos resultados experimentais, levando a um pequeno erro percentual. Mesmo sendo considerado um modelo bastante representativo, ainda há regiões em que as respostas se diferenciam. Isso é inerente a modelos matemáticos paramétricos que não permitem, por restrição da própria equação que governa o modelo, que as duas curvas tenham erro percentual ainda menor que o obtido.

Em Kwok *et al.* (2006), cada parâmetro foi modelado de acordo com a média dos resultados experimentais para cada parâmetro da equação. Fazendo o ajuste dos pontos encontrados, notou-se que os parâmetros  $c$ ,  $k$ ,  $f_0$  e  $\delta$  são funções de primeiro grau,  $\beta$  é uma constante e  $\alpha$  uma função de segundo grau, todas em relação à corrente elétrica aplicada nos terminais elétricos do atuador para um dado ensaio. Kwok *et al.* (2006) utilizaram o otimizador baseado no método do enxame de partículas e o atuador RD-1005-3 para encontrar os parâmetros ótimos do modelo histerético. No presente trabalho foi usado o algoritmo de Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995) e o atuador RD-8040-1. O resultado desta otimização, baseado em uma configuração de deslocamento senoidal aplicado com

amplitude da haste de 3 mm pico a pico (pp), frequência de 10 Hz e corrente aplicada de 1,0 A está mostrado na Eq.(4.20).

$$\begin{aligned}
 c &= 2,58 \cdot 10^3 \cdot i + 1,69 \cdot 10^3 & [Ns / m] \\
 k &= 8,94 \cdot 10^2 & [N / m] \\
 \alpha &= 1,81 \cdot 10^2 \cdot i^2 + 5,50 \cdot 10^2 \cdot i + 90,8 & [N] \\
 f_0 &= -31,3 & [N] \\
 \beta &= 34,7 & [m / s]^{-1} \\
 \delta &= 0,272 \cdot i + 0,564 & [1]
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Durante o processo de otimização, o coeficiente que multiplica a corrente, na equação de “ $k$ ”, mostrou que tal coeficiente não influencia os parâmetros do modelo histerético. Portanto, o valor de  $k$  permaneceu independente da variação da corrente elétrica.

Como visto no Capítulo III, a força residual presente no acumulador devido à pré-carga adicionada ao atuador ( $f_0$ ) foi determinada fazendo a média aritmética dos *offsets* observados durante os ensaios, para a mesma frequência e mesma amplitude.

#### 4.7. Análise dos modelos

Este capítulo apresentou alguns dos principais modelos matemáticos paramétricos desenvolvidos. Iniciou-se, como referência, com o mais simples de implementação e modelagem (Modelo de Bingham). Por ser mais simples, este modelo não conseguiu responder ao comportamento não linear presente do atuador com fluido MR e, por isso, apresentou um erro percentual entre as curvas de 25,39%.

O modelo de Bingham estendido não foi otimizado, mas foi possível observar que o acréscimo do componente viscoelástico-plástico colocado em série contribui para aproximar os resultados numéricos dos experimentais. Contudo, ainda é insuficiente para ser usado para fins de projeto.

Já o modelo matemático de Bouc-Wen mostra uma melhora no comportamento de histerese, devido ao incremento da variável evolutiva  $z$ . A histerese passa agora a ser satisfatoriamente representada através do modelo de Wen (1976). Porém, ainda assim,

existem regiões em que o modelo não é capaz de responder adequadamente. Houve, portanto, a necessidade de busca de novos modelos.

Foi aí que surgiram algumas modificações propostas sobre a ideia inicial do modelo de Bouc-Wen. Na seção 4.5 foi apresentada uma modificação em que se acrescentou um elemento de amortecimento em série com o modelo físico inicial, além de um elemento de rigidez em paralelo. Além disso, todos os parâmetros foram modelados como função do primeiro grau, facilitando a implementação numérica. Nota-se uma resposta melhor desse modelo (erro de 11,67%) em relação ao de Bingham (erro de 25,39%). Ainda assim, ficou evidente a necessidade de encontrar uma resposta ainda melhor, principalmente nas baixas velocidades e, também, quanto à mudança de sentido do deslocamento.

Na seção 4.6 foi apresentado um modelo fenomenológico, o qual mantém o mesmo modelo físico da modificação anterior. Contudo, ao invés de modelar todos os parâmetros como funções de primeiro grau em relação à corrente, optou-se pelo conceito do filtro de primeira ordem para representar o atraso da corrente no circuito em relação à tensão elétrica.

E, por fim, estudou-se o modelo histerético, que consegue apresentar os melhores resultados para os parâmetros otimizados, resultando um erro percentual de apenas 4,59 %.

A seguir, buscando sintetizar os resultados obtidos, a Fig.4.20 ilustra o erro percentual de cada modelo em relação aos dados experimentais obtidos para a configuração apresentada no capítulo III.

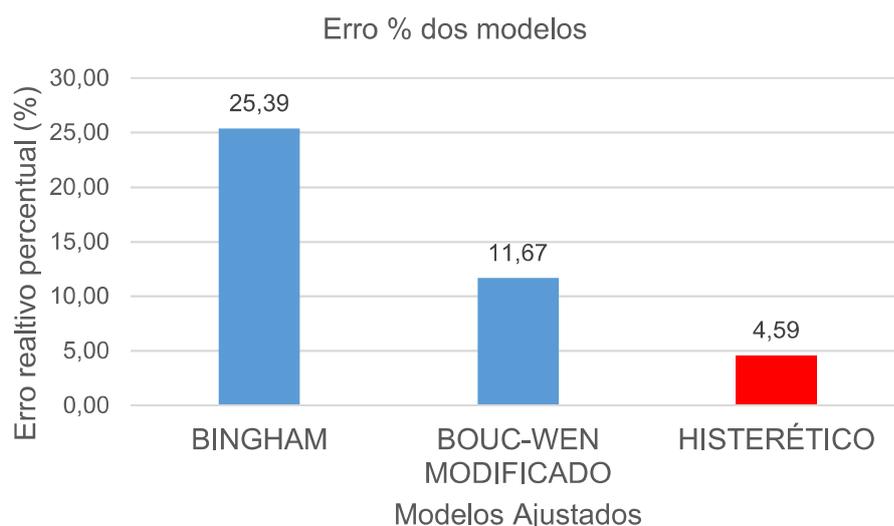


Figura 4.20 - Apresentação comparativa dos erros entre modelos paramétricos.

Dessa forma, conclui-se que o modelo matemático paramétrico que melhor representa o comportamento real do atuador com fluido magneto reológico é mesmo o Modelo histerético.

# CAPÍTULO V

## MODELO NÃO PARAMÉTRICO DE UM ATUADOR COM FLUIDO MAGNETO REOLÓGICO

Schurter e Roschke (2000) defendem que a escolha pelo uso do modelamento *fuzzy* como alternativa de modelar o comportamento de um atuador com fluido magneto reológico deve ser ponderada entre um modelamento com maior precisão e um modelamento com menor custo computacional. Nesse sentido, foi proposto em seu trabalho o uso das duas abordagens para se chegar a um modelo numérico que seja o mais próximo possível do comportamento real, ou seja, com maior precisão; e também atender ao objetivo de ser um modelo de fácil implementação e baixo custo computacional.

Truong e Ahn (2012) e Liem; Truong; Ahn (2015) mostram um modelamento *fuzzy* cujos resultados demonstram grande precisão em relação aos dados experimentais. Neste trabalho, em relação aos modelos matemáticos paramétricos, a precisão não foi tão boa, exceto no caso do modelo histerético, apresentado na seção 4.6.

Ahn; Truong; Islam (2009) enfatizam que o método não paramétrico, baseado em técnicas inteligentes, é efetivo para caracterizar o comportamento do atuador com alta precisão. Contudo, o custo computacional para se otimizar os parâmetros *fuzzy* mostra-se mais elevado, tendo em vista a quantidade de variáveis a serem otimizadas e a grande influência das não linearidades presentes no sistema dinâmico.

Em relação ao custo computacional, a otimização do modelo *fuzzy* desenvolvido nesta dissertação apresenta um alto custo, sem a convergência esperada. Já a otimização dos

modelos paramétricos teve um custo computacional baixo, com rápida convergência, levando à configuração ótima em menos de dez minutos nos casos estudados.

### 5.1. Modelo *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* tem a ver com o gerenciamento de afirmações que podem ser verdadeiras e falsas, porém dentro de uma graduação entre o conceito de completamente verdadeiro e completamente falso. Assim, basicamente, um evento poderia acontecer ou não acontecer. Mas Zadeh (1965) introduziu o conceito de lógica *fuzzy*, agregando mais possibilidades a essa nova lógica.

Desta forma, a lógica *fuzzy*, criada e desenvolvida por Zadeh, consegue imitar a forma de pensamento complexo dos seres humanos, que são capazes de pensar de maneira “aproximada” (AHN; TRUONG; ISLAM, 2009). Os seres humanos não pensam apenas de forma binária, ou seja, não tomam decisão apenas se as informações são completamente verdadeiras ou completamente falsas. Eles conseguem analisar o grau de veracidade de uma pertinência. Um exemplo disso é quando se pergunta a alguém se ele (a) acha que vai chover ou não. A pessoa, ao olhar para o céu, pode tomar a decisão de falar com certeza que vai chover (100% de chance de que vai chover) ou achar com certeza que não vai chover (0% de chance de não chover). Porém, ao observar uma formação de nuvens “pesadas” no céu, a pessoa pode tomar a decisão de falar que há, por exemplo, 80% de chance de chover; ou observar um céu “limpo”, sem formação de muitas nuvens, e dizer que há, por exemplo, 20% de chance de chover, dependendo de como as condições climáticas prévias se encontram naquele momento. Nesse caso, a lógica aproximada do ser humano leva a diferentes níveis de informação sobre determinado assunto, o que pode levar a uma compreensão mais abrangente do fenômeno em questão.

Pela facilidade de compreensão e implementação da lógica *fuzzy*, esta tem sido escolhida por diversos pesquisadores para modelar diferentes sistemas dinâmicos. Contudo, esse não é propriamente um método sistemático para projetar e analisar a quantidade de regras *fuzzy*, a forma de particionar as variáveis de entrada e as funções de pertinência. Para cada sistema dinâmico diferente é necessário avaliar novamente as regras *fuzzy* e a quantidade adequada destas regras, o intervalo de variação das variáveis de projeto, além de identificar a quantidade e o tipo de função de pertinência mais adequados para o projeto (AHN; TRUONG; ISLAM, 2009). É justamente essa questão que leva a um custo computacional elevado ao se considerar o modelo *fuzzy*.

O modelamento *fuzzy* feito neste trabalho seguiu a lógica do sistema de inferência *fuzzy* baseado em regras, conforme ilustra a Fig. 5.1, onde é possível observar de forma simplificada como esse sistema funciona.

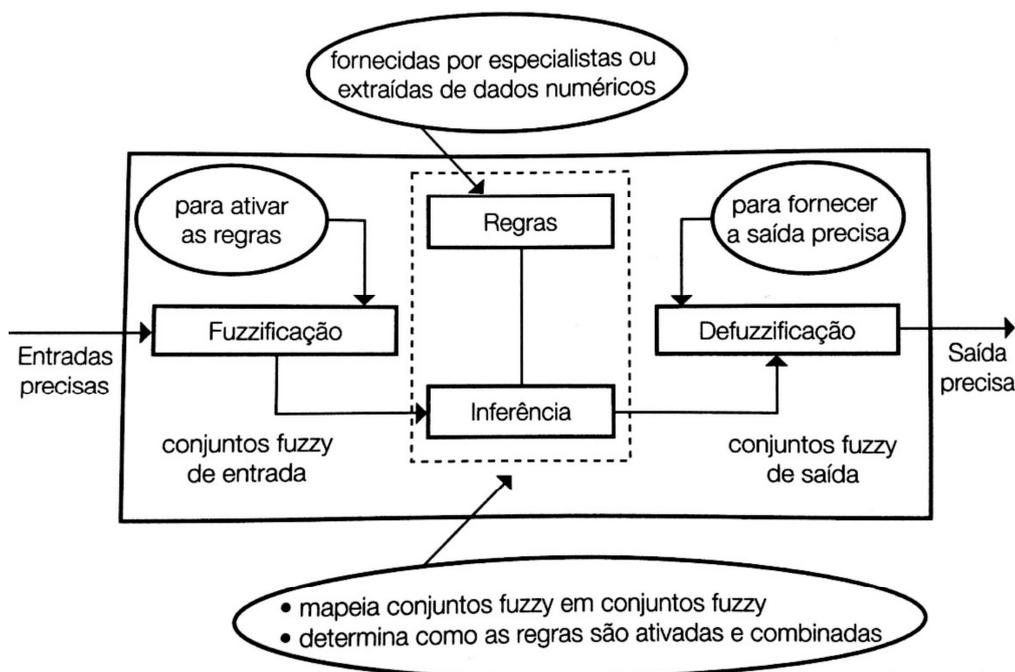


Figura 5.1 - Fluxograma simplificado do sistema *fuzzy* baseado em regras (OLIVEIRA JR *et al.*, 2007).

Neste trabalho, as variáveis de entrada (corrente elétrica, deslocamento e velocidade) passam inicialmente pelo processo de fuzzificação, que significa agregar incerteza aos dados de entrada, relacionando-os com funções de pertinência, dentro do universo da lógica *fuzzy*.

Essas funções de pertinência são números *fuzzy*, ou seja, conjuntos *fuzzy* normalizados. Estes números podem ser implementados de diferentes maneiras, dependendo do objetivo final do projeto. Pode-se representar essas funções de pertinência, por exemplo, como sendo Triangulares, Trapezoidais, Gaussianas, de Cauchy (ou Sino) e Sigmóide (OLIVEIRA JR *et al.*, 2007).

Neste trabalho, adotou-se para o modelo *Fuzzy* em questão as funções de pertinência do tipo Triangulares. Elas seguem o modelo matemático da Eq. (5.1).

$$f(x; a, b, c) \begin{cases} 0; & x < a \\ (x - a) / (b - a); & a \leq x < b \\ (c - x) / (c - b); & b \leq x < c \\ 0; & c \leq x \\ \text{Restrição:} & a < b < c \end{cases} \quad (5.1)$$

em que  $a$  pode ser compreendido como sendo o valor mais pessimista da função de pertinência,  $b$  seria o valor mais provável e  $c$  seria o valor mais otimista, representando assim as abscissas dos três vértices de um triângulo.

Pensando em uma abordagem com menos variáveis a serem determinadas, a função de pertinência triangular utilizada neste trabalho foi do tipo simétrica. Isto implica que a formulação considerou esses triângulos como sendo isósceles. Dessa forma, é preciso apenas identificar o valor mais provável,  $b$ , e o tamanho da base desse triângulo, denominado suporte, que seria a diferença entre o valor otimista,  $c$ , e o pessimista,  $a$ .

Em relação aos tipos de métodos existentes para se fazer inferências *fuzzy*, foram considerados o Mamdani e o Takagi-Sugeno. O tipo Mamdani é baseado nas funções de implicação *fuzzy* e em operadores de composição para a definição da saída *fuzzy*. Já o tipo Takagi-Sugeno dispensa a definição de funções de implicação e operadores para inferência (ANDRADE; JAQUES, 2008)

Ainda, segundo Andrade e Jaques (2008), a implementação de cada regra *fuzzy* do tipo Mamdani é feita mediante a definição de operadores para o processamento do antecedente da regra e da função de implicação que irá definir o seu consequente. A ação do sistema de inferência *fuzzy* é definida pela agregação de todas as regras, sendo que desta agregação resulta um consequente. Este consequente, após passar por um processo de defuzzificação, irá deixar de possuir um valor impreciso para fornecer uma saída precisa. O tipo Takagi-Sugeno é uma simplificação do tipo Mamdani, em que o consequente de cada regra é definido como uma função das variáveis linguísticas de entrada.

Dando continuidade ao modelo matemático do atuador, o diagrama de blocos apresentado na Fig. 5.2 explica melhor o caminho percorrido pelos sinais de entrada (deslocamento senoidal e corrente elétrica) para que, através da solução de um problema inverso de engenharia, se possa chegar à força estimada, tão próxima quanto possível da força real que atua sobre o sistema.

Na formulação proposta por Liem; Truong; Ahn (2015), a corrente aplicada é a variável de entrada do bloco denominado *Gain Fuzzy Inference*, que é responsável, no modelo, por dar as características relativas ao ganho da força do atuador, como a representação da saturação, observada nos resultados através da diminuição da diferença entre níveis de força consecutivos na medida em que se aumenta a corrente aplicada. De fato, com o aumento da corrente elétrica, maior o valor dos níveis de força observados no experimento e menores são as diferenças entre forças consecutivas, conforme a Fig. 3.10, evidenciando características não-lineares do atuador.

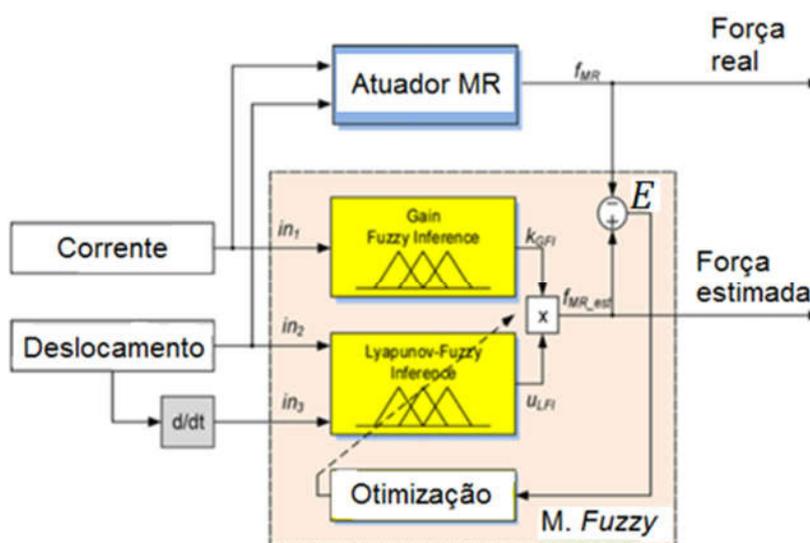


Figura 5.2 - Diagrama de blocos do modelo *Fuzzy* (Adaptado de LIEM; TRUONG; AHN, 2015).

O bloco denominado *Lyapunov-Fuzzy Inference* é responsável por receber as informações de entrada ( $in_2$  = deslocamento e  $in_3$  = velocidade) e dar forma à curva, juntamente com o uso do algoritmo Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995), que é responsável por determinar os melhores parâmetros das funções de pertinência, do fator de escala apropriado (necessário, já que a saída dos blocos *fuzzy* variam de zero a um, para o bloco *Gain*, e de menos um a um, para o bloco *Lyapunov*) e dos pesos das regras (LIEM; TRUONG; AHN, 2015). Na Figura 5.2, “*E*” representa a função erro relativo, que é a função objetivo para o otimizador, conforme mostrado pela Eq.(4.3). Em relação aos dois blocos mencionados (*Gain* e *Lyapunov*) foram implementados nos ambientes Simulink® e MATLAB®, assim como os modelos matemáticos paramétricos apresentados no capítulo IV.

Conforme Figura 5.2, a força estimada do modelo deve respeitar a Eq. (5.2).

$$f_{MR\_est} = k_{GFI} u_{LFI} \quad (5.2)$$

Como visto anteriormente, para se alcançar os valores de amplitude da força dos ensaios realizados, foi inserido um fator de escala multiplicativo na Eq. (5.2). Esse fator de escala também foi otimizado neste trabalho.

Para os dois blocos em destaque foi usado o método de Takagi-Sugeno para a inferência *fuzzy*. O método *and-or* e o método implicação e agregação utilizados são o *min-máx* e o método de defuzzificação escolhido é o da média ponderada.

#### 5.1.1. O bloco “Gain Fuzzy Inference”

Esse bloco possui uma entrada ( $in_1$  = corrente elétrica) e apenas uma saída,  $k_{GFI}$ . Ele é responsável por estabelecer o comportamento do nível da amplitude da força do atuador, mediante aumento da corrente elétrica. É através desse bloco que é possível evidenciar a influência da saturação da corrente aplicada na bobina. Isso é observado à medida que o nível de corrente elétrica aumenta. Para grandes níveis de corrente, nota-se uma diminuição da diferença entre valores de força máxima observados para níveis de corrente consecutivos. A entrada foi modelada no sistema de inferência *fuzzy* considerando cinco funções de pertinência triangulares, determinadas pelas variáveis linguísticas Z (Zero), VS (Muito Pequeno), S (Pequeno), M (Médio), B (Grande). Cada função de pertinência tem como parâmetro a posição da pertinência máxima e a largura da base do triângulo, supondo este como sendo isósceles. Já a saída,  $k_{GFI}$ , foi modelada por valores constantes (*singleton*) (LIEM; TRUONG; AHN, 2015). A Figura 5.3 ilustra como foram estabelecidas as considerações iniciais dessas funções de pertinência.

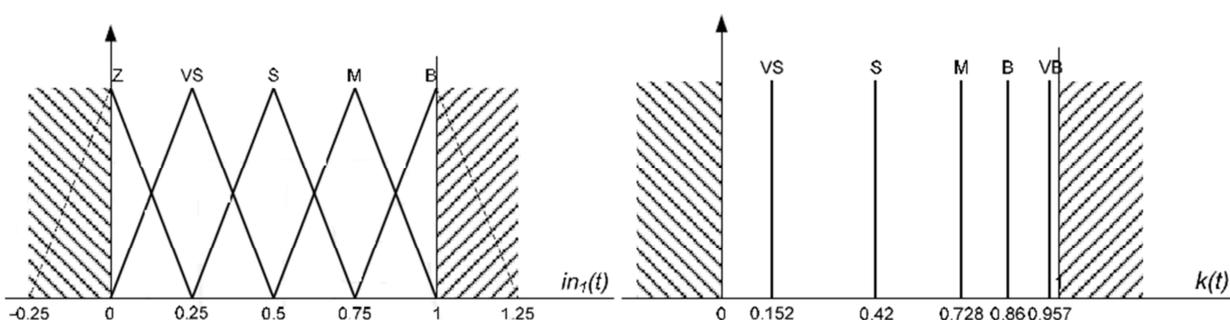


Figura 5.3 - Funções de pertinência do bloco *Gain* (TRUONG; AHN, 2012).

A Tabela 5.1 mostra quais foram as regras *fuzzy* utilizadas para relacionar os diferentes níveis de corrente elétrica na entrada com a saída do modelo.

Tabela 5.1 - Regras *fuzzy* do bloco “Gain” (TRUONG; AHN, 2012).

Corrente elétrica	Z	VS	S	M	B
Saída ( $k_{GFI}$ )	VS	S	M	B	VB

Os parâmetros *fuzzy* deste bloco não foram ajustados durante a modelagem.

### 5.1.2. O bloco “Lyapunov Fuzzy Inference”

Esse bloco possui duas entradas ( $in_2$  = deslocamento e  $in_3$  = velocidade) que foram modeladas no sistema de inferência *fuzzy* considerando cinco funções de pertinência triangulares, determinadas pelas variáveis linguísticas NB (Negativo Grande), NS (Negativo Pequeno), ZE (Zero), PS (Positivo Pequeno), PB (Positivo Grande). Da mesma forma que para o bloco da seção 5.1.1, cada função de pertinência tem como parâmetro a posição da pertinência máxima e a largura da base do triângulo, supondo este como sendo isósceles. Já a saída,  $u_{LFI}$ , foi modelada por meio de valores constantes (*singleton*) (LIEM; TRUONG; AHN, 2015). A Figura 5.4 ilustra como foram estabelecidas as considerações iniciais dessas funções de pertinência.

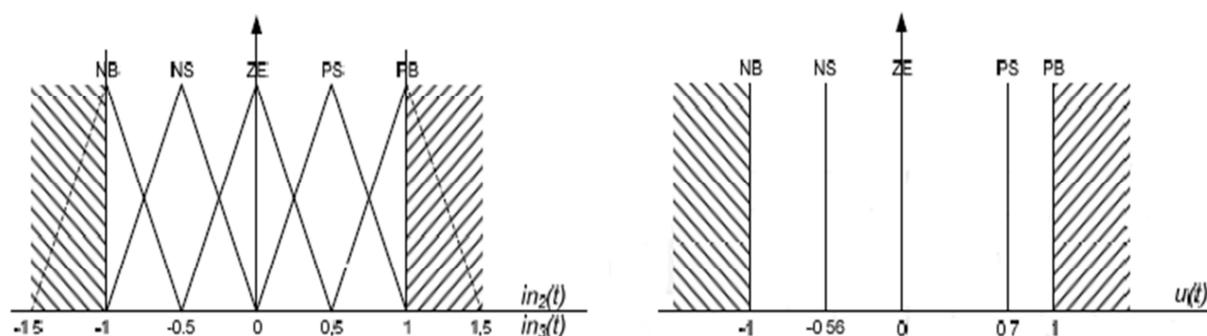


Figura 5.4 - Funções de pertinência do bloco “Lyapunov” (TRUONG; AHN, 2012).

Os valores iniciais usados, tanto no bloco “Gain” quanto no bloco “Lyapunov”, foram baseados na experiência de projeto de pesquisadores que já trabalharam na área (TRUONG; AHN, 2012).

Quanto à base de regras deste bloco, ela foi baseada no critério de estabilidade de Lyapunov. Escolheu-se uma função candidata  $V(x) = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)$  para satisfazer os três critérios de estabilidade (LIEM; TRUONG; AHN, 2015), conforme as Eq.(5.3) a Eq.(5.5).

$$V(0) = 0 \quad (5.3)$$

$$V(x) > 0, x \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \quad (5.4)$$

$$\dot{V} = \sum_i^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \dot{x}_i < 0, x \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \quad (5.5)$$

Analisando os critérios de estabilidade para a função candidata indicada e utilizando a formulação no espaço de estado (LIEM; TRUONG; AHN, 2015), chegou-se às relações da Eq.(5.6) para criar a tabela de regras *fuzzy*.

$$\dot{V} < 0 \Leftrightarrow \left[ \begin{array}{l} x, \dot{x} > 0, \ddot{x} < -x; \\ x, \dot{x} < 0, \ddot{x} > -x; \\ x > 0, \dot{x} < 0, \ddot{x} > -x; \\ x < 0, \dot{x} > 0, \ddot{x} < -x; \end{array} \right] \quad (5.6)$$

A partir da Equação (5.6), elaborou-se a Tab. 5.2 que relaciona as regras *fuzzy* utilizadas. A estrutura utilizada para formar as regras foi a estrutura *IF-THEN* (SE deslocamento ( $in_2$ ) é  $A_i$  E velocidade ( $in_3$ ) é  $B_i$ , então ( $u$ ) é  $C_i$ , com  $i = 1, 2, \dots, 25$ )

Cada regra *fuzzy* possui um peso associado. Esse peso indica o grau de importância que uma regra possui sobre as outras. Castanho (2005), em seus trabalhos, diz que o peso de uma regra *fuzzy* é um número real no intervalo  $[0, 1]$ , em que zero representa importância nula e um representa máxima importância. Eventualmente, várias regras podem ter pesos

entre esses limites do intervalo, representando uma porcentagem do peso da regra que possui maior importância.

Tabela 5.2 - Regras *fuzzy* do bloco “Lyapunov” (TRUONG; AHN, 2012).

Saída do bloco “Lyapunov”	Velocidade					
	NB	NS	ZE	PS	PB	
Deslocamento	NB	NB	NB	NS	ZE	PB
	NS	NB	NS	NS	PS	PB
	ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
	PS	NB	NS	PS	PS	PB
	PB	NB	ZE	PS	PB	PB

Neste trabalho, optou-se por usar o método de otimização heurística baseado na técnica de Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995). Por conseguir trabalhar bem com muitas variáveis e não ter problemas para otimizar sistemas não lineares, decidiu-se por esse método como alternativa para o ajuste do modelo.

Como parâmetros do otimizador, adotou-se arbitrariamente uma população inicial de 510 indivíduos (dez vezes a quantidade de variáveis de projeto) e uma quantidade de iterações máxima de 350. Os demais parâmetros foram mantidos os mesmos em relação aos ajustes dos outros modelos.

No ajuste desse modelo optou-se por colocar um número maior de indivíduos e um número máximo de iterações mais elevado como forma de se obter melhores resultados no ajuste. Isso levou a um alto custo computacional. Com as configurações de *Desktop* mencionadas no início do capítulo IV, o tempo de processamento computacional de ajuste desse modelo foi de 35h17min. Mesmo com um elevado custo computacional em relação aos outros modelos estudados, não se chegou a um modelo perfeitamente representativo, restando um erro percentual relativamente alto (11,69%). Dessa forma, para o ajuste desse modelo não foram colocados os valores das variáveis de projeto ajustadas, visto que os valores encontrados não são representativos para fins de projeto. É importante deixar claro nesse contexto que o custo computacional é alto tendo em vista a busca dos parâmetros ótimos do modelo. Quando se aplica o modelo já ajustado para uma configuração de projeto, o resultado obtido é quase instantâneo.

Mesmo com as vantagens apresentadas que justificam a escolha desta técnica de otimização, as dificuldades para convergir o resultado e alcançar a precisão relatada por autores foram grandes.

No total são duas variáveis para cada função de pertinência triangular, cinco funções de pertinência triangulares para cada variável de entrada, e cinco valores constantes das saídas; são duas as variáveis de entrada neste bloco, tem-se um fator de escala que ajusta as amplitudes do modelo com os dados do ensaio, e, conforme a Tab. 5.2, são 25 regras *fuzzy*. Portanto, 25 pesos de regras a serem otimizadas. Com isso, há um total de 51 variáveis do modelo para serem otimizadas. Além disso, algumas destas variáveis podem ser conflitantes, o que dificulta ainda mais o procedimento.

A grande quantidade de parâmetros a serem otimizados foi um fator que dificultou bastante a modelagem. Além disso, escolher intervalos de variação para cada uma dessas 51 variáveis é muito trabalhoso e, devido à característica não linear do modelo, a mudança de alguns intervalos de uma otimização para outra não resultou na diminuição do erro.

Esse erro é obtido da norma relativa entre os dados do ensaio e os dados do modelo, conforme a Eq.(4.2). Os valores ótimos são encontrados à medida que esse erro ou essa diferença entre os resultados numéricos e experimentais seja minimizada.

## 5.2. Comparação modelo *Fuzzy* x Experimentos

A título de comparação com os modelos paramétricos, a otimização do modelo *Fuzzy* foi feita em relação aos ensaios com deslocamento senoidal aplicado com amplitude de 3 mm pico a pico, frequência de 10 Hz e corrente elétrica aplicada de 1,0 A. A Figura 5.5 ilustra o comportamento da força *versus* tempo no modelo *fuzzy* após a otimização em relação aos experimentos.

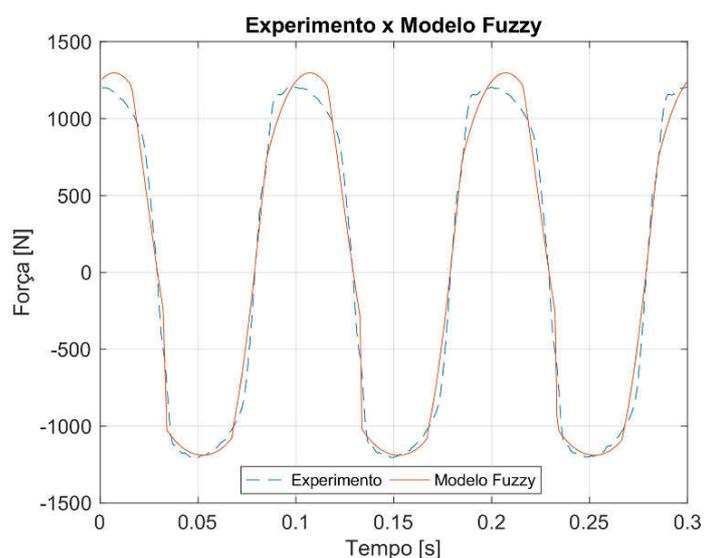


Figura 5.5 – Comportamento da força x tempo (*Fuzzy* x experimento);  
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

Em relação aos dados experimentais analisados no capítulo III, nota-se uma certa simetria da força observada em relação ao eixo do tempo. Na Figura 5.5, o modelo *fuzzy* não conseguiu representar essa simetria, provavelmente por uma combinação equivocada de parâmetros ajustados, os quais levaram à diferença existente no comportamento do atuador quando em tração máxima e quando em compressão máxima. A Figura 5.6 representa a relação força x deslocamento (*Fuzzy* x experimento) após a otimização por Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995).

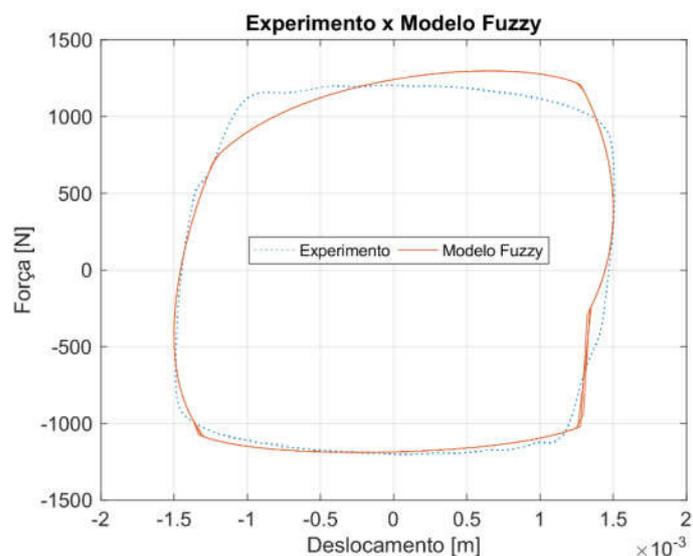


Figura 5.6 – Comportamento da força x deslocamento (*Fuzzy* x experimento);  
(Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

Pelos resultados apresentados nas Figs. (5.5) e (5.6), nota-se que os maiores erros do ajuste, nessa configuração, ocorreram onde a força de tração à qual o atuador foi submetido foi máxima. Isso se dá quando o deslocamento passa de negativo para positivo e a velocidade do pistão é positiva e crescente. Nesse sentido, observam-se quais parâmetros estão relacionados com a característica observada e, então, atualizam-se os intervalos das variáveis de projeto para que se busque otimizar os parâmetros mais uma vez. Durante as tentativas de se otimizar novamente, é possível notar que a configuração de parâmetros aparentemente ajustados sofre alteração e as tentativas seguintes vão se tornando mais infrutíferas, como se não fosse mais possível encontrar um projeto ótimo. Por isso, a adequada seleção das funções de pertinência, das regras *fuzzy* e dos intervalos de variação das variáveis de projeto é tão importante. A Figura 5.7 ilustra o gráfico de histerese (força x velocidade) conforme obtido tanto a partir do modelo *Fuzzy*, como dos dados experimentais do ensaio realizado.

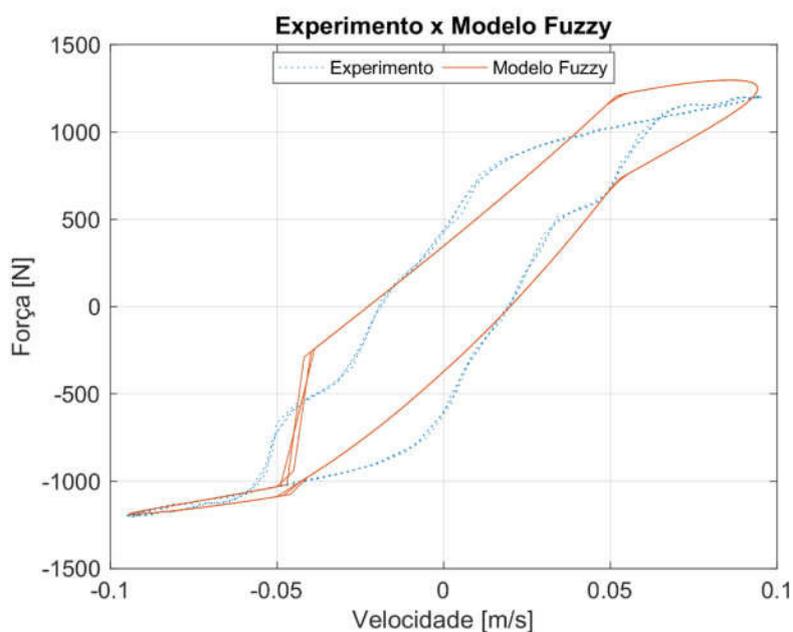


Figura 5.7 - Comportamento da força x deslocamento (*Fuzzy* x experimento); (Amp = 3 mm, freq. = 10 Hz,  $i = 1,0$  A).

### 5.3. Discussão

Os modelos paramétricos são mais rápidos para serem obtidos computacionalmente, como pode ser observado pelo tempo de processamento computacional de cada modelo apresentado no capítulo IV. Contudo, os próprios parâmetros acarretam uma limitação quanto

aos resultados e curvas geradas, uma vez que obedecem a uma lei de formação bem definida. Um modelo matemático paramétrico que seja capaz de responder de forma exatamente igual aos resultados do experimento teria que ser bastante complexo matematicamente e, provavelmente, levaria a um custo computacional maior.

Uma das principais vantagens dos modelos não paramétricos em relação aos modelos paramétricos é a capacidade de modelar a curva de uma maneira livre de equações previamente estabelecidas. Os resultados apresentados nas Figs. 5.5, 5.6 e 5.7 comprovam isso. As curvas do modelo matemático evidenciam certa flexibilidade para modelar a curva dos resultados experimentais, bastando apenas que se façam boas escolhas em relação aos parâmetros *fuzzy*.

Os modelos não paramétricos existentes conseguem ajustar bem melhor uma curva a outra, tornando o resultado da caracterização mais preciso. Por outro lado, a dificuldade para se chegar a uma precisão satisfatória passa, no modelo *Fuzzy*, pelas seguintes exigências: encontrar os melhores intervalos de variação das 51 variáveis de projeto, estabelecer a base de regras *fuzzy* mais apropriada para o comportamento dinâmico do atuador, escolher as funções de pertinência adequadas e a quantidade destas funções que levarão ao melhor ajuste possível.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÃO

O uso de atuadores com fluido magneto reológico vem ganhando espaço em diversas aplicações na engenharia estrutural. Sistemas dotados de uma chamada suspensão “inteligente”, usando atuadores com fluidos MR, são uma opção cada vez mais utilizada em detrimento de outros tipos de suspensão ativa, por serem mais caras, por consumirem mais energia e por gerarem um custo de manutenção maior (CRIVELLARO, 2008).

Além de necessitar pouca energia para seu funcionamento e possuir rápida resposta no tempo (menos de  $15 \cdot 10^{-3} s$ ), a transformação é completamente reversível, ou seja, após a orientação das partículas magnéticas, devido a uma aplicação de corrente, elas voltam a seu estado original instantaneamente, ao cessar o fornecimento de corrente elétrica (SCHURTER; ROSCHKE, 2000), (LORD, 2009). Consequentemente, muitas vantagens do uso dos atuadores com fluido magneto reológico decorrem de suas características.

No capítulo III, ficou clara, por meio dos resultados experimentais, a influência da ação da corrente elétrica no atuador, bem como o surgimento da saturação da corrente à medida que ela aumenta. Ficou claro também como o atuador se comporta para uma dada amplitude de deslocamento senoidal e uma dada frequência. Essas informações são importantes para a caracterização do amortecedor.

No capítulo IV, a evolução dos modelos matemáticos paramétricos é capaz de demonstrar que os modelos foram melhorando ao longo do tempo, permitindo um comportamento dinâmico mais próximo dos resultados experimentais, o que é muito importante para fins de projeto. Verifica-se que a quantidade de parâmetros usados nos

modelos aumentou com o tempo, mas, em compensação, os modelos passaram a responder cada vez melhor até se chegar ao trabalho de Kwok *et al.* (2006), responsáveis pela proposição do modelo histerético. Este modelo foi justamente o modelo que apresentou os melhores resultados numéricos, levando em consideração o baixo custo computacional e a precisão obtida em relação aos dados experimentais.

No capítulo V, o uso da modelagem *fuzzy* mostrou ser muito promissora, com a possibilidade de se encontrar boa precisão em relação aos dados obtidos nos ensaios experimentais. Contudo, com a forma de modelar desenvolvida neste trabalho, ficou muito trabalhoso o processo de otimização. Além disso, a metodologia proposta não conseguiu reproduzir os bons resultados encontrados na literatura. Ficou claro também que o modelo *fuzzy*, por ser um modelo matemático não paramétrico, possui maior “flexibilidade” que os modelos paramétricos para se adequar à forma desejada, ou seja, à curva obtida nos ensaios de laboratório. Contudo, o custo computacional mostrou-se elevado, além de sua complexidade, tendo estes pontos levado à preferência pelo modelo histerético como sendo o mais representativo, dentre os modelos estudados. Visto que este modelo foi de implementação mais simples, resultou um erro pequeno no processo de ajuste e não apresentou custo computacional elevado.

A Figura 6.1 mostra um gráfico comparando o resultado da otimização de alguns modelos apresentados neste trabalho. Todos os resultados se referem à aplicação de um deslocamento senoidal com amplitude de 3 mm pico a pico (pp), frequência de 10 Hz e corrente elétrica de 1,0 A.

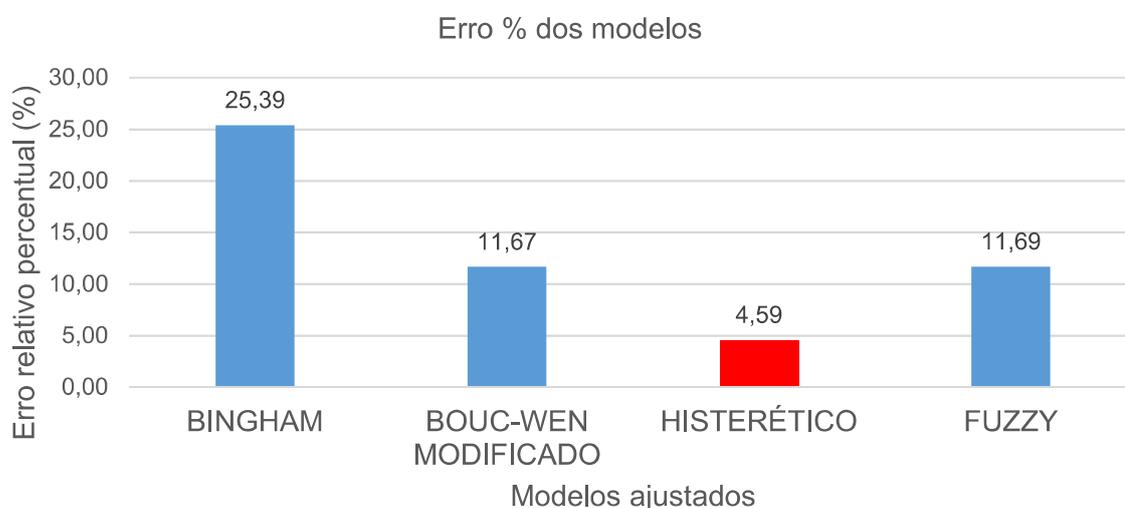


Figura 6.1 - Comparação dos erros percentuais para cada modelo otimizado.

Assim sendo, no contexto desta dissertação, o modelo histerético mostrou ser o mais preciso e o que exigiu menor custo computacional, sendo, portanto, o modelo mais indicado para utilização em sistemas de engenharia estrutural.

### **6.1. Principais contribuições**

Dentre as principais contribuições deste trabalho, destaca-se a caracterização do atuador com fluido magneto reológico disponível no LMEst. Essa caracterização é muito importante para os pesquisadores do laboratório, visando diversas aplicações futuras. Uma das aplicações já programadas refere-se ao controle semiativo de vibração de rotores flexíveis.

Essa dissertação servirá de base também para se compreender melhor quais as principais vantagens e desvantagens de optar por uma abordagem paramétrica ou não paramétrica do modelo matemático. No âmbito da investigação de outros pesquisadores, ela servirá de suporte para a escolha adequada do modelo.

As justificativas para o desenvolvimento desse trabalho servirão de estímulo para o desenvolvimento de novos produtos e aplicações possíveis de atuadores com fluido magneto reológico, com vistas de melhorar a qualidade de vida das pessoas e melhoria de processos.

Além disso, os estudos na área vão contribuir com as pesquisas no ramo e incentivar a busca por mais recursos para o desenvolvimento de suspensões mais confiáveis e que tragam mais conforto para passageiros de veículos, assim como a atenuação de vibração de sistemas mecânicos com menor custo, em relação aos sistemas ativos, e com maiores possibilidades de aplicação, em relação aos sistemas passivos, sem, entretanto, demandar por grande quantidade de energia.

Uma outra contribuição tem a ver com a utilização de diversas ferramentas de projeto, envolvendo técnicas de modelagem matemático-computacional, uso de técnicas de otimização e lógica *fuzzy*. Destaca-se também a utilização de métodos experimentais, envolvendo toda a instrumentação de uma máquina de ensaios, sensores e condicionadores de sinais.

Pensando na possibilidade de projetar e construir um atuador com fluido magneto reológico, no capítulo II, em uma referência de Zhang *et al.* (2016), pode-se retirar informações sobre o tamanho das partículas magnéticas mais apropriadas para aplicações de engenharia; já Ahmadkhanlou (2008), em sua contribuição, traz recomendações de projeto ótimo para definir a melhor geometria para o atuador.

E por fim, a otimização usando o algoritmo de Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995) demonstra que esta técnica representa uma alternativa para a determinação dos melhores parâmetros de projetos a partir de modelos previamente escolhidos. Em outras publicações da literatura, foram testados outros algoritmos, como o do Enxame de Partículas (*particle swarm optimization*) (KWOK *et al.*, 2006); o método ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) (SCHURTER; ROSCHKE, 2000), além das Redes Neurais Artificiais (AHN; TRUONG; ISLAM, 2009).

## 6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Seguem algumas possibilidades para trabalhos futuros que podem contribuir para o avanço dos estudos na área.

- ✓ Estudar mais a fundo a influência dos parâmetros nos modelos paramétricos como forma de entender melhor o comportamento do atuador, principalmente naqueles modelos que apresentaram erros menores, como é caso das modificações do modelo de Bouc-Wen e o modelo histerético.
- ✓ No caso do modelo *Fuzzy*, analisar e testar novos tipos de funções de pertinência e a quantidade destas funções para representar melhor o comportamento da variável considerada.
- ✓ Estudar novas formas de estabelecer as regras que determinam a relação entre as entradas e a saída e, neste contexto, estudar quais as regras que influenciariam ou contribuiriam mais e as que influenciariam menos sobre a resposta final do modelo.
- ✓ Validar, tanto os modelos paramétricos quanto os não paramétricos, para uma faixa de amplitude e de frequência, além de ampliar a faixa de variação da corrente, como forma de se obter um modelo que atenda a uma gama maior de aplicações.
- ✓ Aplicar outras técnicas de otimização dos parâmetros *fuzzy* como forma de comparar o desempenho entre os métodos de otimização e a técnica da Evolução Diferencial (STORN; PRICE, 1995), visando obter um menor custo computacional.
- ✓ Dar um tratamento estatístico para os parâmetros envolvidos no modelo, como forma de obter maior confiança sobre os valores finais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M; JAQUES, M. A. P. Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas. TRANSPORTES, v. 16, n. 2, 2008.

Ahmadkhanlou, F. Design, modeling and control of magnetorheological fluid-based force feedback dampers for telerobotic systems. 2008. Tese de Doutorado. The Ohio State University.

Ahn, K. K.; Truong, D. Q.; Islam, M. A. Modeling of a magneto-rheological (MR) fluid damper using a self tuning fuzzy mechanism. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 23, n. 5, p. 1485-1499, 2009.  
<https://doi.org/10.1007/s12206-009-0359-7>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6023: Referências bibliográficas. Rio de Janeiro, 2002. 24p.

Bai, X. X.; Wereley, N. M.; Choi, Y. T. Magnetorheological energy absorber with dual concentric annular valves. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 27, n. 7, p. 944-958, 2016.  
<https://doi.org/10.1177/1045389X15577659>

BARBER, D. E. MR Fluids at the Extremes: High-Energy and Low-Temperature Performance of LORD® MR Fluids and Devices. Ch, v. 4, p. 74-95, 2013.

Caicedo, J. M.; Jiang, Z.; Baxter, S. C. Including Uncertainty in Modeling the Dynamic Response of a Large-Scale 200 kN Magneto-Rheological Damper. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, p. G4016002, 2016.

Castanho, M. J. P. Construção e avaliação de um modelo matemático para prever a evolução do câncer de próstata e descrever seu crescimento utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. 2005. Tese de Doutorado. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Cavalini jr, A. A.; Koroishi, E.H.; Borges, A.S.; Pereira, L.G.; Steffen jr, V., Semi-Active Vibration Control of a Rotating Shaft by Using a Magneto Rheological Damper. In: *ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 23º*, 2015, Rio de Janeiro.

CRIVELLARO, C. Controle robusto de suspensão semi-ativa para caminhonetes utilizando amortecedores magneto-reológicos. v1 and v2, 439p., PhD thesis–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2008.

Crosby, M.; Karnopp, D. C. The active damper: A new concept for shock and vibration control. *Shock Vibration Bulletin*, Washinton, n. 43, p. 119–133, 1973

Dyke, S. J. Acceleration feedback control strategies for active and semi-active control systems: modeling, algorithm development, and experimental verification. 1996. Tese de Doutorado. directed by B. F. Spence, Jr. for the Department of Civil Engineering and Geological Sciences. University of Notre Dame.

Gagg Filho, L. A. Controle semi-ativo de vibrações com fluido magnetoreológico utilizando Imis e lógica nebulosa otimizada por algoritmo genético. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho – UNESP, Ilha Solteira, 2012.

Gamota, D. R.; Filisko, F. E. Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: moderate frequencies. *Journal of rheology*, v. 35, n. 3, p. 399-425, 1991.  
<https://doi.org/10.1122/1.550221>

KLINGER, D. L.; COOPERRIDER, N. K.; HEDRICK, J. K.; WHITE, R. C.; CILZADO, A.; SAYERS, M. E; WORMLEY, D. Guideway vehicle cost reduction. In: NATIONAL technical information service reports DT-TST. Alexandria: Alexandria Edição, 1976. p. 75-95. 1976. part 2.

Kwok, N. M.; Ha, Q. P.; Nguyen, T. H.; Li, J; Samali, B. A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 132, n. 2, p. 441-451, 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.015>

LIEM, Dao Thanh; TRUONG, Dinh Quang; AHN, Kyoung Kwan. Hysteresis modeling of magneto-rheological damper using self-tuning Lyapunov-based fuzzy approach. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, v. 16, n. 1, p. 31-41, 2015.  
<https://doi.org/10.1007/s12541-015-0004-6>

LORD CORPORATION. LORD Technical Data: RD-8040-1 and RD-8041-1 Dampers. Cary, USA, 2009. 2p. site: <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7016.pdf>

LORD CORPORATION. LORD User Instructions: LORD Wonder Box Device Controller Kit. Cary, USA, 2006. 2p. site: <http://www.lordmrstore.com/LiteratureRetrieve.aspx?ID=236287&A=SearchResult&SearchID=30077211&ObjectID=236287&ObjectType=6>

Margolis, D. L.; Hrovat, D. Semi-active heavy and pitch control of a high speed tracked air cushion vehicle. In: INTERSOCIETY TRANSPORTATION CONFERENCE, 1., 1976, Los Angeles. CONFERENCE... Los Angeles: Los Angeles, 1976. p. 41–49.

MILLER, L. R.; NOBLES, C. M. The design and development of a semi-active suspension for military tank. [S.I.]: SAE International, 1988. (Paper, 881133). DOI: 10.4271/881133 <https://doi.org/10.4271/881133>

Oliveira jr, H. A.; Caldeira, A. M.; Machado, M. A. S; Souza, R.C.; Tanscheit, R. Inteligência Computacional aplicada a administração, economia e engenharia em Matlab. Rio de Janeiro, Thompson, 2007.

Paschoal, E. F. Controle semi-ativo de vibrações usando lógica nebulosa e fluido magnetoreológico. 2011. 116f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

Priyandokoa, G.; Syakirinr, M; Mailah, M. Modelling of MR damper with adaptive neural network and particle swarm optimisation technique. Latest Trends in Circuits, Control and Signal Processing, 2013.

SCHURTER, K. C.; ROSCHKE, P. N. Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS. In: Fuzzy Systems, 2000. FUZZ IEEE 2000. The Ninth IEEE International Conference on. IEEE, 2000. p. 122-127. <https://doi.org/10.1109/FUZZY.2000.838645>

Silva, A. M.; Pinheiro, M. S. de F.; Freitas, N. E. Guia para normalização de trabalhos técnico-científicos: projetos de pesquisa, monografias, dissertações e teses. Uberlândia: Edufu, v. 2, 2004. 157p

Spencer, B. F.; Dyke, S. J.; Sain M. K.; Carlson, J. D. Phenomenological model of a magneto-rheological damper. *Journal of Engineering Mechanics*, New York, v. 122, n. 3, p. 1-23 1996.

Stanway, R.; Sproston, J. L.; Stevens, N. G. Non-linear identification of an electrorheological vibration damper. In: *IFAC Identification and System Parameter Estimation*. 1985. p. 195-200.

Stanway, R. S. J. L.; Sproston, J. L.; Stevens, N. G. Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper. *Journal of Electrostatics*, v. 20, n. 2, p. 167-184, 1987.  
[https://doi.org/10.1016/0304-3886\(87\)90056-8](https://doi.org/10.1016/0304-3886(87)90056-8)

Storn, R.; Price, K. *Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces*, Berkeley. CA: International Computer Science Institute, 1995.

Truong, D. Q.; Ahn, K. K. *MR fluid damper and its application to force sensorless damping control system*. INTECH Open Access Publisher, 2012.

Tsuruta, K. M. *Investigação Numérica e Experimental de Dispositivos Piezelétricos Combinando Geração de Energia e Atenuação de Vibrações*. 2015. Tese de Doutorado, Universidade Federal De Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

WEN, Yi-Kwei. Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of the engineering mechanics division*, v. 102, n. 2, p. 249-263, 1976.

Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Information and control*, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.  
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zeinali, M., Mazlan, S. A., Choi, S. B., Imaduddin, F., Hamdan, L. H. Influence of piston and magnetic coils on the field-dependent damping performance of a mixed-mode magnetorheological damper. *Smart Materials and Structures*, v. 25, n. 5, p. 055010, 2016. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/5/055010>

ZHANG, Q.; LIU, X.; REN, Y.; WANG, L.; HU, Y. Effect of Particle Size on the Wear Property of Magnetorheological Fluid. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2016, 2016.

## ANEXOS

### A.1- Dados Técnicos do Atuador MR RD-8040-1 e 8041-1 da LORD Corporation®.

#### LORD TECHNICAL DATA

## RD-8040-1 and RD-8041-1 Dampers

### Description

LORD RD-8040-1 (short stroke) and RD-8041-1 (long stroke) dampers are compact, magneto-rheological (MR) fluid dampers suitable for industrial suspension applications. Continuously variable damping is controlled by the increase in yield strength of the MR fluid in response to magnetic field strength.

### Features and Benefits

**Fast Response Time** – responds in less than 15 milliseconds to changes in the magnetic field.

**Easy to Use** – provides simple electronics and straight forward controls.

**Durable** – provides excellent long term stability.

### Storage

Dampers should be stored at -40 to +100°C (-40 to +212°F).

The RD-8040-1 and RD-8041-1 dampers are monotube shocks containing high-pressure nitrogen gas (300 psi). Handle with care and do not heat or puncture body.

### Electrical Properties\*

Input Current, Amp	
Continuous for 30 seconds	1 max
Intermittent	2 max
Input Voltage, Volt	12 DC
Resistance, ohms	
@ ambient temperature	5
@ 71°C (160°F)	7

\*Data is typical and not to be used for specification purposes.

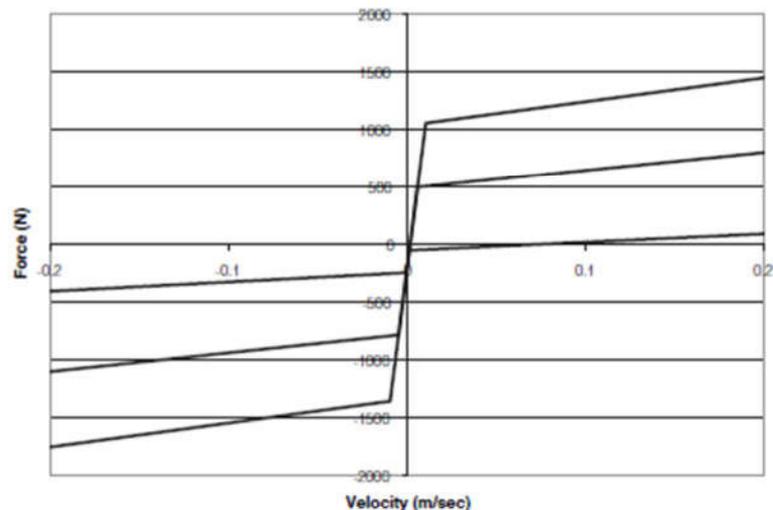
### Typical Properties\*

	RD-8040-1	RD-8041-1
Stroke, mm (in)	55 (2.17)	74 (2.91)
Extended Length, mm (in)	208 (8.2)	248 (9.76)
Body Diameter, mm (in)	42.1 (1.66) max	42.1 (1.66) max
Shaft Diameter, mm (in)	10 (0.39)	10 (0.39)
Tensile Strength, N (lbf)	8896 (2000) max	8896 (2000) max
Damper Forces, N (lbf)		
Peak to Peak		
5 cm/sec @ 1 A	>2447 (>550)	>2447 (>550)
20 cm/sec @ 0 A	<667 (<150)	<667 (<150)
Operating Temperature, °C (°F)	71 (160) max	71 (160) max

\*Data is typical and not to be used for specification purposes.

## LORD TECHNICAL DATA

### Typical Force vs. Velocity



Offset at origin is due to gas precharge required for temperature compensation and to prevent cavitation.

Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

\*Ask Us How™ is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide ... Ask Us How.

#### LORD Corporation World Headquarters

111 Lord Drive  
Cary, NC 27511-7923  
USA

#### Customer Support Center (In United States & Canada)

+1 877 ASK LORD (275 5673)

[www.lord.com](http://www.lord.com)

For a listing of our worldwide locations, visit [LORD.com/locations](http://LORD.com/locations).

©2009 LORD Corporation CD DS7016 (Rev.D 6/09)

**LORD**  
AskUsHow™

## A.2- Instruções para usar o dispositivo controlador de corrente LORD Wonder Box® LORD Corporation®.

### LORD USER INSTRUCTIONS

## LORD Wonder Box® Device Controller Kit

LORD Wonder Box® device controller kit is a companion product for the magneto-rheological (MR) fluid devices. The kit includes the device controller, 12 Volt DC power supply and two banana plugs.

The Wonder Box device controller kit provides closed loop current control to compensate for changing electrical loads up to the limits of the power supply. The Wonder Box controller may be operated as an interface device for PLC or computer control of MR fluid devices. The Wonder Box device controller kit is for indoor use only.

If manual operation is desired, a potentiometer is provided to control the current supplied to an attached device.

### Operating Instructions

Connect the banana plugs to each wire of the MR fluid device. Insert the banana plugs into the Wonder Box controller output (B). Polarity is not important. Connect the power supply to the input connector (A). The red LED should light indicating proper operation of the unit.

#### Manual Control

Current to the device is adjusted by rotating the potentiometer (C) in the clockwise direction. An external voltage control input should not be connected to the BNC terminal (D).

#### External Voltage Control

With the potentiometer control set to zero (rotate fully counter clockwise), connect a 0-5 Volt DC control signal to the BNC terminal on the side of the Wonder Box controller (D). Output current to a device can now be controlled with this input signal. The input control signal can be switched up to 1 kHz.

The output current is linearly proportional to the input voltage. The output current will be 0.0 Amps when the control input is approximately 0.4-0.6 Volts at the BNC terminal (refer to Typical Performance graph).

#### Pulse Control

In Manual or External Voltage Control, current to the device may be switched on and off by depressing the switch on the side of the controller (E).

### Technical Data

Overall Dimensions (LxWxH), mm (in)	63.5 x 27.9 x 88.9 (2.5 x 1.1 x 3.5)
Input Receptacle	2.1 mm Female
Pulse Width Modulation (PWM) Frequency, kHz	30
Output Current, Amp	2 max

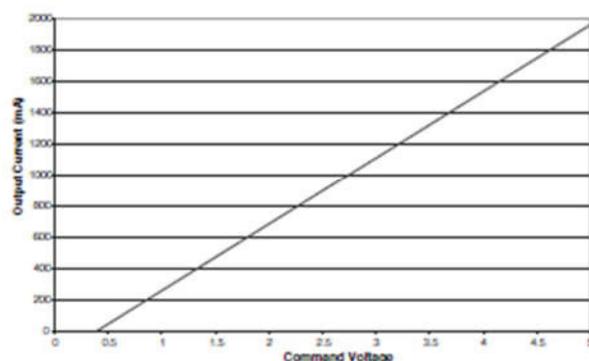
Wonder Box Device Controller



**LORD**  
AskUsHow™

## LORD USER INSTRUCTIONS

### Typical Performance, 4 ohm load



Performance graph should not be used for control or design purposes.

The tables below indicate typical performance using the supplied power supply. When utilizing the Wonder Box device controller kit in a control circuit, it is recommended that the user measure the exact voltage to current relationship in their application.

Input Voltage	Output Current (4 ohm)
~ 0.4-0.6 V	0 mA
2 V	750 mA
4.3 V	1800 mA

Input Voltage	Output Current (8 ohm)
~ 0.4-0.6 V	0 mA
1.6 V	600 mA
3.2 V	1300 mA

Values stated in these instructions represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

Wonder Box and "Ask Us How" are trademarks of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide . . . Ask Us How.

#### LORD Corporation World Headquarters

111 Lord Drive  
Cary, NC 27511-7923  
USA

Customer Support Center  
+1 877 ASK LORD (275 5673)

[www.lord.com](http://www.lord.com)

©2006 LORD Corporation CD UI7000 (Rev.0 5/06)

**LORD**  
AskUsHow™