

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RODRIGO DO NASCIMENTO E SILVA**

**PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA O CONTROLE DE  
AMORTECEDORES MAGNETO-REOLÓGICOS USANDO RECURSOS  
DA LÓGICA NEBULOSA**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA  
2014**

**RODRIGO DO NASCIMENTO E SILVA**

**PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA O CONTROLE DE  
AMORTECEDORES MAGNETO-REOLÓGICOS USANDO RECURSOS  
DA LÓGICA NEBULOSA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa. Área de Concentração: Instrumentação e Controle.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tuset.  
Co-orientador : Prof. Dr. Átila Madureira Bueno.

**PONTA GROSSA**

**2014**

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca  
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa  
n.45/14

S586 Silva, Rodrigo do Nascimento e

Projeto de um dispositivo para o controle de amortecedores magneto-  
reológicos usando recursos da lógica nebulosa. / Rodrigo do Nascimento e Silva.  
-- 2014.

127 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tuset

Co-orientador: Prof. Dr. Átila Madureira Bueno.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta  
Grossa, 2014.

1. Circuitos elétricos não-lineares. 2. Automóveis - Amortecedores. 3.  
Conjuntos difusos. 4. Controladores programáveis. I. Tuset, Ângelo Marcelo. II.  
Bueno, Átila Madureira. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV.  
Título.

CDD 621.38



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa**

**Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Título da Dissertação Nº 4/2014

**PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA CONTROLE DE AMORTECEDORES MAGNETO-  
RELÓGICOS USANDO RECURSOS DE LÓGICAS NEBULOSAS**

por

**Rodrigo do Nascimento e Silva**

Esta dissertação foi apresentada às **8 horas** do dia **29 de agosto de 2014** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com área de concentração em Controle e Processamento de Energia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

**Prof. Dr. José Manoel Balthazar (UNESP)**

---

**Prof. Dr. Max Mauro Dias Santos (UTFPR)**

---

**Prof. Dr. Vinícius Piccirillo (UTFPR)**

---

**Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tuset (UTFPR)**  
- Orientador

Visto do Coordenador

Prof. Dr. Claudinor Bitencourt Nascimento (UTFPR)  
Coordenador do PPGEE

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE  
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS PONTA GROSSA

Dedico este trabalho a minha esposa  
Marilay, que me apoiou o tempo todo.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus.

Minha Esposa e meus filhos pela paciência e compreensão, pelo tempo que foi dedicado para conclusão dessa dissertação.

Ao orientador Ângelo Marcelo Tusset.

Ao co-orientador Prof. Atila Bueno Madureira.

A coordenação do curso.

Aos colegas de mestrado.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Aos Membros da Banca Examinadora.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.  
KING, Marthin Luther, 1968.

## RESUMO

SILVA, Rodrigo do Nascimento. **Projeto de um dispositivo para o controle de amortecedores magneto-reológicos usando recursos da lógica nebulosa**. 2014 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

Neste trabalho foi proposto e desenvolvido um sistema de controle de suspensão veicular semi-ativa utilizando um amortecedor magneto reológico (MR). Para simulações numéricas foram considerados: um modelo de um carro completo não linear, um sistema de controle *Nebuloso* para determinação da força do amortecedor e um sistema para determinar a corrente elétrica aplicada no amortecedor. Os resultados das simulações numéricas demonstraram que a estratégia de controle proposto melhorou a segurança do veículo reduzindo os deslocamentos do eixo da roda em aproximadamente 7% e o tempo de exposição do chassi as vibrações causadas por distúrbios da estrada em aproximadamente 422,56%. Com a finalidade de implementar futuramente em um amortecedor MR a estratégia de controle proposta, foi desenvolvido um protótipo do controle real, através da utilização de um sistema microprocessado usando de microcontroladores Arduino Nano V3. Para representar o amortecedor utilizou - se uma bobina elétrica, que dispõe de características reais próximas do sistema de amortecimento final. Os resultados experimentais demonstram que o protótipo desenvolvido, reproduziu com fidelidade os resultados numéricos apresentados preliminarmente com uma faixa de erro reduzida.

**Palavras-chaves:** Controle não linear. Sistemas Veiculares. Controle Nebuloso. Sistemas Microcontrolados. Amortecedor Magneto-Reológico.

## ABSTRACT

SILVA, Rodrigo do Nascimento. **Project of a device for the control of magneto-rheological dampers using resources the fuzzy logic.** 2014 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

In this work we proposed and developed a system of control vehicular suspension, semi active, using a magneto rheological damper (MR). For the numerical simulations were considered: a model non-linear an complete car, a fuzzy control system to determine strength of the damper and a system for determining the electrical current applied the damper. The results of numerical simulations demonstrated that proposed control strategy improves the safety by the vehicle reducing the shifts the axles the wheels in approximately 7% and the time of exposure of the chassis the vibrations caused by disturbances in the road in approximately 422.56%. In order of implement in the future a proposed control on a MR damper, a prototype of the real control was developed through the use microprocessor system using microcontrollers Arduino Nano V3. For represented the damper, was used - an electrical coil, which has real characteristics near the end cushioning system. The experimental results demonstrated that the prototype developed, faithfully reproduces the numerical results presented preliminarily with reduced error band.

**Keywords:** Nonlinear Control. Vehicular Systems. Fuzzy Control. Microcontrolled systems. Magneto-Rheological Damper.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de um controlador nebuloso .....	26
Figura 2: Superposição de funções de pertinência com 50%. .....	27
Figura 3: Função triangular .....	27
Figura 4: Fuzzificação por função triangular com 50% de superposição .....	28
Figura 5: Função trapezoidal.....	28
Figura 6: Fuzzificação por função trapezoidal com 50% de superposição .....	29
Figura 7: Função gaussiana.....	29
Figura 8: Fuzzificação por função gaussiana com 50% de superposição .....	30
Figura 9: Fuzzificação por função Bell com 50% de superposição .....	31
Figura 10: Fuzzificação por função sigmoidal com 50% de superposição .....	31
Figura 11: Modelo clássico de Mamdani.....	34
Figura 12 - Modelo de interpolação de Takagi-Sugeno.....	35
Figura 13: Superfície de controle dimensional para 25 regras. ....	38
Figura 14: Amortecimento Histerese. ....	40
Figura 15 : (a) Microfotografia MR sem campo magnético, (b). Microfotografia MR com um campo magnético aplicado com cadeias paralelas de ferro carbônio.....	41
Figura 16: (a) Aplicação do campo magnético. (b) Campo magnético atuando. (c) partículas ferrosas alinhadas com o campo magnético.....	43
Figura 17 : Modo válvula. ....	44
Figura 18 Modo de cisalhamento de operação MRF.....	44
Figura 19: Modo de operação Squeeze mrf. ....	45
Figura 20: Amortecedor MR. ....	46
Figura 21 : Modelo de bingham para amortecimento controlável proposto por Stanway, et al., 1987.....	47
Figura 22: modelo proposto por Gamota e Filisko, 1991.....	48
Figura 23: Modelo Bouc-Wen para amortecedor MR. ....	49
Figura 24: Modelo mecânico de um amortecedor MR proposto por Spencer <i>et al.</i> , 1997. ....	50
Figura 25: Características da força-velocidade de um amortecedor MR em função da corrente. ....	52
Figura 26 : (a) Função de pertinência para a velocidade. (b) Função de pertinência para a força. (c) Função de pertinência para a corrente. ....	53
Figura 27: Superfície de controle dimensional para 63 regras do controle da corrente .....	54
Figura 28: (a) Sistema de coordenadas de referência. (b) Modelo não linear de um carro completo.....	60
Figura 29: Diagrama do corpo livre para a massa suspensa ( $m_s$ ). ....	62
Figura 30: Diagrama do corpo livre para a massa não suspensa ( $m_u$ ). ....	62
Figura 31: Diagrama em blocos de um amortecedor MR aplicado ao veículo. ....	64
Figura 32: Função de pertinência para a velocidade.....	66
Figura 33: Função de pertinência para a velocidade relativa. ....	66
Figura 34: Função de pertinência para a Força.....	66
Figura 35: Superfície de controle dimensional para 25 regras do controle da Força.....	68
Figura 36: Função de pertinência para a Velocidade .....	68
Figura 37: Função de pertinência para a Força.....	69
Figura 38: Função de pertinência para a Corrente.....	69
Figura 39: Superfície de controle dimensional para 63 regras do controle da corrente. ....	70

Figura 40: Chassi (a) Aceleração vertical. (b) Deslocamento vertical. (c) Movimento de pitch. (d) Movimento de roll. ....	71
Figura 41: Deslocamento do eixo das rodas dianteiras. (a) Eixo esquerda. (b) Eixo direito. ....	72
Figura 42: Deslocamentos dos eixos das rodas traseiras. (a) Eixo esquerda. (b) Eixo direito. ....	72
Figura 43: (a) Velocidade do pistão do amortecedor dianteiro direito. (b) Velocidade do pistão do amortecedor dianteiro esquerdo. (c) Força estimada para o controle do amortecedor dianteiro direito. (d) Força estimada para o controle do amortecedor dianteiro esquerdo. (e) Corrente estimada para o controle do amortecedor dianteiro direito. (f) Corrente estimada para o controle do amortecedor dianteiro esquerdo. ..	73
Figura 44: (a) Velocidade do pistão do amortecedor traseiro direito. (b) Velocidade do pistão do amortecedor traseiro esquerdo. (c) Força estimada para o controle do amortecedor traseiro direito. (d) Força estimada para o controle do amortecedor traseiro esquerdo. (e) Corrente estimada para o controle do amortecedor traseiro direito. (f) Corrente estimada para o controle do amortecedor traseiro esquerdo. ....	74
Figura 45: Arduino Nano. ....	76
Figura 46: Disposição dos pinos do Arduino Nano.....	77
Figura 47: Representação de duas formas de onda tipo PWM. ....	80
Figura 48: período e largura do pulso. ....	81
Figura 49: Determinação da força (N), utilizando recursos do <i>Simulink</i> ®.....	83
Figura 50: determinação da força utilizando <i>Simulink</i> ®.....	83
Figura 51: Diagrama no <i>Simulink</i> ® para determinação da corrente elétrica (A) .....	84
Figura 52: Reposta da corrente elétrica (A).....	84
Figura 53: Ligação dos sensores com o microcontrolador. ....	85
Figura 54 Diagrama dos passos para determinação da força.....	87
Figura 55: Diagrama de passos para determinação da corrente.....	88
Figura 56: Visão geral do protótipo. ....	89
Figura 57: Circuito de comando. ....	89
Figura 58: Circuito de força para aplicação da corrente elétrica (A).....	90
Figura 59: Circuito de força. ....	91
Figura 60: Comunicação serial com o computador para aquisição de dados. ....	92
Figura 61: Corrente elétrica aplica na bobina. (a) $V_r=0,4$ [m/s] e $F=547,79$ [N].(b) $V_r=-0,3$ [m/s] e $F=-588,03$ [N].(c) $V_r=0,2$ [m/s] e $F=300,63$ [N].(d) $V_r=-0.4$ [m/s] e $F=-305,55$ [N].(e) $V_r=0,3$ [m/s] e $F=347,52$ [N]. (f) $V_r=-0.1$ [m/s] e $F=-351,35$ [N].....	93
Figura 62: Superfície de controle dimensional para o controle da Força. (a) Resultados obtidos com o Matlabr. (b) Resultados obtidos com o simulador do microcontrolador. (d) Resultados obtidos experimentalmente do protótipo.....	94
Figura 63: Quadrado do erro da força $E_F^2$ .....	96
Figura 64: Quadrado do erro da corrente $E_c2$ . ....	97
Figura 65: Quadrado do erro da força $E_F^2$ para os dados experimentais .....	98
Figura 66: Quadrado do erro da corrente elétrica $E_c2$ para os dados experimentais	99

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Guia para avaliação das compensações.....	21
Quadro 2: Mapa de regras Nebuloso. ....	37
Quadro 3: Mapa de regras <i>Nebuloso</i> para o controle da corrente. ....	54
Quadro 4: Mapa de regras para o controle Nebuloso .....	67
Quadro 5: Mapa de regras <i>Nebuloso</i> para o controle da corrente. ....	69
Quadro 6: Quadrado do erro da força $E_F^2$ .....	95
Quadro 7: Quadrado do erro da corrente $E_C^2$ .....	96
Quadro 8: Quadrado do erro da força $E_F^2$ para os dados experimentais .....	97
Quadro 9: Quadrado do erro da corrente elétrica $E_C^2$ para os dados experimentais..	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compensações (fatores de compensação: $W_k$ e $W_d$ ) em um terço de oitava.....	22
Tabela 2: Os valores numéricos para os parâmetros do sistema.....	70
Tabela 3: Aceleração do centro de massa do chassi causada por uma entrada tipo impulso:.....	75
Tabela 4: Especificações do microcontrolador Arduino Nano. ....	77
Tabela 5: Determinação da Velocidade Relativa.....	86
Tabela 6: Determinação da velocidade .....	86
Tabela 7: Comparação entre os resultados obtidos nas simulações do matlab <sup>r</sup> e as simulações do microcontrolador.....	107
Tabela 8: Comparação entre os resultados obtidos nas simulações do matlab <sup>r</sup> e as simulações do protótipo. ....	108

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Símbolo	Denominação	Unidade [SI]
$a_w$	Aceleração compensada	[m/s <sup>2</sup> ]
$a_i$	Aceleração	[rms]
'a'	Representa a distância entre o amortecedor dianteiro do veículo e o centro de gravidade	[m]
'b'	Representa a distância entre o amortecedor traseiro do veículo e o centro de gravidade	[m]
$c$	Coeficientes de amortecimento viscoso	[N.s/m]
$c_t$	Coeficientes de amortecimento viscoso	[N.s/m]
$c_0$	Coeficiente de amortecimento viscoso associado com o modelo de Bingham	[N.s/m]
$c_1$	Coeficiente de amortecimento viscoso	[N.s/m]
$C_{s\_}$	Coeficiente de dissipação do amortecedor da suspensão	
$F_{s_{fl}}$	Força da mola esquerda da frente	[N]
$F_{s_{fr}}$	Força da mola direita da frente	[N]
$F_{s_{rl}}$	Força da mola esquerda traseira	[N]
$F_{s_{rr}}$	Força da mola direita traseira	[N]
$F_{c_{fl}}$	Força do amortecedor esquerdo da frente	[N]
$F_{c_{fr}}$	Força do amortecedor direito da frente	[N]
$F_{c_{rl}}$	Força de um amortecedor esquerdo traseiro	[N]
$F_{c_{rr}}$	Força do amortecedor direito traseiro	[N]
$f_0$	Força que representa a presença do acumulador do amortecedor	[N]
$f_c$	Força de atrito de Coulomb	[N]
$F$	Força total do amortecedor	[N]
H	Sentido da corrente elétrica	
$I$	Corrente elétrica aplicada na bobina do amortecedor MR	[A]

$k_1$	Coeficientes de rigidez	[N/m]
$k_2$	Coeficientes de rigidez	[N/m]
$K_{s\_}$	Coeficiente de rigidez da mola da suspensão	[N/m]
$K_{u\_}$	Coeficiente de rigidez do pneu	[N/m]
$m_s$	Massa do chassi	
$N$	Força normal entre as superfícies	
's'	Largura do veículo	[m]
$T$	Período total de exposição	[s]
$U_{fl}$	Força do atuador esquerdo da frente	[N]
$U_{fr}$	Força do atuador direito da frente	[N]
$U_{rl}$	Força do atuador esquerdo de trás	[N]
$U_{rr}$	Força do atuador direito de trás	[N]
$u\_$	Amortecedor com controle ativo ou semi-ativo	[N]
$VDV$	Valor Dose de Vibração	$[m/s^{1,75}]$
$x_1$	Variável de estado de deslocamentos	[m]
$x_2$	Variável de estado de deslocamentos	[m]
$x_3$	Variável de estado de deslocamentos	[m]
$\dot{x}_1$	Estado velocidade de deslocamento	[m/s]
$\dot{x}_2$	Estado velocidade de deslocamento	[m/s]
$Z_s$	Deslocamento vertical do centro de gravidade do veículo	
$Z_{u\_}$	Deslocamento do eixo da roda	
$Z\_$	Deslocamento do pneu causado por irregularidades da estrada	
$W_i$	Fator de compensação	
$\mu$	Coeficiente de atrito dinâmico	
$\theta$	Movimento de arfagem do chassi	
$\phi$	Movimento de rolamento do chassi	

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	18
1.2	OBJETIVOS DO AUTOR	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>CONTROLADORES NEBULOSOS</b>	<b>25</b>
3.1	TEORIA DO CONTROLE NEBULOSO	26
3.2	FUZZIFICAÇÃO	27
3.3	DEFUZZIFICAÇÃO	32
3.3.1	Defuzzificação por centro da área	32
3.3.2	Defuzzificação por centro do Máximo	32
3.3.3	Defuzzificação por média do máximo	33
3.4	REGRAS PARA CONTROLADORES NEBULOSO	33
3.5	CONTROLADORES NEBULOSOS	34
3.6	TABELA OU MAPA DE REGRAS NEBULOSO	36
<b>4</b>	<b>AMORTECEDOR MAGNETO-REOLÓGICO</b>	<b>39</b>
4.1	DESCRIÇÃO DO AMORTECEDOR	39
4.2	PRINCIPIO DO AMORTECEDOR	40
4.3	AMORTECEDORES MAGNETO-REOLÓGICO	41
4.4	CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO MR	41
4.4.1	Componentes do Fluido MR	42
4.4.2	Fluidos Base	42
4.4.3	Partículas de Metal	42
4.4.4	Aditivos Estabilizantes	42
4.5	CARACTERÍSTICAS DO AMORTECEDOR MAGNETO-REOLÓGICO	42
4.6	APLICAÇÃO DOS FLUÍDOS MAGNETO-REOLÓGICOS	43
4.6.1	Modo Válvula	44
4.6.2	Modo Cisalhamento	44
4.6.3	Modo Squeeze	45
4.7	FUNCIONAMENTO DO AMORTECEDOR MR	45
4.8	MODELOS MATEMÁTICOS PARA OS AMORTECEDORES MAGNETO-REOLÓGICOS	46
4.8.1	Modelo de Bingham para Amortecimento Controlável	46
4.8.2	Modelo de Bingham Modificado	47
4.8.3	Modelo de Bouc-Wen para Amortecedor MR	49
4.8.4	Modelo de Bouc-Wen Modificado para Amortecedor MR	49
4.8.5	Modelo Dependente da Corrente e da Histerese Aplicado ao Modelo de Bouc-Wen Modificado para Amortecedor MR	51
4.8.6	Modelo Matemático Proposto por LuCre	51
4.8.7	Modelo Nebuloso do Amortecedor MR Proposto por Tusset (2008)	52
4.8.8	Modelo Dependente da Corrente para Amortecedor MR	55
4.8.9	Modelo Dependente da Corrente e da Histerese Aplicado ao Modelo Bouc-Wen para Amortecedor MR	56
4.9	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS	57
<b>5</b>	<b>DINÂMICA E CONTROLE NEBULOSO DE UM MODELO NÃO LINEAR DE VEÍCULO COMPLETO</b>	<b>59</b>
5.1	MODELO MATEMÁTICO PARA MODELO DE UM VEÍCULO COMPLETO	60

5.2 PROPOSTA DE CONTROLE DA SUSPENSÃO CONSIDERANDO AMORTECEDORES MR E LÓGICA NEBULOSA .....	64
5.2.1 Projeto do Controlador Nebuloso da Força do Amortecedor MR .....	65
5.2.2 Projeto de Controle da Corrente Elétrica do MR .....	68
5.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO CONTROLE PROPOSTO.....	70
<b>6 PROJETO DO SISTEMA ELETRONICO DE CONTROLE DA CORRENTE DA BOBINA DO AMORTECEDOR MR.....</b>	<b>76</b>
6.1 DESCRIÇÃO DO MICROCONTROLADOR.....	76
6.1.1 Alimentação.....	77
6.1.2 Memória .....	78
6.1.3 Entrada e Saída .....	78
6.1.4 Comunicação .....	79
6.1.5 Programação.....	79
6.1.6 Descrição da Configuração para a Operação do PWM Arduino .....	79
6.1.7 Conversões do Sinal Digital/Analógico: Modulação por PWM .....	79
6.1.8 Justificativa do Uso <i>Arduino Nano V3</i> .....	82
6.2 UTILIZAÇÃO DE RECURSOS DO SIMULINK® PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA (N).....	82
6.3 UTILIZAÇÃO DE RECURSOS DO SIMULINK® PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA (A).....	83
6.4 CONFIGURAÇÃO DO MICROCONTROLADOR PARA LEITURA DE SINAL ANALÓGICO.....	85
6.4.1 Equação para Definição da Velocidade Velativa.....	85
6.4.2 Equação para Definição da Velocidade.....	86
6.4.3 Diagrama do Fluxo de Operações para Determinação da Força .....	87
6.4.4 Diagrama do Fluxo de Operações para Determinação da Corrente .....	88
6.5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	88
6.5.1 Circuito de Comando.....	89
6.5.2 Circuito de Força .....	90
6.5.3 Comunicação de Dados .....	91
6.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	92
6.6.1 Medição da Corrente Aplicada na Bobina do Amortecedor.....	92
6.6.2 Análise dos Resultados Experimentais Obtidos .....	93
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>
<b>APENDICE.....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente na indústria automobilística os requisitos não só dos usuários, mas da legislação e ambientes para veículos são cada vez maiores e complexos no quesito conforto e segurança, tendência essa, motivada pela inserção de sistemas eletrônicos com sistemas de controle mais sofisticados aplicados neste domínio.

Neste cenário, os controladores semi-ativos baseados em atuadores Magneto-Reológico (MR) passam a ser uma excelente opção, pois os amortecedores baseados nos fluidos MR já estão disponíveis comercialmente. Essa evolução deve-se a diversos estudos analíticos e experimentais realizados em grandes centros de pesquisa (CREWS et al., 2011).

Inúmeras são as aplicações comerciais de atuadores MR, distribuídas por diversas áreas: indústria automobilística, engenharia civil, medicina, indústria de eletroeletrônicos, máquinas industriais e indústria aeroespacial.

Assim os amortecedores MR vem nos últimos anos conquistando um excelente espaço em aplicação para amortecedores de veículos automotivos, devido às características importantes tais como: baixo consumo de energia, eficiência no controle de amortecimento (CREWS et al., 2011), podendo ser associado tanto do controle de amortecimento de um chassi do veículo quanto ao controle de estabilidade. Na dinâmica atual há várias montadoras automobilísticas usando essa tecnologia dos amortecedores MR, tais como: Ford Motor *Company*, Toyota Motor e Nissan Motor *Company* (CRIVELLARO, 2008).

A utilização de atuadores MR aplicado ao controle de movimentos e vibrações passa a ser uma opção a ser considerada por engenheiros. Visto que, além das vantagens de menor complexidade e maior confiabilidade sobre os sistemas ativos, devido ao tempo de resposta o qual em questão é de milésimos de segundos, há também uma grande variedade de produtos comerciais e pesquisas em outros tipos de aplicações.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Uma quantidade elevada de modelos analíticos, contendo diferentes descrições de funções, tem surgido com o objetivo em descrever ou representar as características não-lineares dos amortecedores. Dos modelos propostos um número significativo somente considera a variação da corrente em [0,0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5] Amperes (A), limitando as técnicas de controle no máximo em 6 possibilidades para a variação da força do amortecedor, não aproveitando as características não-lineares destes amortecedores.

Com o desenvolvimento desse trabalho busca-se alcançar um sistema de amortecimento que utilize uma gama maior de possibilidades do fluido MR, viabilizando sua aplicação nas áreas que utilizam fluídos MR, contribuindo com as aplicações de atuadores MR em diversas áreas: indústria automobilística, engenharia civil, medicina, indústria de eletroeletrônicos, máquinas industriais e indústria aeroespacial.

## 1.2 OBJETIVOS DO AUTOR

Considerando a eficiência de controladores nebulosos utilizados em trabalhos numéricos e experimentais e a limitação de atuadores para amortecedores MR, o objetivo deste trabalho é projetar e desenvolver um sistema eletrônico que controle a corrente elétrica de uma bobina que pode ser utilizada em um amortecedor MR considerando controle tanto dos sistemas mecânicos com elétricos através de controladores nebulosos. Para alcançar o objetivo principal foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a eficiência de um modelo Nebuloso que correlacione Força-Corrente elétrica, através de simulações numéricas, implementados em um microcontrolador;
- Analisar a eficiência de um controle Nebuloso que determine a força a ser aplicada no amortecedor MR.
- Implementar as estratégias de controle no microcontrolador;

- Ajustar as técnicas de controle implementadas no microcontrolador através de simulações computacionais de forma a viabilizar sua utilização sem sistemas reais.
- Montar um protótipo do sistema eletrônico que estime a força necessária no controle semi-ativo com MR e gere a corrente prevista em uma bobina.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte maneira:

- **Capítulo 1:** Introdução, objetivos e a justificativa do trabalho.
- **Capítulo 2:** Uma revisão bibliográfica de trabalhos relevantes do Magneto-Relológico (MR) e suas aplicações.
- **Capítulo 3:** Descrição dos controladores nebulosos.
- **Capítulo 4:** Descrição do funcionamento do amortecedor magneto-relógio, características e desempenhos do fluido magneto-relógio com apresentações dos seus principais modelos matemáticos, limitações das estratégias de controle tradicionais.
- **Capítulo 5:** Simulações numéricas da aplicação do controle Nebuloso no controle da força e da corrente elétrica de um amortecedor MR, considerando um modelo de veículo completo.
- **Capítulo 6:** Descrição do desenvolvimento eletrônico do projeto do controle do que pode ser utilizado em amortecedores MR. Resultados de simulações numéricas e experimentais.
- **Capítulo 7:** Considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considere o corpo humano como sendo uma sofisticada estrutura biomecânica, em que a sua exposição à vibrações e choques mecânicos como os proporcionados em deslocamentos com veículos, podem causar níveis desconforto e alterações fisiológicas indesejáveis, e a sensibilidade à vibração pode desencadear problemas de postura ergonômicas, causando dores nas costas e conseqüentemente mal estar. Controle das vibrações originadas pela estrada, devido ao contato estrada-roda, tais problemas podem ser evitados.

A magnitude da vibração encontrada em alguns veículos, situa-se entre  $0,2 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$  e  $2 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$  ou até mais. Estes valores dependem do tipo de pista (asfalto, sem pavimentação, acidentado) e do tipo de veículo (BALBINOT, 2001). O valor de rms pode ser obtido da seguinte equação:

$$rms = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum X_i^2\right)} \quad (2.1)$$

onde:

$N$  = Quantidade de amostras.

$X_i^2$  = coordenadas.

Para uma avaliação da severidade de todos os movimentos (determinísticos ou aleatórios, estacionários ou não estacionários, transientes ou de choque), a norma ISO 2631:1997, utiliza a equação (1.2), que leva em conta a relação entre a magnitude e a duração de todos os períodos. De acordo com Anflor, (2003) esta norma BS 6841, 1987 é ressaltada que VDV's suficientemente altos podem causar severos desconfortos, dores e ferimentos. Esta norma indica que magnitudes de vibração que produzam VDV's na faixa de  $8,5 \text{ [m/s}^{1,75}]$ , causam um desconforto considerado médio e para VDV's na faixa de  $15 \text{ [m/s}^{1,75}]$  geralmente causam desconforto considera severo. Mas não há um consenso por parte da comunidade científica em relação à influência da magnitude do VDV e o risco de ferimentos a que o corpo humano está exposto. Esta equação é conhecida como VDV (Valor Dose de Vibração).

$$VDV = \left( \frac{T}{N} \sum_{i=1}^N a_w^4 \right)^{1/4} \quad (2.2)$$

onde:

$VDV$  = Valor Dose de Vibração [ $m/s^{1,75}$ ];

$a_w$  = aceleração compensada, segundo a direção medida [ $m/s^2$ ];

$T$  = Período total de exposição [s].

A aceleração compensada pode ser obtida conforme a expressão (2.3).

$$a_w = \left[ \sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

onde  $W_i$  é o fator de compensação  $a_i$  é a aceleração em *rms* considerando as frequências dadas pelo Quadro 1, os pesos a serem utilizados podem ser obtidos pela Tabela 1.

**Quadro 1: Guia para avaliação das compensações.**

<i>Fator de compensação</i>	<i>Efeito na(o)</i>					
	<i>Saúde</i>		<i>Conforto</i>		<i>Percepção (fadiga)</i>	
	<i>eixos</i>	<i>postura</i>	<i>eixos</i>	<i>postura</i>	<i>eixos</i>	<i>postura</i>
$W_k$	z	sentado	z	sentado em pé	z	sentado em pé
$W_d$	x e y	sentado	x e y	sentado	x e y	sentado
			x e y	em pé	x e y	em pé

Fonte: Norma ISO 2631-1, 1997.

**Tabela 1: Compensações (fatores de compensação:  $W_k$  e  $W_d$ ) em um terço de oitava.**

Frequência [HZ]	$W_k(x10^3)$	$W_d(x10^3)$	Frequência [HZ]	$W_k(x10^3)$	$W_d(x10^3)$
1	482	1011	10	988	212
1,25	484	1008	12,5	902	161
1,6	494	968	16	768	125
2	531	890	20	638	100
2,5	631	776	25	513	80
3,15	804	642	31,5	405	63,2
4	967	512	40	314	49,4
5	1039	409	50	246	38,8
6,3	1054	323	63	186	29,5
8	1036	253	80	132	21,1

Fonte: Norma ISO 2631-1, (1997)

Várias são as pesquisas sobre o controle de vibrações nos sistemas de suspensões automotivas através de estudos analíticos, experimentais, ou simulações computacionais, que têm como objetivo melhorar o conforto e a segurança dos ocupantes do veículo utilizando técnicas de controle ativo ou semi-ativo. Dentro dessa perspectiva projetos de controle para suspensões veiculares através da utilização de amortecedores magneto-reológicos vem se destacando tanto no meio acadêmico como na indústria automobilística.

Os amortecedores MR tem oferecido muitos benefícios para controles ativos e semi-ativos e estão disponíveis comercialmente em alguns modelos de automóveis da GM, Audi, e Holden e sendo incorporados em veículos *off-road* mais pesados (CREWS, 2011).

Paré (1998) considerou um modelo de 1 grau de liberdade para o estudo teórico sobre amortecedor MR. Sendo analisada a eficiência do controle *skyhook*, *groundhook* e híbrido em uma bancada de testes. Para o experimento foi considerado a montagem de 4 amortecedores MR em um veículo de passeio para teste prático, concluindo que o amortecedor MR é efetivo na isolação da massa oscilante causada pela excitação na base e que o controle *skyhook* causa uma oscilação excessiva no movimento da massa oscilante, e que o controle semi-ativo MR híbrido soma as vantagens do controle *skyhook* e *groundhook*, sendo assim mais adequado ao uso.

Simon e Ahmadian (2001) utilizaram um modelo *quarter-car* com controle *skyhook* para verificar o efeito da atuação de um sistema de suspensão semi-ativa (MR). Nos testes de estrada constatou-se que o amortecedor MR pode causar grandes picos de aceleração e deslocamento, mas que amortece rapidamente a vibração e que o amortecedor semi-ativo MR geralmente causa redução da intensidade dos picos de aceleração, nas seguintes bandas de frequência, (1-4 Hz, 4-9 Hz, 9-14 Hz e 14-19 Hz). Esta redução é maior na banda de baixa frequência, a qual tem grande efeito sobre o conforto e estabilidade do veículo.

Moura (2003) analisou a aplicação do controle semi-ativo empregando controladores continuamente variáveis, considerando a aplicação do amortecedor MR. Simulações computacionais utilizando o Simulink do Matlab® foram realizadas considerando um modelo *half-car* (meio carro) para o sistema passivo, semi-ativo e ativo.

McManus et al., (2002), avaliaram o desempenho de um amortecedor MR na atenuação da vibração em um assento. Os resultados demonstraram que a utilização do amortecedor magneto-reológico diminui a vibração no assento. Para o caso de impacto como nos casos de buracos ou de obstáculos a redução da vibração chegou a 40% de VDV quando comparado com o amortecedor convencional.

Tusset (2008) propôs um controle semi-ativo de um modelo *quarter-car* não linear através do Controle Linear Feedback, sendo proposto um modelo *Nebuloso* para determinação da corrente elétrica aplicada na bobina do amortecedor MR. Os resultados numéricos demonstraram a eficiência do controle da vibração, diminuindo o tempo de exposição dos passageiros a vibração.

Em Tusset et al. (2006) é demonstrada a eficiência da estratégia de controle semi-ativo em um sistema de suspensão veicular, considerado um modelo não-linear de *quarter-car*, e a aplicação de um amortecedor MR. O controle foi realizado considerando a aplicação do controle ótimo e a aplicação do controle *Nebuloso*, as simulações computacionais mostram a eficiência do controle ativo e as vantagens tanto na utilização do controle ótimo, como na utilização do controle *Nebuloso*.

Silva et al. (2013) propôs um controle *Nebuloso* da suspensão de um modelo não linear de carro completo, considerando a utilização de amortecedor MR. Em primeiro lugar, o problema de controle *Nebuloso* é formulado, a fim de projetar o sinal de controle de força de amortecimento do amortecedor MR. Em seguida, é

utilizado um controle Nebuloso para transformar os valores da força de amortecimento em sinais elétricos aplicado na bobina do amortecedor MR. Os resultados que demonstram a eficiência da estratégia proposta é apresentada através de resultados numéricos.

O controle Nebuloso também foi utilizado por Pinheiro (2004), na estratégia de controle para sistemas de suspensão ativa automobilística, sendo comparado o controle Nebuloso com os controles *on / off*, continuamente variável e LQR. Os controles são comparados através de simulações numéricas e de testes experimentais. Para Pinheiro (2004) a estratégia com controle Nebuloso foi a que apresentou as melhores características dinâmicas. Apesar das regras do controle Nebuloso obtidas a partir dos conceitos do controle continuamente variável, o melhor desempenho do controle Nebuloso foi justificado devido a sistemas Nebuloso serem interpoladores universais de funções, e a escolha adequada das funções de pertinência permite minimizar eventuais descontinuidades na força do amortecedor ativo, reduzindo assim problemas de ruídos.

Li et al. (2004), realizou um estudo do controle de vibrações em um micro-ônibus através de amortecedores MR considerado um modelo *quarter-car* e o controle Nebuloso. O controle das vibrações consiste em controle e coordenação. No controle um controlador *Nebuloso* é projetado para cada roda considerando regras de um controle híbrido obtido, o controle *skyhook* e o controle *groundhook*. Na coordenação um controlador é projetado para coordenar os quatro controladores Nebuloso independentes, ajustando os parâmetros de entrada de cada controlador Nebuloso para um modelo *full-car* (carro completo). Resultados experimentais demonstraram que o controle *Nebuloso* é eficiente em reduzir a vibração vertical melhorando o conforto dos passageiros e a estabilidade de direção do veículo. Este sistema de controle também mostrou robustez com mudanças de parâmetros.

### 3 CONTROLADORES NEBULOSOS

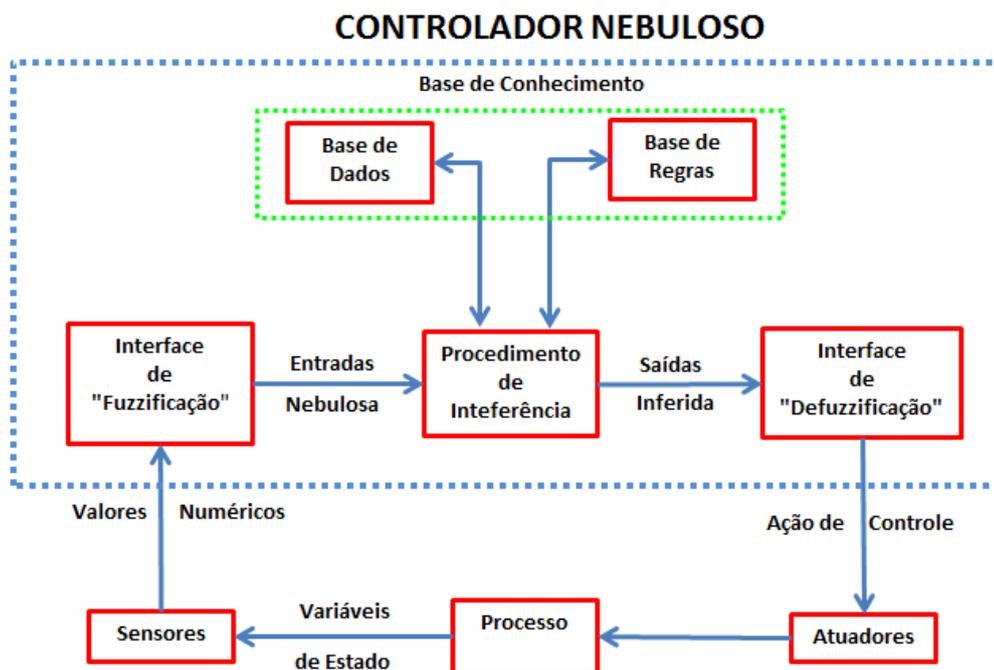
As técnicas de controle nebuloso originaram-se com as pesquisas e projetos de Mamdani, (1976) ganharam espaço como área de estudo em diversas instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento do mundo, sendo até hoje uma importante aplicação da teoria dos conjuntos nebulosos.

Ao contrário dos controladores convencionais em que o algoritmo de controle é descrito analiticamente por equações algébricas ou diferenciais, através de um modelo matemático, em controle nebuloso utilizam-se de regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo (ZADEH, 1965).

Os controladores nebulosos são robustos e de grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar (GUERRA, 1998).

Também são versáteis, principalmente quando o modelo físico é complexo e de difícil representação matemática. Em geral, os controladores nebulosos encontram maior utilidade em sistemas não-lineares, sendo capazes de superar perturbações e plantas com níveis de ruídos. Além disso, mesmo em sistemas onde a incerteza se faz presente de maneira intrínseca, agregam uma robustez característica. No entanto, provar determinadas propriedades de robustez é uma tarefa difícil neste tipo de abordagem.

A Figura 1 mostra a representação da estrutura básica de um controlador nebuloso, como descrito em Lee, (1990). Muitas variações são propostas na literatura de acordo com o objetivo do projeto, mas esse é um modelo geral o suficiente para a identificação dos módulos que o compõem, fornecendo uma ideia do fluxo da informação.



**Figura 1: Estrutura de um controlador nebuloso**  
 Fonte: Sandri; Correa (1999).

### 3.1 TEORIA DO CONTROLE NEBULOSO

A teoria dos conjuntos *Nebulosos* foi desenvolvida a partir de 1965 com os trabalhos de Lotfi Zadeh, professor na Universidade da Califórnia em Berkeley (SANDRI; CORREA, 1999). Os dois principais componentes de um sistema *Nebuloso* são sua estrutura e as funções de pertinência.

Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *Nebuloso* para valores discretos de uma variável em seu universo de discurso.

A quantidade de funções de pertinência em um universo de discurso e seu formato é escolhida com base na experiência que se tem do processo. Um número prático de funções de pertinência fica entre 2 e 7, pois, para números superiores de funções acarretam em maior demanda computacional (SHAW; SIMÕES, 1999).

Outro fator importante é o grau de superposição entre as funções de pertinência, sendo normalmente aplicadas superposições entre 25% e 75% com maior frequência 50% (SHAW; SIMÕES, 1999). Na Figura 2 pode ser observado um sistema *Nebuloso* com três funções de pertinência triangulares com superposição de 50%.

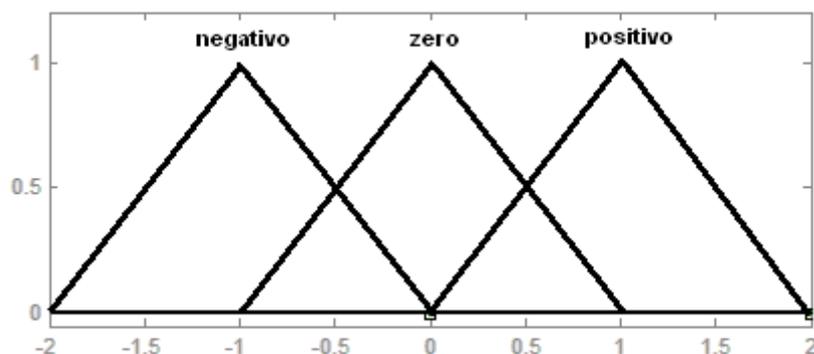


Figura 2: Superposição de funções de pertinência com 50%.

Fonte: Tusset (2008).

### 3.2 FUZZIFICAÇÃO

Fuzzificação é um mapeamento do domínio dos números reais para o domínio *Nebuloso*, representam, também, que há atribuição de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. Algumas das funções de pertinência comumente utilizada na literatura são: função triangular, a função trapezoidal, a função gaussiana, a função Bell, e a função sigmoïdal (TUSSET, 2008).

Função Triangular: definida por seu limite inferior  $a$ , superior  $b$  e pelo valor modal  $m$ , tal que  $a < m < b$ .

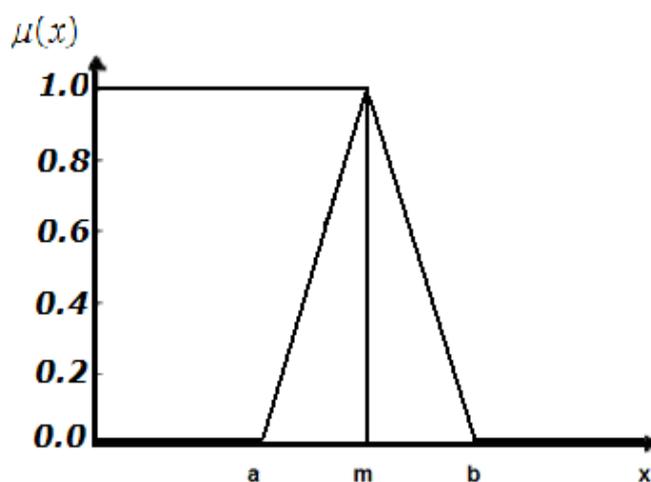


Figura 3: Função triangular  
Fonte: Tusset (2008).

A equação matemática da função triangular, pode ser observada em (3.1).

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (3.1)$$

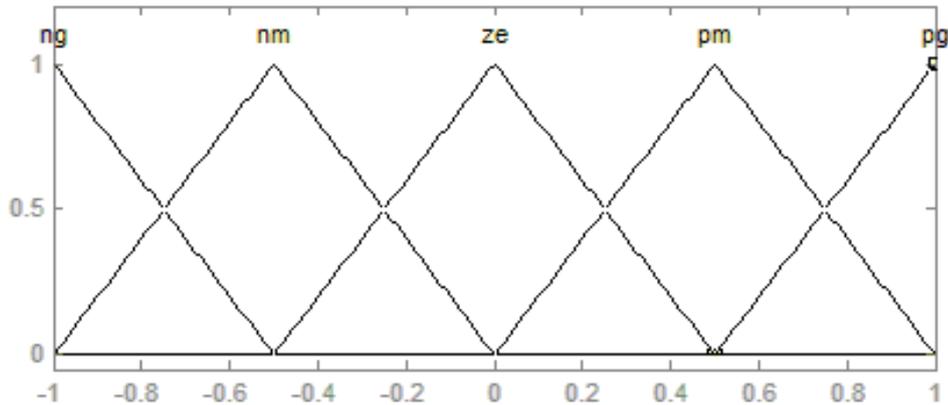


Figura 4: Fuzzificação por função triangular com 50% de superposição

Fonte: Tusset (2008).

Função Trapezoidal: definida por seu limite inferior  $a$ , superior  $b$  e pelos limites de seu suporte  $m$  (inferior) e  $n$  (superior), tal que  $a < m < n < b$ .

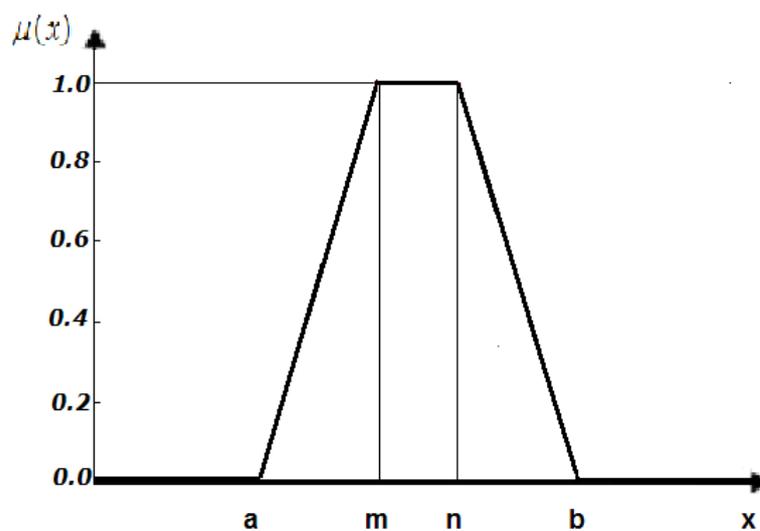


Figura 5: Função trapezoidal

Fonte: Tusset (2008).

A equação matemática da função trapezoidal pode ser observada em (3.2).

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m] \\ 1 & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (3.2)$$

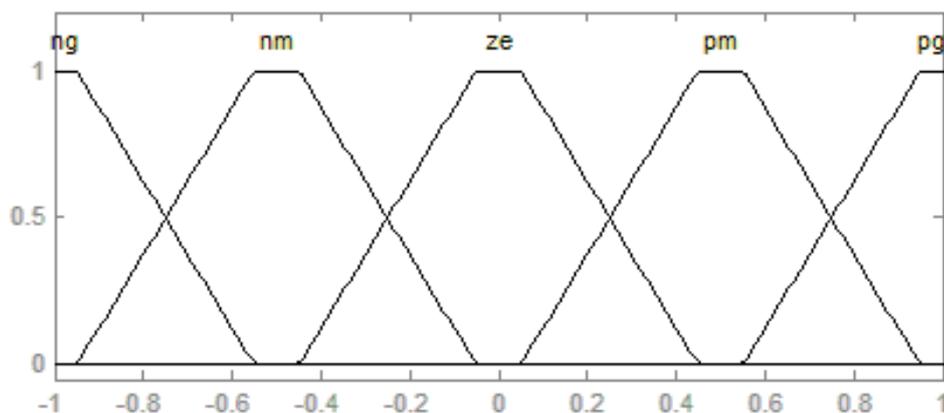


Figura 6: Fuzzificação por função trapezoidal com 50% de superposição

Fonte: Tusset (2008).

Função Gaussiana: definida por seu valor médio " $m$ " e pelo parâmetro  $k > 0$ , esta função é a típica função em forma de sino, em que quanto maior é o valor de  $k$ , mais estreito é o sino delineado pela função.

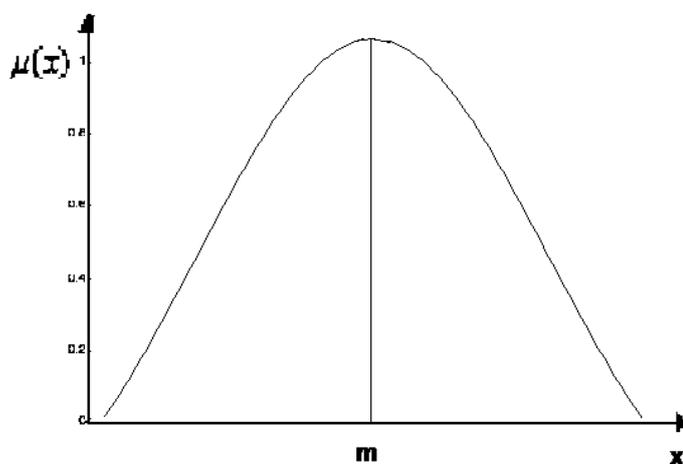
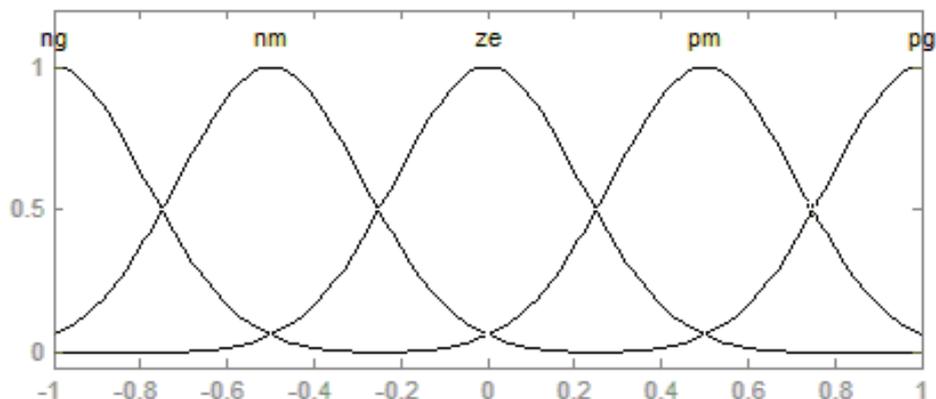


Figura 7: Função gaussiana

Fonte: Tusset (2008).

A equação matemática da função gaussiana pode ser observada em (3.3).

$$\mu(x) = e^{-k(x-m)^2} \quad \text{para } K > 0 \quad (3.3)$$



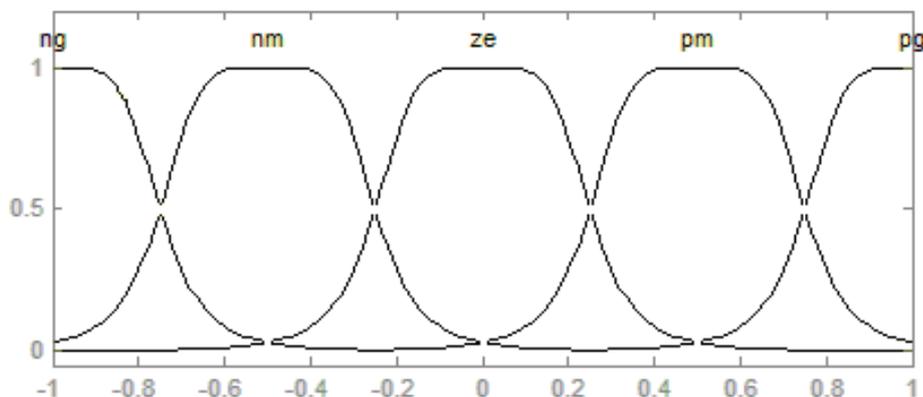
**Figura 8: Fuzzificação por função gaussiana com 50% de superposição**

Fonte: Tusset (2008).

A função Bell depende de três parâmetros  $a$ ,  $b$ , e  $c$  conforme a função (3.4), e é representada pela Figura 9.

$$f(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (3.4)$$

onde o parâmetro  $b$  é normalmente positivo. O parâmetro  $c$  localiza o centro da curva.

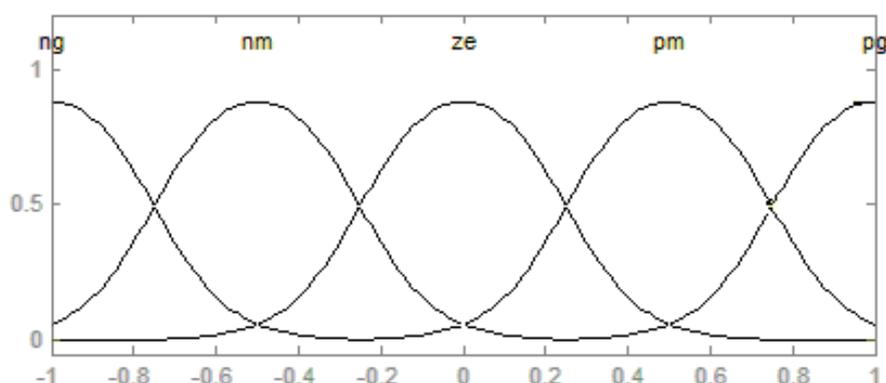


**Figura 9: Fuzzição por função Bell com 50% de superposição**

Fonte: Tusset (2008).

Função sigmoidal depende de dois parâmetros  $a$  e  $c$ , dependendo do sinal do parâmetro  $a$ , a função sigmoidal é aberta a direita ou à esquerda, a função Sigmoidal pode ser representada por (3.5), e é representada pela Figura 10.

$$f(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (3.5)$$



**Figura 10: Fuzzição por função sigmoidal com 50% de superposição**

Fonte: Tusset (2008).

Existe uma gama bastante variada de funções que podem e são utilizadas para representar as funções de pertinência difusas. Conforme Sazonov, (2003), qualquer tipo de distribuição de probabilidade contínua pode ser usada como uma função de pertinência *Nebuloso*.

### 3.3 DEFUZZIFICAÇÃO

Na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *Nebuloso* será traduzido num valor discreto, o objetivo é obter um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *Nebuloso* inferidos da variável linguísticas de saída, assim a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *Nebuloso* para o domínio discreto.

#### 3.3.1 Defuzzificação por Centro da Área

O método centro-da-área ou método do centro-de-gravidade calcula o centróide da área composta que representa o termo de saída *Nebuloso* ( $\mu_{out}$ ) que é composto pela união de todas as contribuições de regras. O cálculo é realizado utilizando a equação:

$$u_{coa} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{out}(u_i)} \quad (3.6)$$

Sendo  $\mu_{out}(u_i)$  a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *Nebuloso*,  $u_i$  posição do centróide da função de pertinência individual.

#### 3.3.2 Defuzzificação por Centro do Máximo

Neste método, os picos das funções de pertinência representados no universo de discurso, são usados ignorando-se as áreas das funções de pertinência, os valores não-nulos do vetor de possibilidade de saída são posicionados nos picos correspondentes, o valor de saída é determinado achando o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados, assim, as áreas das funções de pertinência não são utilizadas, apenas os máximos.

A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, conforme a equação:

$$u_{com} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(u_i)} \quad (3.7)$$

onde  $\mu_{o,k}(u_i)$  indica os pontos onde ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída. Este método, também, é chamado de defuzzificação pelas alturas. Os valores discretos do universo de discurso  $u_i$  amostrados em  $N$  pontos para todas  $n$  regras são somados e  $\mu_{o,k}(u_i)$  é o valor da pertinência para um dado valor de controle  $u_i$  consequente da  $k$ -ésima regra.

### 3.3.3 Defuzzificação por média do máximo

A defuzzificação por média-do-máximo (m-o-m) utiliza a saída cujo valor tenha o maior valor de pertinência  $\mu_{out}(u_i)$ , mas em casos em que a função de pertinência tenha mais de um máximo, esta idéia não serve. Pode-se então, tomar a média de todos os máximos:

$$u_{mom} = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (3.8)$$

onde  $u_m$  é o  $m$ -ésimo elemento no universo de discurso de forma que a função  $\mu_{out}(u_i)$  tenha um máximo e  $M$  é o número total desses elementos.

## 3.4 REGRAS PARA CONTROLADORES NEBULOSO

Basicamente, há dois tipos de implicações *Nebuloso*, que são chamadas de regras de inferência, o *modus ponens* (modo afirmativo) e o *modus tollens* (modelo negativo), ambos operando de forma a se basear em premissas ou condições, as quais geram uma determinada consequência.

Sendo que cada regra é representada por uma afirmação se então, onde o antecedente e o consequente consistem de proposições combinadas pelos conectivos lógicos "e" ou "ou". Considerando a regra:

Se  $x_1 = A_1$  e (ou)  $x_2 = A_2$  então  $y = B$

### 3.5 CONTROLADORES NEBULOSOS

Para Driankov *et al.*, (1993), os tipos de controladores *Nebulosos* encontrados na literatura podem ser classificados como os modelos clássicos, compreendendo o modelo de Mamdani, e os modelos de interpolação, compreendendo o modelo de Takagi-Sugeno, ambas disponíveis na biblioteca do MathWorks®.

A forma e a representação destes controladores podem ser observadas nas Figuras 11 e 12.

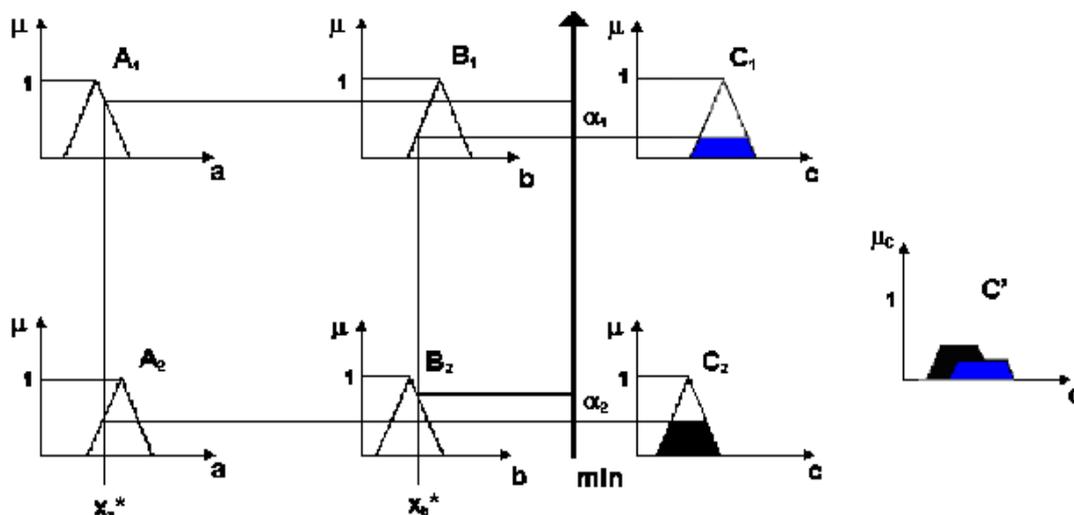


Figura 11: Modelo clássico de Mamdani.  
Fonte: Sandri; Correa, (1999).

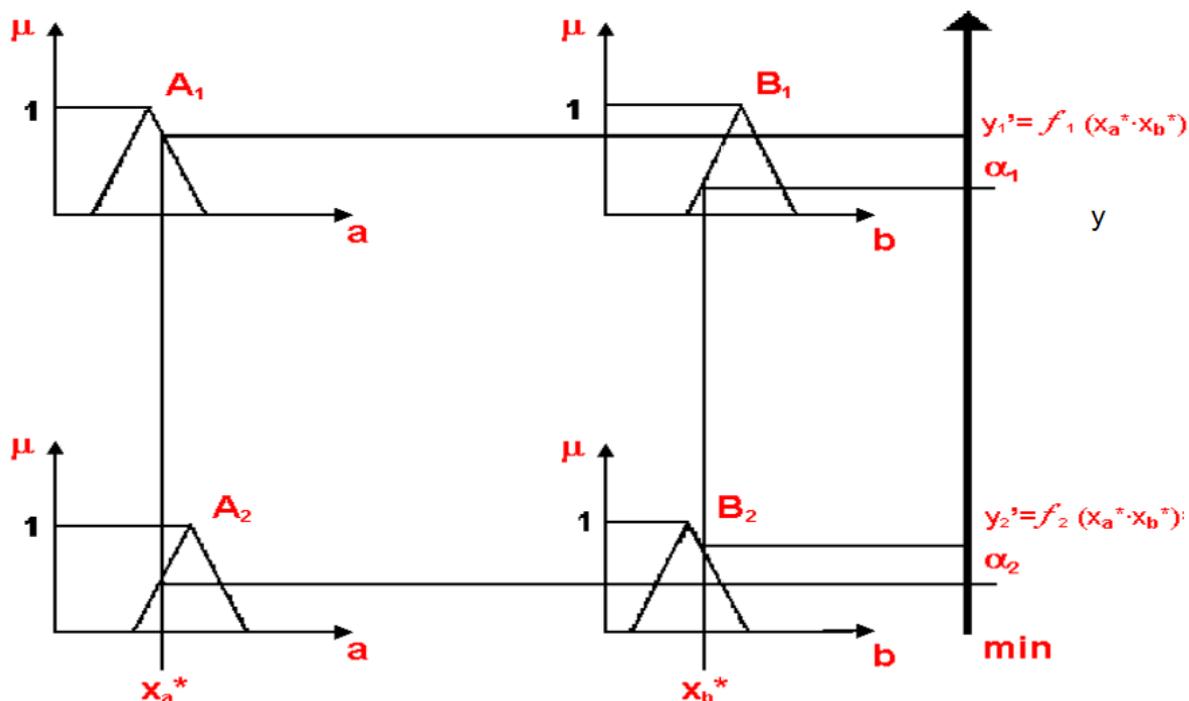


Figura 12 - Modelo de interpolação de Takagi-Sugeno.  
Fonte: Sandri; Correa, (1999).

onde:

$$f_1(x_a^* \cdot x_b^*) = d_0 + d_1 x_a^* + d_2 x_b^* \text{ e } f_2(x_a^* \cdot x_b^*) = c_0 + c_1 x_a^* + c_2 x_b^*. \quad (3.9)$$

Conforme Mamdani e Assilian, (1975), a regra do tipo Mamdani possui a seguinte forma:

$$r_k: \text{ se } x_1 \text{ é } A_1^k \text{ e } \dots \text{ e } x_{N_x} \text{ é } A_{N_x}^k \text{ então } y_1 \text{ é } B_1^k \text{ e } \dots \text{ e } y_{N_x} \text{ é } B_{N_x}^k$$

Normalmente, uma regra Mamdani utiliza o operador *min* para a implicação entre as proposições das regras e o operador *max* para a agregação.

Conforme Takagi e Sugero, (1983), Teixeira, (2001), as regras do tipo Sugero têm a seguinte forma:

$$\begin{aligned} r_1: & \text{ se } x_1 \text{ é } A_{1,k} \text{ e } \dots \text{ e } x_{n,k} \text{ é } A_{N_x,k} \text{ então } u_1 = f_{1,k}(x_1, \dots, x_{n_x}), \dots, f_{N_x,k}(x_1, \dots, x_{n_x}) \\ & \vdots \\ r_k: & \text{ se } x_1 \text{ é } A_{1,k} \text{ e } \dots \text{ e } x_{n,k} \text{ é } A_{N_x,k} \text{ então } u_k = f_{1,k}(x_1, \dots, x_{n_x}), \dots, f_{N_x,k}(x_1, \dots, x_{n_x}) \end{aligned}$$

sendo  $f_{Nx,k}(x_1, \dots, x_{Nx})$  a função que modela a combinação linear das entradas, então:

$$u_s = b_{0,k} + \sum_{i=1}^{Nx} b_{i,k} x_i \quad (3.10)$$

sendo  $b_{i,k}$  e  $b_{0,k}$ , parâmetros constantes.

Assim as entradas  $x_1, x_2, \dots, x_{Nx}$ , referentes a um dado estado do sistema a ser controlado, são inferidas para cada proposição dos antecedentes das regras. Então, os graus de pertinência das proposições de cada regra são obtidos. Para cada regra escolhe-se o valor mínimo das funções de pertinências inferidas, ou seja, a primeira regra tem uma pertinência resultante  $\mu_{u1}(x_1, \dots, x_{Nx})$ , assim até a última regra com pertinência resultante  $\mu_{uk}(x_1, \dots, x_{Nx})$ .

Quando não é necessária a agregação dos conjuntos resultantes das implicações de cada regra o resultado pode ser obtido de:

$$u_s = \frac{\sum_{i=1}^k u_{u_i} u_i}{\sum_{i=1}^k u_{u_i}} \quad (3.11)$$

Conforme Teixeira, (2001), pode-se concluir que a regra de Mamdani é mais intuitiva e que representa melhor a idéia humana, mas, a regra de Sugero apresenta maior eficiência computacional por não depender de implementação numérica para cálculo de áreas.

### 3.6 TABELA OU MAPA DE REGRAS NEBULOSO

O mapa de regras *Nebuloso* é idêntico à base de regras de inferência *Nebuloso*. O mapa de regras *Nebuloso* é a base do conhecimento e depósito da inteligência. As entradas da matriz de regras são preenchidas durante a identificação do sistema *Nebuloso*, quando são identificadas as operações do controle do processo (SHAW; SIMÕES, 1999). No Quadro 2 estão definidas as regras de

inferência relativas a duas entradas, a Velocidade Relativa e a Força e uma saída que é a corrente elétrica.

**Quadro 2: Mapa de regras Nebuloso.**

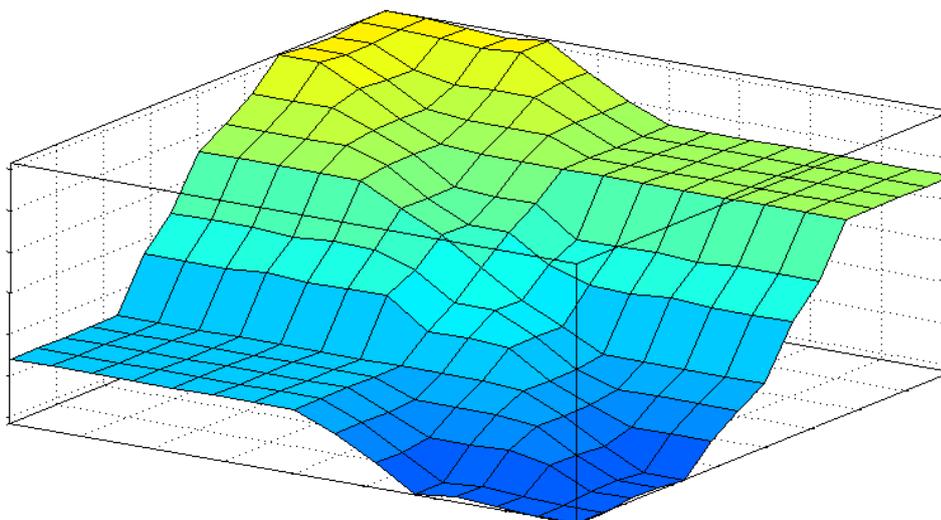
<i>F</i>		<i>V</i>				
		<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>ZE</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>
<i>V<sub>rel</sub></i>	<i>NG</i>	NG	NG	NM	NM	NM
	<i>NM</i>	NG	NM	NM	NM	NM
	<i>ZE</i>	NM	NM	ZE	PM	PM
	<i>PM</i>	PM	PM	PM	PM	PG
	<i>PG</i>	PM	PM	PM	PG	PG

Fonte: SILVA et al., 2013.

onde: as variáveis linguísticas representam: **NG**: Negativo grande; **NM**: Negativo médio; **ZE**: Zero; **PM**: Positivo médio; **PG**: Positivo grande. Assim para o caso de:

**SE** Velocidade Relativa = (PM) **E** Velocidade = (ZE) **ENTÃO** Força = (PM)

O mapa de regras *Nebuloso* representado pelo Quadro 2, sendo um arranjo representando todas as combinações de variáveis de entrada e saída, em termos de seus conjuntos *Nebulosos* linguísticos, sendo que para a variável linguística velocidade relativa tem-se 5 possibilidades e para a velocidade tem-se 5 possibilidades, resultando em 25 regras *Nebuloso* para o controle. A superfície de controle dimensional para 25 regras do Quadro 2 pode ser observada na Figura 13.



**Figura 13: Superfície de controle dimensional para 25 regras.**

**Fonte: Própria autoria.**

Como podemos verificar na Figura 13 a disposição das 25 regras. Como a variação das velocidades, como resultado o valor da força a ser aplicado no amortecedor MR.

## 4 AMORTECEDOR MAGNETO-REOLÓGICO

### 4.1 DESCRIÇÃO DO AMORTECEDOR

Amortecedor é o componente do sistema elástico que opõe resistência ao movimento vibratório dissipando energia. Sua concepção é tal que não possui massa nem rigidez. Na prática, existem formas distintas de se dissipar energia (amortecimento) dos sistemas sob a forma de calor e/ou som, e conforme isto ocorra teremos modelos distintos de amortecimento conforme a seguir descrito (SOEIRO, 2008):

- **Amortecimento Viscoso:** é o que mais ocorre na prática da Engenharia, caracteriza-se pelo atrito entre um sólido (uma peça) e um fluido (óleo lubrificante) interposto entre as peças móveis do sistema. O fluido apresenta alta viscosidade, sendo que a força de atrito viscoso é proporcional à velocidade relativa entre o sólido e o fluido (SOEIRO, 2008).

$$F = c\dot{x} \text{ ou } M = c_t\dot{\theta} \quad (4.1)$$

onde que  $c$  e  $c_t$  são os coeficientes de amortecimento viscoso, cujas unidades no SI são, respectivamente, [N.s/m] e [N.m.s/rad].

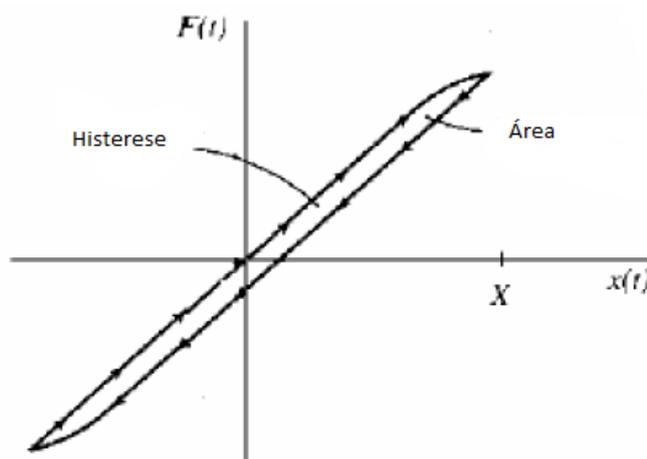
- **Amortecimento Seco ou de Coulomb:** resulta do atrito entre dois sólidos sem lubrificação ou com muita pouca lubrificação. A força de amortecimento é igual à força de atrito entre as superfícies, ou seja (SOEIRO, 2008):

$$F = \mu N \quad (4.2)$$

$\mu$  (adimensional) é o coeficiente de atrito dinâmico entre as superfícies em contato e  $N$  é a força normal entre as superfícies.

- **Amortecimento Estrutural ou Material ou Histerese:** ocorre pelo atrito interno entre moléculas quando o sólido é deformado, fazendo com que a

energia seja dissipada pelo material sob a forma de calor e/ou som. A medida do amortecimento estrutural é dada pela amplitude  $X$  da tensão reinante durante a deformação, conforme Figura 14 (SOEIRO, 2008).



**Figura 14: Amortecimento Histerese.**  
**Fonte: Soeiro, (2008)**

onde:

$$F = \text{Força de amortecimento [N]}$$

#### 4.2 PRINCIPIO DO AMORTECEDOR

O amortecedor é instalado entre o chassi do carro e a roda, sendo um dos principais componentes do sistema de suspensão do veículo. Quando a roda se movimenta verticalmente por causa das irregularidades da superfície da estrada, a haste do amortecedor também se movimenta no mesmo sentido. Este movimento faz o óleo contido no amortecedor se movimentar pelos tubos de pressão e reservatório, atravessando as válvulas do pistão e de base. A resistência do óleo ao passar pelas válvulas cria uma pressão a qual chamamos tecnicamente de carga, responsável por controlar os movimentos do veículo.

O amortecedor segue o princípio da física que diz "a energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada", onde a energia cinética, gerada pela movimentação, se transforma em energia térmica, gerando calor (MONROE, 2014).

### 4.3 AMORTECEDORES MAGNETO-REOLÓGICO

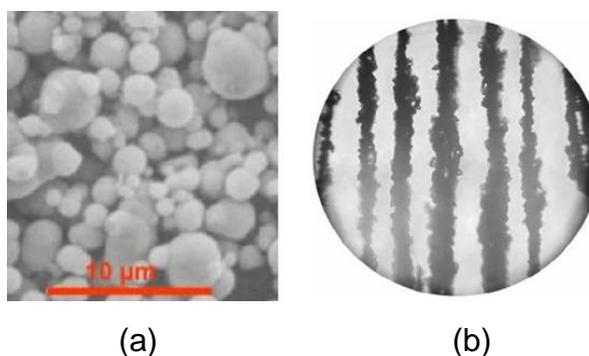
Amortecedores MR são semelhantes aos amortecedores convencionais. Na condição de não magnetizado, o fluido pode passar através do orifício, mas quando a suspensão é necessária, a bobina é ligada e inicia-se a passagem de corrente através das bobinas, e desenvolve-se um campo magnético.

Devido ao efeito deste campo magnético, o fluido no orifício se comporta como um semi-sólido e oferece resistência ao fluxo de fluido (RAGHAVENDRA *et al.*, 2011).

### 4.4 CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO MR

De acordo como com Spaggiari (2012), os fluidos magnetos reológicos (MR) são constituídos por materiais líquidos, inteligentes e controláveis, embora à uma primeira vista não pareçam tão impressionantes. São misturas de partículas não coloidal ferromagnéticas dispersas aleatoriamente em óleo ou água, além de alguns aditivos inseridos para evitar a sedimentação das partículas em suspensão. Em aspecto geral é como uma lama bastante pesada e gordurosa, sendo muitas vezes mais densos que a água.

As partículas ferromagnéticas na presença de um campo de indução, passam a adquirir um dipolo magnético, em seguida, deslocam-se e se reformulam dando início a um arranjo de fluxo de forma a formar cadeias microscópicas, como efeito altera-se a viscosidade do fluido (BARANWAL; DESHMUKH, 2012).



**Figura 15 : (a) Microfotografia MR sem campo magnético, (b). Microfotografia MR com um campo magnético aplicado com cadeias paralelas de ferro carbônio.**

**Fonte: Spaggiari, (2012).**

#### 4.4.1 Componentes do Fluido MR

Basicamente o fluido MR é composto por três componentes: fluido base, partículas de metal e aditivos estabilizantes (LORD, 2014). Os três componentes de um fluido MR vão definir o comportamento magneto reológico. Alteração de qualquer um dos componentes irá resultar em mudanças reológicas e propriedades magneto reológicas do fluido MR.

#### 4.4.2 Fluidos Base

Fluídos base mais utilizados são os óleos de hidrocarbonetos, óleos minerais e óleos de silicone. O fluido MR base deve ter uma viscosidade baixa e não deve variar com a temperatura. Na presença de partículas suspensas o fluido se torna mais espesso, cerca de três vezes mais denso que a água (TUSSET, 2008).

#### 4.4.3 Partículas de Metal

Para a utilização adequada desta tecnologia é necessário partículas metálicas que possam ser magnetizadas facilmente e rapidamente. Partículas metálicas usadas no MR-tecnologia são muito pequenas na ordem de 1  $\mu\text{m}$  a 7 $\mu\text{m}$ . Partículas de metais comumente utilizados são o ferro carbonila, o pó de ferro e ligas de ferro cobalto.

Partículas metálicas destes materiais têm a propriedade de atingir alta saturação magnética devido a sua capacidade de formar uma forte corrente de magnetização. A concentração de partículas magnéticas em fluido de base pode chegar a 50%.

#### 4.4.4 Aditivos Estabilizantes

É necessário adicionar ao fluido base com as partículas metálicas, um aditivo o qual tem a principal função de reduzir a sedimentação das partículas metálicas.

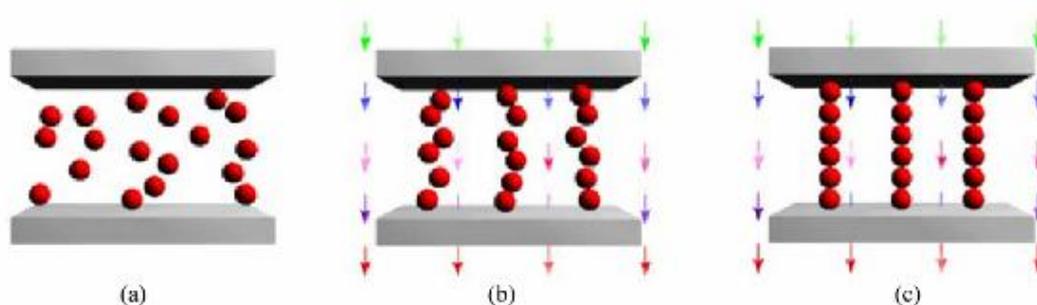
### 4.5 CARACTERÍSTICAS DO AMORTECEDOR MAGNETO-REOLÓGICO

O fluido MR é considerado inteligente devido as suas propriedades serem controladas através da presença de campo magnético, o porquê desse controle de

viscosidade ser dessa forma, é que na ausência de campo magnético, ele se comporta como se fosse um fluido base, sendo um pouco mais grosso, devido as partículas de metal.

Quando um campo magnético é aplicado a cada partícula de metal torna-se um dipolo alinhando-se ao longo da direção do campo magnético. Dessa forma uma cadeia é estruturada e formada ao longo da linha de fluxo magnético que proporciona uma resistência mecânica ao fluxo, resultando num aumento da viscosidade do fluido. Essa resistência mecânica criada devido à coluna de cadeia confere escoamento para o fluido, tornando-o rígido como um semi-sólido. Esta rigidez e, conseqüentemente a força de rendimento depende da intensidade do campo magnético e também da qualidade e quantidade de partículas de metal.

O efeito do MR é reversível, e quando o campo magnético é removido, o fluido regressa ao seu estado original. Os fluidos MR com suas propriedades controláveis são úteis na implementação do conceito do fluido inteligente, aos quais podem ser controláveis eletricamente.



**Figura 16: (a) Aplicação do campo magnético. (b) Campo magnético atuando. (c) partículas ferrosas alinhadas com o campo magnético.**  
 Fonte: Koo, (2003).

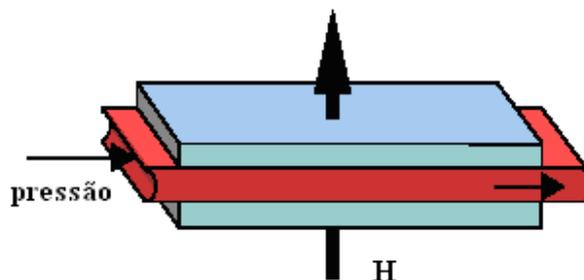
#### 4.6 APLICAÇÃO DOS FLUÍDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

Os modos de operação dos amortecedores MR são definidos de acordo com o tipo de fluxo de fluido, sendo:

- i. Modo Válvula
- ii. Modo Cisalhamento
- iii. Modo Squeeze.

#### 4.6.1 Modo Válvula

Neste modo de operação o fluxo do fluido ocorre através de duas superfícies fixas e o campo magnético é aplicado perpendicularmente à direção do fluxo, conforme ilustra a Figura 17.



**Figura 17 : Modo válvula.**  
Fonte: Tuset, (2008).

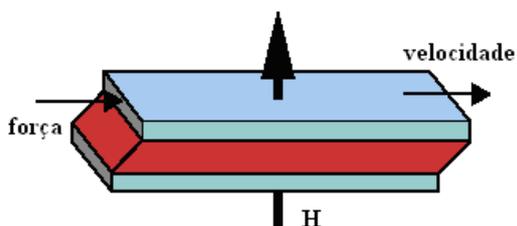
onde:

$H$ = Sentido da corrente elétrica (A).

A resistência do fluido pode ser controlada através da intensidade do campo magnético. Este modo é usado em vários tipos de amortecedores e tem vasta aplicação na indústria automobilística. (KASEMI, 2012).

#### 4.6.2 Modo Cisalhamento

Neste modo, o fluxo de fluido entre as superfícies têm movimento relativo, e um campo magnético é aplicado perpendicularmente à direção do fluxo.



**Figura 18 Modo de cisalhamento de operação MRF.**  
Fonte: Tuset, ( 2008).

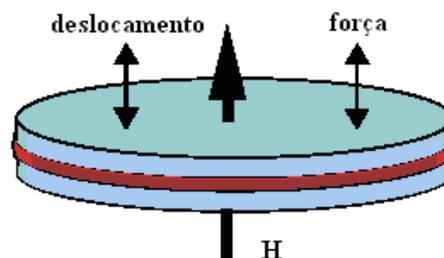
onde:

$H$ = Sentido da corrente elétrica (A).

Este modo é usado em vários tipos de sistemas de embreagens de veículos (BARANWAL; DESHMUKH 2012). Neste modo, a força total de corte desenvolvida é a soma da força desenvolvida devido à viscosidade do fluido e a força desenvolvida, devido ao campo magnético.

#### 4.6.3 Modo Squeeze

Este modo é usado para aplicações de baixo movimento e força alta.

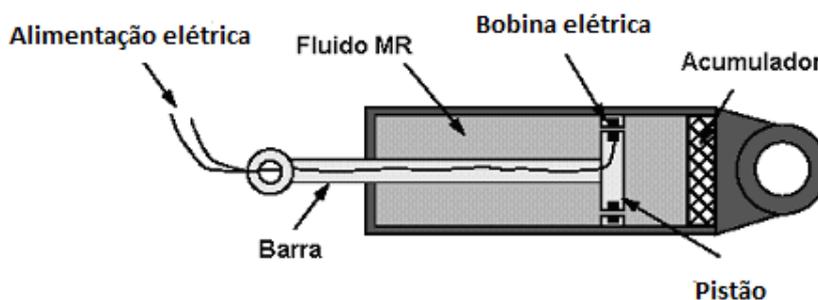


**Figura 19: Modo de operação Squeeze mrf.**  
**Fonte: Tuset, (2009).**

Este modo pode ser usado para controle de pequenos movimentos. Este sistema pode ser configurado para operação axial ou rotatório. O grau de tensão desenvolvida neste modo é de aproximadamente dez vezes superior aos demais.

#### 4.7 FUNCIONAMENTO DO AMORTECEDOR MR

As propriedades magnéticas do fluido permitem seu uso como um amortecedor controlado por uma tensão elétrica [V] ou uma corrente elétrica [A]. Na Figura 20 podemos observar a estrutura com seus principais componentes constituintes para um amortecedor MR.



**Figura 20: Amortecedor MR.**  
**Fonte: Medina, (2008).**

O princípio de operação para um amortecedor MR é descrito a seguir.

Quando a haste do pistão entrar no alojamento, o fluido MR atravessa a abertura do orifício anulando para o outro lado do reservatório. No amortecedor descrito na Figura 18, há duas regiões de ativação as quais resistem ao fluxo de fluido de um lado do pistão para o outro lado quando um campo magnético está presente. Como aumenta a força do campo magnético, a resistência para o fluxo do fluido nas regiões de ativação também aumenta até atingir uma corrente de saturação. A função do acumulador é acomodar mudanças de volume resultante da haste do pistão. O pistão do acumulador provê uma barreira em o fluido MR e um gás comprimido que normalmente é nitrogênio, o que acomoda as mudanças de volume quando a haste do pistão entrar no acumulador (KOO, 2003).

A corrente de saturação acontece quando se aumenta a corrente elétrica e não aumenta a força de amortecimento para uma determinada velocidade.

#### 4.8 MODELOS MATEMÁTICOS PARA OS AMORTECEDORES MAGNETO-REOLÓGICOS

Um número grande de modelos analíticos baseados em diferentes descrições de funções tem surgido com o objeto de descrever as propriedades não-lineares dos amortecedores MR (MCMANUS *et al.*, 2002).

##### 4.8.1 Modelo de Bingham para Amortecimento Controlável

Stanway, *et al.* (1985, 1987), Spencer *et al.* (1997), propuseram o modelo mecânico denominado de Modelo de Bingham. O qual consiste em um componente

que represente a fricção de Coulomb em paralelo com um amortecedor viscoso, conforme Figura 21.

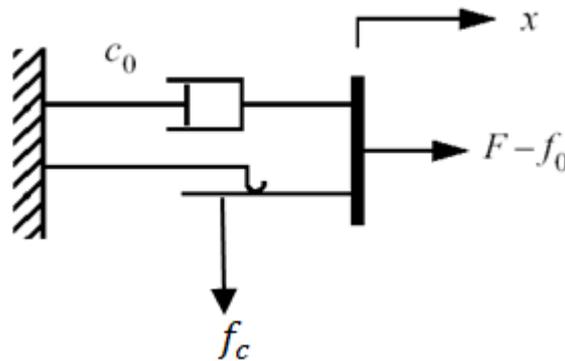


Figura 21 : Modelo de bingham para amortecimento controlável proposto por Stanway, et al., 1987.

Fonte: Spencer *et al.*, (1997).

O modelo matemático que representa a dinâmica do sistema a Figura 21 é dado por:

$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (4.3)$$

Sendo  $c_0$  o coeficiente de amortecimento viscoso,  $f_c$  é a amplitude da força de atrito de Coulomb, e  $f_0$  representa o acumulador do amortecedor.

#### 4.8.2 Modelo de Bingham Modificado

Gamota e Filisko (1991) propuseram uma extensão ao modelo de Bingham, sendo que o novo modelo composto por um elemento de fricção em paralelo com um amortecedor viscoso em série com um sistema linear que representa um elemento através de amortecedor e molas.

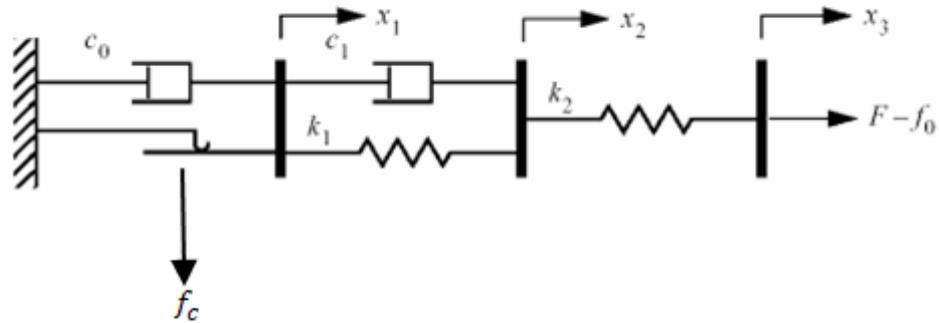


Figura 22: modelo proposto por Gamota e Filisko, 1991.  
Fonte: Spencer *et al.*, (1997).

As equações dinâmicas que representam o modelo são agora denotadas por:

Quando:  $|F| > f_c$ , temos:

$$F = k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 = c_0\dot{x}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 = k_2(x_3 - x_2) + f_0 \quad (4.4)$$

Quando a inequação é satisfeita:  $|F| \leq f_c$ , temos:

$$F = k_1(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_2 + f_0 = k_2(x_3 - x_2) + f_0 \quad (4.5)$$

onde:  $F$  é a força total do amortecedor [N],  $c_0$  é o coeficiente de amortecimento viscoso associado com o modelo de Bingham [Ns/m],  $k_1$  e  $k_2$  são os coeficientes de rigidez [N/m] e  $c_1$  coeficiente de amortecimento viscoso [Ns/m],  $f_0$  é a força que representa a presença do acumulador do amortecedor [N],  $f_c$  é a força de atrito de Coulomb [N],  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  são respectivamente as variáveis de estado de deslocamentos [m] e  $\dot{x}_1$  e  $\dot{x}_2$  são as variáveis de estado velocidade de deslocamento [m/s] (TUSSET, 2008; BUTZ; STRYK, 2002).

#### 4.8.3 Modelo de Bouc-Wen para Amortecedor MR

O modelo de Bouc-Wen é considerado extremamente versátil e pode exibir o comportamento de histerese (SPENCER et al., 1997). A Figura 23 mostra o esquema do modelo:

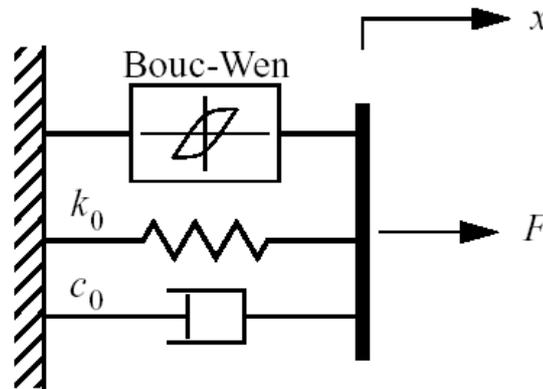


Figura 23: Modelo Bouc-Wen para amortecedor MR. Fonte: Spencer et al., (1997).

A força  $F$  é determinada por:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (4.6)$$

onde  $z$  é obtido da equação (Spencer et al., 1997):

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (4.7)$$

Os parâmetros do modelo são:  $\alpha$  [ $N/m$ ],  $c_0$  [ $Ns/m$ ],  $k_0$  [ $N/m$ ],  $\gamma$  [ $m^{-2}$ ],  $\beta$  [ $m^{-2}$ ],  $x_0$  [ $m$ ], e as constantes  $n$  e  $A$  que dependem das características do amortecedor.

#### 4.8.4 Modelo de Bouc-Wen Modificado para Amortecedor MR

O comportamento de histerese do amortecedor é descrito pelo modelo de Bouc-Wen. Spencer et al., 1997, propôs algumas alterações no modelo Bouc-Wen para determinar o comportamento do modelo mecânico do amortecedor MR, como pode ser observado na Figura 24 (LIAO; LAI, 2002):

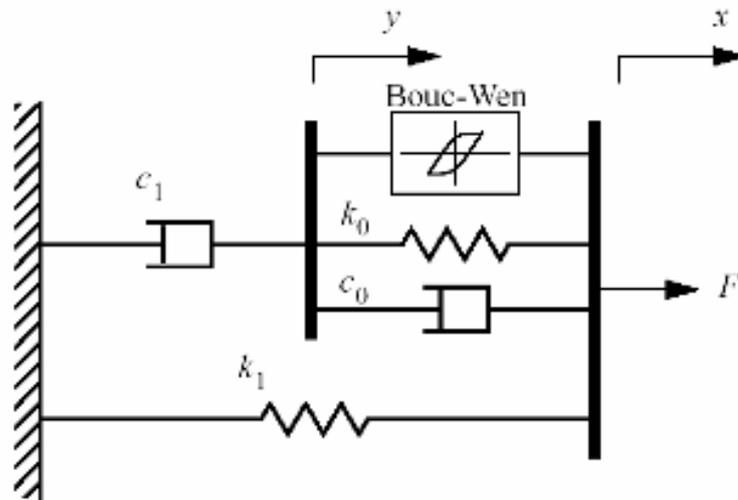


Figura 24: Modelo mecânico de um amortecedor MR proposto por Spencer *et al.*, 1997. Fonte: Liao; Lai, (2002).

A força  $F$  pode ser escrita como:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (4.8)$$

a variável  $\dot{y}$  pode ser obtida de:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + k_0(x - y) + c_0 \dot{x}] \quad (4.9)$$

a variável  $z$  pode ser obtida de:

$$\dot{z} = \gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} z - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (4.10)$$

Os parâmetros do modelo são:  $\alpha$  [ $N/m$ ],  $c_0$  [ $Ns/m$ ],  $c_1$  [ $Ns/m$ ],  $k_0$  [ $N/m$ ],  $k_1$  [ $N/m$ ],  $\gamma$  [ $m^{-2}$ ],  $\beta$  [ $m^{-2}$ ],  $x_0$  [ $m$ ], e as constantes  $n$  e  $A$  que dependem das características do amortecedor.

#### 4.8.5 Modelo Dependente da Corrente e da Histerese Aplicado ao Modelo de Bouc-Wen Modificado para Amortecedor MR

O modelo dependente da corrente e da histerese aplicado ao modelo de Bouc-Wen modificado pode ser escrito da seguinte forma:

$$F = \left( 1 + \frac{k_2}{1 + e^{-a_2(i+I_0)}} - \frac{k_2}{1 + e^{-a_2I_0}} \right) (\alpha z + c_0 \dot{x} + (k_0 + k_1)x + k_1 y); i \geq 0 \quad (4.11)$$

onde  $k_2$  e  $a_2$  são constantes positivas, e  $I_0$  é uma constante arbitrária que pode ser obtida dos dados obtidos experimentalmente,  $c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u$  e  $\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u$ .

$z$  pode ser obtida da equação:

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta\dot{x}|z|^n - \gamma|\dot{x}||z|^{n-1}z \quad (4.12)$$

#### 4.8.6 Modelo Matemático Proposto por LuCre

Para esse modelo do amortecedor MR, a força é expressa pela equação (JIMÉNEZ; ÁLVAREZ-ICAZA, 2003; PICCIRILLO *et al.*, 2014):

$$F = \sigma_a z + \sigma_0 z v + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{x} + \sigma_b \dot{x} v \quad (4.13)$$

onde  $v$  é a tensão elétrica aplicada na bobina do amortecedor.

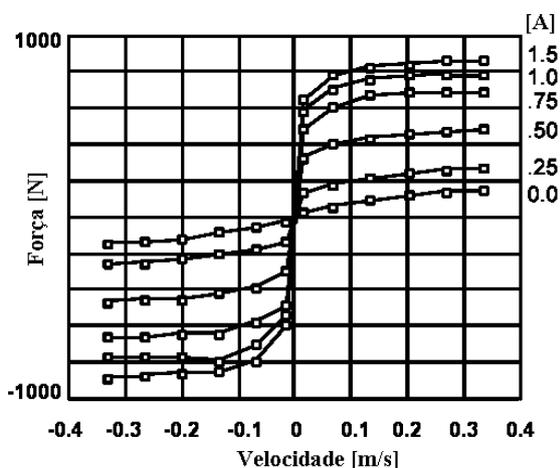
A variável  $z$  pode ser determinada pela integração temporal da equação (JIMÉNEZ; ÁLVAREZ-ICAZA, 2003; PICCIRILLO *et al.*, 2014):

$$\dot{z} = x - \alpha_0 a_0 |\dot{x}| \quad (4.14)$$

onde:  $\sigma_a$  [N/m],  $\sigma_0$  [N/m.v],  $\sigma_1$  [N.s/m],  $\sigma_2$  [N.s/m],  $\sigma_b$  [N.s/m.v],  $a_0$  [v/N].

#### 4.8.7 Modelo Nebuloso do Amortecedor MR Proposto por Tuset (2008)

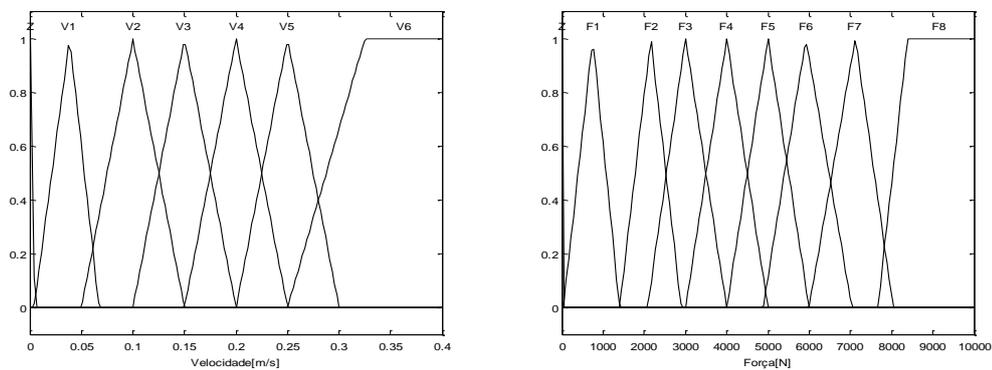
O modelo Nebuloso do amortecedor MR é proposto por Tuset (2008), considerando a dinâmica da Figura 25. Sendo consideradas como simétricas as curvas da variação da força de amortecimento em função da velocidade de deslocamento do pistão do amortecedor e da corrente elétrica aplicada na bobina (MCMANUS *et al.*, 2002).



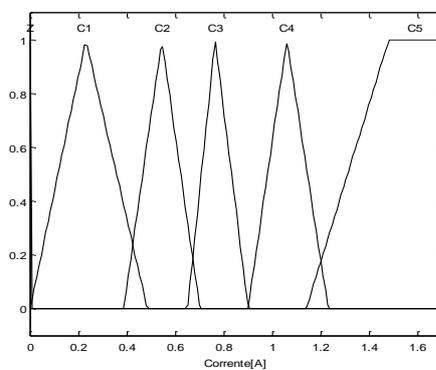
**FIGURA 25:** Características da força-velocidade de um amortecedor MR em função da corrente. Fonte: Adaptado de McManus *et al.*, (2002).

A Figura 25 mostra as curvas características de variação da força de amortecimento de um amortecedor MR em função da velocidade e da corrente elétrica aplicada na bobina do amortecedor.

Para a obtenção do modelo Nebuloso foi utilizado o modelo de Mandani. Na Figura 26 obteve-se utilizando recursos do *Matlab®*, podemos observar as funções de pertinência para a Velocidade [m/s], Força [N] e a Corrente [A], assim como o tipo de função de pertinência e sua superposição.



(a)(b)



(c)

Figura 26 : (a) Função de pertinência para a velocidade. (b) Função de pertinência para a força. (c) Função de pertinência para a corrente.  
 Fonte: Própria autoria.

Os consequentes a serem aplicados no controle *Nebuloso* serão obtidos da seguinte forma:

$$\text{Se (Velocidade é ...) e (Força é ...) então (Corrente é ...)} \quad (4.15)$$

As regras aplicadas a inferência (4.15) podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 3: Mapa de regras *Nebuloso* para o controle da corrente.

		Velocidade						
[A]	Z	V1	V2	V3	V4	V5	V6	
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	
F1	C1	Z	Z	Z	Z	Z	Z	
F2	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	
F3	C2	C2	C2	C1	C1	C1	C1	
F4	C3	C2	C2	C2	C2	C2	C2	
F5	C4	C3	C2	C2	C2	C2	C2	
F6	C5	C4	C3	C3	C3	C3	C3	
F7	C5	C5	C4	C4	C3	C3	C3	
F8	C5	C5	C5	C5	C5	C5	C5	

Fonte: Tuset, (2008).

Observa-se no Quadro 3, as regras definidas para determinar a corrente a ser aplicada considerando a velocidade do pistão e a força determinada pela regra de controle semi-ativo ou ativo. A superfície gerada para as 63 regras observadas na Figura 27.

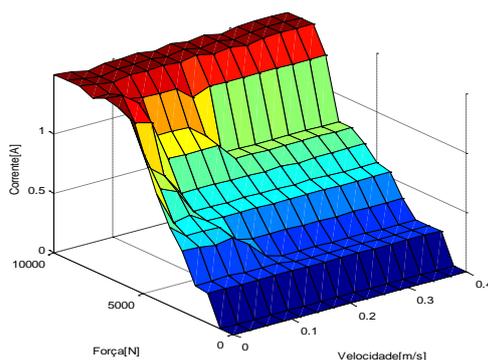


Figura 27: Superfície de controle dimensional para 63 regras do controle da corrente

Fonte: Própria Autoria.

Para o cálculo da defuzzificação será definido, *mínimo* para o método *e*, *máximo* para o método *ou*, *mínimo* para implicação, *máximo* para agregação, e realizando a defuzzificação pelo método centro de área:

$$u_{coa} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{out}(u_i)} \quad (4.16)$$

Sendo  $\mu_{out}(u_i)$  a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *Nebuloso*,  $u_i$  posição do centróide da função de pertinência individual, a equação (4.16) calcula o centróide composto, para o qual contribuem as duas funções. Conforme Shaw e Simões, (1999), o método centro-da-área apresenta alguns problemas, como quando mais de uma regra tiver a mesma saída *Nebuloso* haverá uma superposição de áreas que não será contabilizada corretamente, e quando o método necessitar de integração numérica necessitará de esforço computacional para o cálculo.

#### 4.8.8 Modelo Dependente da Corrente para Amortecedor MR

O modelo dependente da corrente para amortecedor MR é proposto por Tusset et al., (2012) considerando a Figura 22.

A força normalizada é aproximada da seguinte equação:

$$F = f(i)|v|^{-g(i)} \tanh(0.43v) \quad (4.17)$$

Sendo:

$$f(i) = \frac{2.6}{(3.7058e^{-3.2934i}) + 1} \quad (4.18)$$

$$g(i) = \frac{0.9}{(1.1548e^{-6.8239i}) + 1} \quad (4.19)$$

Observarmos que a utilização do modelo dado pela equação (4.17), possibilita encontrar o valor da corrente elétrica a ser aplicada no controle.

Levando-se em conta a força normalizada e que a velocidade será delimitada ( $\dot{x} \leq 0.4$ ), a corrente elétrica a ser aplicada, pode ser determinada resolvendo numericamente a seguinte função:

$$C = f(i)|v|^{-g(i)} \tanh(0.43v) - F \quad (4.20)$$

Para a determinação da corrente elétrica, a ser aplicada na bobina de MR do amortecedor, é definida a força  $F$  através de uma lei de controle e determinada a velocidade ( $v = \dot{x}$ ) e introduzidas na equação (4.20).

#### 4.8.9 Modelo dependente da corrente e da histerese aplicado ao modelo Bouc-Wen para amortecedor MR

Tusset et al. (2013) propôs uma aproximação da função (4.3) na seguinte forma:

$$F = \frac{3.2}{(3e^{-3.4i}) + 1} \dot{x} + \frac{8.5}{(1.28e^{-3.9i}) + 1} z \quad (4.21)$$

onde:  $i$  representa a corrente elétrica aplicada na bobina do amortecedor MR, e  $z$  é obtido da equação (4.14), considerando:  $A = 180$ ,  $\beta = 0$ ,  $n = 2$  e  $\gamma = 0.1$ .

A corrente elétrica a ser aplicada pode ser determinada resolvendo numericamente a seguinte função:

$$C(i) = \frac{3.2}{(3e^{-3.4i}) + 1} \dot{x} + \frac{8.5}{(1.28e^{-3.9i}) + 1} z - U \quad (4.22)$$

Sendo  $U$  a força estimada através de uma lei de controle.

Através do modelo (4.22) pode-se determinar a corrente elétrica a ser aplicado no controle da força do amortecedor MR, considerando-se a velocidade do êmbolo do amortecedor ( $\dot{x}$ ) e a força estimada por uma técnica de controle ( $U$ ).

#### 4.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS

Conforme Spencer *et al.*, (1997), embora o comportamento de força-deslocamento para o modelo (4.3) pareça razoável em relação à resposta da força-velocidade, a variação temporal da força mostra que o comportamento do amortecedor não é representado principalmente para velocidades próximas de zero, e que o modelo não exibe a resposta não-linear de força-velocidade observadas em modelos experimentais quando a aceleração e velocidade têm sinais opostos, ou quando a velocidade e o deslocamento têm o mesmo sinal e a magnitude das velocidades é pequena. Devido ao modelo não ter uma variável que represente explicitamente a corrente elétrica [A] ou tensão elétrica [V] sua aplicação no controle da força do amortecedor fica comprometida.

O modelo (4.4) representa muito bem o comportamento da força-deslocamento do amortecedor, e com comportamento da força-velocidade muito perto dos observados em experimentos. Uma desvantagem do modelo é o caso de simulações numéricas, pois é necessário um passo de integração na ordem de  $10^{-6}$  segundos (SPENCER *et al.*, 1997; EHRGOTT; MASRI, 1992). Assim como o modelo (4.3) esse modelo não apresenta a variável de controle corrente elétrica [A] ou tensão elétrica [V].

O modelo (4.8) é mais preciso que o modelo (4.4) representa muito bem o comportamento da força-deslocamento do amortecedor. Assim como o modelo (4.4) a desvantagem do modelo é para o caso de simulações numéricas, e também não apresenta a variável da corrente elétrica [A] ou tensão elétrica [V] explicitamente no modelo.

O modelo (4.8) é mais indicado para o caso de simulações numéricas do que os modelos (4.4) e (4.5) e também tem a vantagem de apresentar a variável tensão elétrica [V] no modelo, possibilitando assim o seu uso no controle da força do amortecedor através do controle da tensão elétrica [V] (PICCIRILLO *et al.*, 2014). Através de simulações numéricas percebe-se que o modelo de (4.8) é mais indicado para amortecedores de menores deslocamentos, enquanto que os modelos (4.4) e (4.5) podem ser utilizados para maiores deslocamentos.

O modelo nebuloso proposto por Tusset (2008) tem a vantagem de estimar a corrente a ser aplicada no controle, mas como obtida por aproximações de interpolações nebulosas pode conter pequenos erros.

O modelo (4.17) tem a vantagem de conter nas equações a variável que representa a corrente elétrica [A], possibilitando assim controlar a força do amortecedor através da variação da corrente, sua desvantagem é não contemplar o comportamento de histerese.

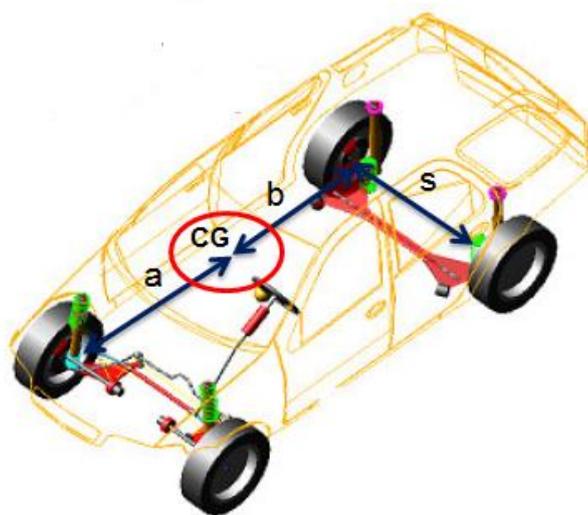
O modelo (4.21) tem a vantagem de conter nas equações a variável que representa a corrente elétrica e também contempla o comportamento de histerese do amortecedor, possibilitando assim controlar a força do amortecedor com histerese através da variação da corrente.

## 5 DINÂMICA E CONTROLE NEBULOSO DE UM MODELO NÃO LINEAR DE VEÍCULO COMPLETO

Em várias pesquisas sobre suspensão veiculares têm-se a contribuição de modelos lineares e modelos linearizados através das séries de Taylor em torno dos pontos de equilíbrio estático, considerando o deslocamento da carroceria e do deslocamento do eixo e da roda, mas poucas pesquisas têm considerado o modelo na forma não-linear para determinar o controle da suspensão (ALLEYNE; HEDRICK, 1992; BUCKNER *et al.*, 2000).

A Figura 3.1 mostra o modelo de um veículo completo com componentes não-lineares na suspensão. O corpo do veículo é representado por um corpo rígido com sete graus de liberdade de massa  $m_s$ . O deslocamento vertical o movimento de arfagem e de rolamento da massa  $m_s$  são considerados. As quatro massas não suspensas ( $m_{ufr}$ ,  $m_{ufl}$ ,  $m_{urr}$ ,  $m_{url}$ ) estão conectados a cada canto do corpo rígido.

Supõe-se que as quatro massas do eixo da roda estão livres para deslocar verticalmente. As suspensões entre a massa do chassi e massas do eixo das rodas são modelados como elementos de molas não-lineares e amortecedores não-lineares, enquanto que os pneus são modelados como sendo uma mola linear.



(a)



estático. Com o objetivo de incorporar esta característica ao modelo propõe-se considerar a força da mola na seguinte forma (GASPAR et al, 2003):

$$F_{s_{nm}} = K_{nm}^l u_{nm} + K_{nm}^{nl} (u_{nm})^3 \quad (5.1)$$

onde o coeficiente  $K_{nm}^l$  representa a faixa de atuação linear e o coeficiente não linear  $K_{nm}^{nl}$  que representa a característica não-linear da mola, observada em situações reais,  $u_{nm}$  representa a deformação da mola e (n=dianteiro ou traseiro, m=direito ou esquerdo).

Conforme Gaspar *et al.*, (2003), percebe-se a não-linearidade da força do amortecedor quando considerado o sentido de deslocamento do amortecedor, ou seja, se a velocidade é positiva ou negativa sendo que, a força de amortecimento para as velocidades positivas é maior que para as velocidades negativas. A velocidade é considerada positiva quando a velocidade vertical da carroceria do veículo é maior que a velocidade vertical do eixo.

$$F_{c_{nm}} = C_{nm}^l \dot{u}_{nm} - C_{nm}^y |\dot{u}_{nm}| + C_{nm}^{nl} \sqrt{|\dot{u}_{nm}|} \operatorname{sgn}(\dot{u}_{nm}) \quad (5.2)$$

Sendo que o coeficiente  $C_{nm}^l$  afeta a força do amortecedor linearmente, enquanto que o coeficiente  $C_{nm}^{nl}$  atua de forma não-linear no amortecedor, já o coeficiente  $C_{nm}^y$  representa as características do comportamento assimétrico, e  $\dot{u}_{nm}$  representa a velocidade relativa (velocidade do pistão do amortecedor).

A rigidez do pneu pode ser considerada como uma mola linear, de modo que a força do pneu possa ser representada por:

$$F_{t_{nm}} = K_{nm}^t v_{nm} \quad (5.3)$$

onde  $v_{nm}$  representa a deformação do pneu e  $K_{nm}^t$  representa a coeficiente de restauração.

O diagrama de corpo livre pode ser formulado conforme ilustra as Figuras 29 e 30.

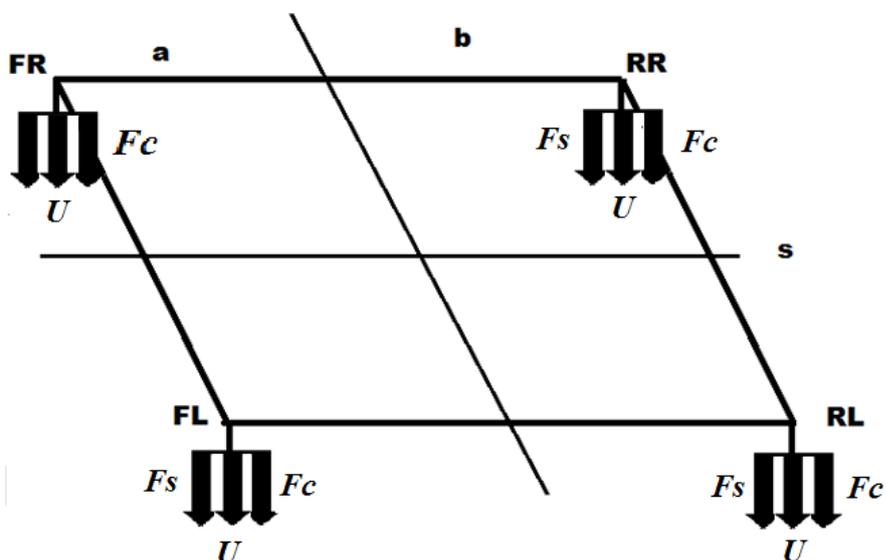


Figura 29: Diagrama do corpo livre para a massa suspensa ( $m_s$ ).

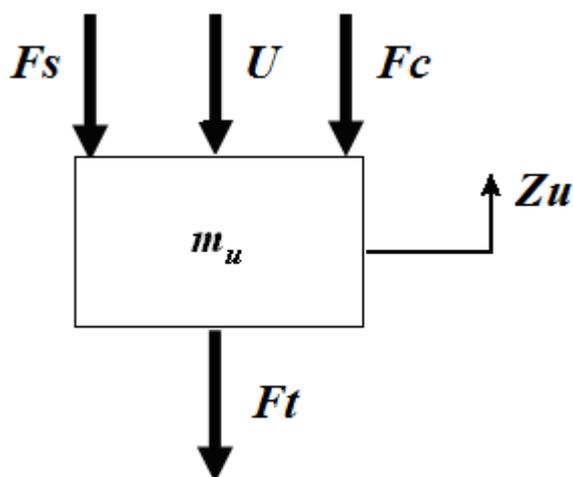


Figura 30: Diagrama do corpo livre para a massa não suspensa ( $m_u$ ).

A força  $U$  representa a atuação de um dispositivo com características dinâmicas, como um amortecedor ativo ou semi-ativo em substituição ou em conjunto com um amortecedor passivo  $F_{c_{nm}}$  (D'AZZO; HOUPIS, 1975).

Considerando a força vertical, a força de alavanca e a força de rolamento agindo na massa suspensa, e a força que age sobre as massas não suspensas, e usando as características não lineares da suspensão, as equações de equilíbrio de

força que agem sobre a suspensão e as acelerações são formalizadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\sum F &= m_s \ddot{Z}_s \\ \sum M &= I_\theta \ddot{\theta} \\ \sum M &= I_\phi \ddot{\phi}\end{aligned}\quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}\sum F &= m_{uf} \ddot{Z}_{ufr} \\ \sum F &= m_{uf} \ddot{Z}_{ufl}\end{aligned}\quad (5.5)$$

$$\begin{aligned}\sum F &= m_{ur} \ddot{Z}_{urr} \\ \sum F &= m_{ur} \ddot{Z}_{url}\end{aligned}\quad (5.6)$$

onde:  $\sum F$  representa o somatório das forças,  $m_s$  representa a massa do chassi,  $\ddot{Z}_s$  aceleração do deslocamento vertical do centro de gravidade do veículo,  $\ddot{Z}_{ufr}$  aceleração do deslocamento do eixo da roda direita dianteira,  $\ddot{Z}_{ufl}$  aceleração do deslocamento do eixo da roda esquerda dianteira,  $\ddot{Z}_{urr}$  aceleração do deslocamento do eixo da roda direita traseira,  $\ddot{Z}_{url}$  aceleração do deslocamento do eixo da roda esquerda traseira,  $m_{uf}$  massa do eixo da roda dianteira,  $m_{ur}$  massa do eixo da roda traseira,  $\sum M$  representa o somatório dos momentos,  $\ddot{\theta}$  aceleração do movimento de arfagem,  $I_\theta$  momento de inercia do movimento de arfagem,  $\ddot{\phi}$  aceleração do movimento de rolamento,  $I_\phi$  momento de inercia do movimento de rolamento.

Considerando a introdução das forças nas equações (5.4) a (5.6), obtemos as seguintes equações:

$$\begin{aligned}\ddot{Z}_s &= \left( \frac{1}{m_s} \right) \begin{pmatrix} -Fs_{fl} - Fc_{fl} - Fs_{fr} - Fc_{fr} - Fs_{rl} - Fc_{rl} \\ -Fs_{rr} - Fc_{rr} - U_{fl} - U_{fr} - U_{rl} - U_{rr} \end{pmatrix} \\ \ddot{\phi} &= \left( \frac{1}{I_\phi} \right) \left( \frac{s}{2} \cos(\phi) \right) \begin{pmatrix} -Fs_{fl} - Fc_{fl} + Fs_{fr} + Fc_{fr} - Fs_{rl} \\ -Fc_{rl} + Fs_{rr} + Fc_{rr} - U_{fl} + U_{fr} - U_{rl} + U_{rr} \end{pmatrix} \\ \ddot{\theta} &= \left( \frac{1}{I_\theta} \right) \begin{pmatrix} a \cos(\theta) (Fs_{fl} + Fc_{fl} + Fs_{fr} + Fc_{fr} + U_{fl} + U_{fr}) \\ -b \cos(\theta) (Fs_{rl} + Fc_{rl} + Fs_{rr} + Fc_{rr} + U_{rl} + U_{rr}) \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (5.7)$$

$$\begin{aligned}\ddot{Z}_{ufl} &= \left( \frac{1}{m_{uf}} \right) (F_{S_{fl}} + F_{C_{fl}} - Ft_{fl} + U_{fl}) \\ \ddot{Z}_{ufr} &= \left( \frac{1}{m_{uf}} \right) (F_{S_{fr}} + F_{C_{fr}} - Ft_{fr} + U_{fr}) \\ \ddot{Z}_{url} &= \left( \frac{1}{m_{ur}} \right) (F_{S_{rl}} + F_{C_{rl}} - Ft_{rl} + U_{rl}) \\ \ddot{Z}_{urr} &= \left( \frac{1}{m_{ur}} \right) (F_{S_{rr}} + F_{C_{rr}} - Ft_{rr} + U_{rr})\end{aligned}\tag{5.8}$$

onde:  $F_{S_{fl}}$  representa a força da mola esquerda da frente,  $F_{S_{fr}}$  representa a força da mola direita da frente,  $F_{S_{rl}}$  representa a força da mola esquerda traseira,  $F_{S_{rr}}$  representa a força da mola direita traseira,  $F_{C_{fl}}$  representa a força do amortecedor esquerdo da frente,  $F_{C_{fr}}$  representa a força do amortecedor direito da frente,  $F_{C_{rl}}$  representa a força de um amortecedor esquerdo traseiro,  $F_{C_{rr}}$  representa a força do amortecedor direito traseiro,  $U_{fl}$  representa a força do atuador esquerdo da frente,  $U_{fr}$  representa a força do atuador direito da frente,  $U_{rl}$  representa a força do atuador esquerdo de trás,  $U_{rr}$  representa a força do atuador direito de trás.

## 5.2 PROPOSTA DE CONTROLE DA SUSPENSÃO CONSIDERANDO AMORTECEDORES MR E LÓGICA NEBULOSA

Na Figura 31, pode-se observar o diagrama da associação dos dois controles propostos para controlar o amortecedor MR.

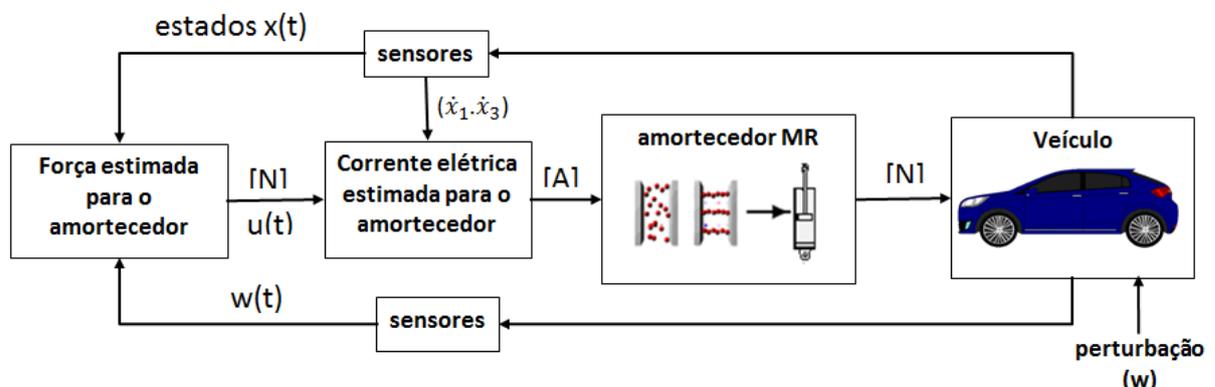


Figura 31: Diagrama em blocos de um amortecedor MR aplicado ao veículo.

Fonte: Tuset , (2008)

O diagrama da Figura 28 ilustra o controle proposto, verificando-se que a implementação do controle da suspensão depende da instalação de sensores como os acelerômetros, sensores, tais como de velocidade ou sensores de deslocamento, que podem fornecer informações sobre as grandezas do modelo de espaço de estados. A realimentação das variáveis de estado através de sensores pode fornecer informações sobre o comportamento do sistema controlado ao longo do tempo e, com isso, sobre a intensidade ideal de força a ser aplicada pelo amortecedor MR.

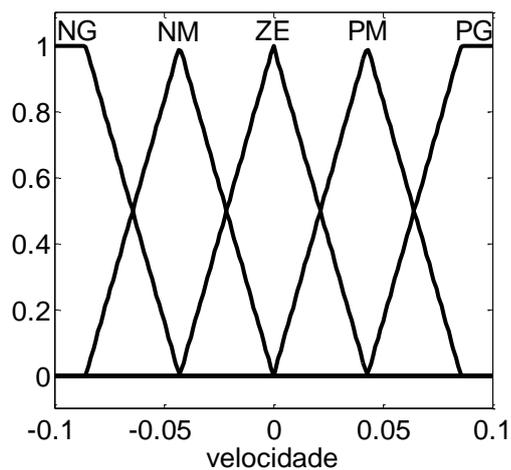
### 5.2.1 Projeto do Controlador Nebuloso da Força do Amortecedor MR

Para determinação do controle Nebuloso proposto foi utilizado o modelo clássico de Mamdani, com duas entradas velocidade de deslocamento do chassi (velocidade), e velocidade de deslocamento do pistão do amortecedor (velocidade relativa) e uma saída  $U$  (força prevista para o amortecimento), sendo consideradas cinco funções de pertinência simétricas e uniformemente espaçadas, a fim de suavizar as discontinuidades da força e minimizar problemas como choques e ruídos.

A escolha de funções de pertinência (velocidade) e (velocidade relativa) é devido ao fato de que a relação entre elas determina o nível de amortecimento entre as massas  $m_s$  e  $m_u$  (PINHEIRO, 2004; TUSSET et al., 2006).

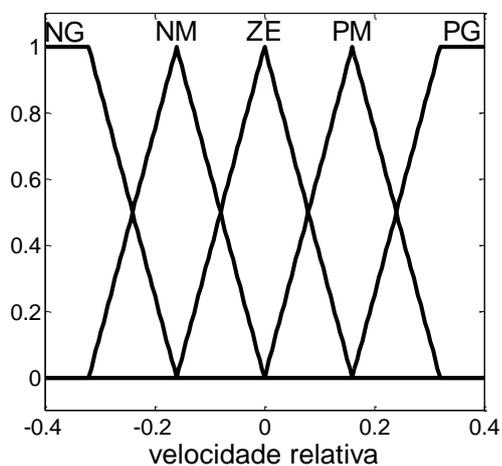
A fuzzificação da velocidade, velocidade relativa e força são realizadas através de funções triangulares e trapezoidais, que conforme Shaw e Simões, 1999, são funções que facilitam a defuzzificação nos casos em que seja necessário realizar os cálculos numericamente.

Nas Figuras 32, 33 e 34 são definidas funções de pertinência relativas à velocidade, velocidade relativa e força de atuação.



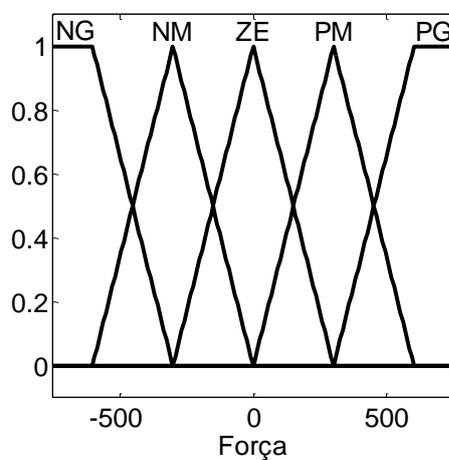
**Figura 32: Função de pertinência para a velocidade**

Fonte: Própria Autoria.



**Figura 33: Função de pertinência para a velocidade relativa.**

Fonte: Própria Autoria.



**Figura 34: Função de pertinência para a Força.**

Fonte: Própria Autoria.

Os consequentes a serem aplicados no controle serão obtidos da seguinte forma:

Se (Velocidade é ...) e (Velocidade Rel. é ...) então (Força é ...)

As regras aplicadas no controle da força do amortecedor podem ser observadas no Quadro 4.

**QUADRO 4: Mapa de regras para o controle Nebuloso**

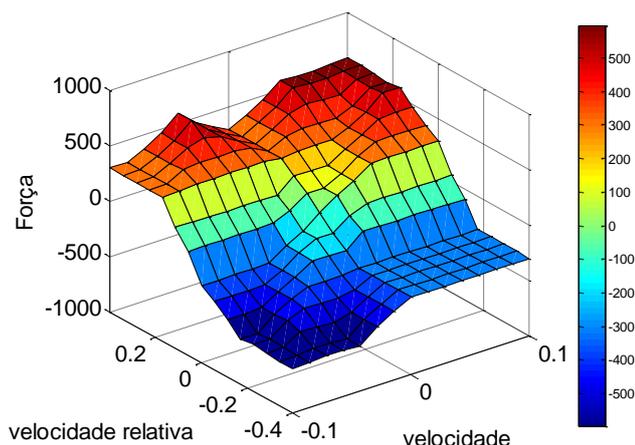
<i>F</i>		<i>V</i>				
		<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>ZE</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>
<i>V<sub>rel</sub></i>	<i>NG</i>	NG	NG	NM	NM	NM
	<i>NM</i>	NG	NM	NM	NM	NM
	<i>ZE</i>	NM	NM	ZE	PM	PM
	<i>PM</i>	PM	PM	PM	PM	PG
	<i>PG</i>	PM	PM	PM	PG	PG

Fonte: Pinheiro, (2004).

onde: as variáveis linguísticas representam: **NG**: Negativo grande; **NM**: Negativo médio; **ZE**: Zero; **PM**: Positivo médio; **PG**: Positivo grande.

Para o cálculo da defuzzificação será definido, *mínimo* para o método e, *máximo* para o método ou, *mínimo* para implicação, *máximo* para agregação, e realizando a defuzzificação pelo método centro de área por ser o método mais empregado (BARROS, 2006):

A superfície gerada para as 25 regras pode ser observada na Figura 35.



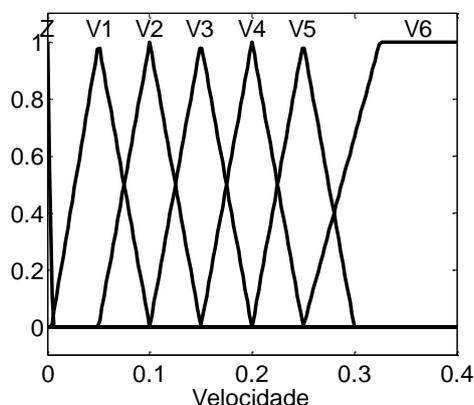
**Figura 35: Superfície de controle dimensional para 25 regras do controle da Força.**

Fonte: Própria Autoria.

### 5.2.2 Projeto de Controle da Corrente Elétrica do MR

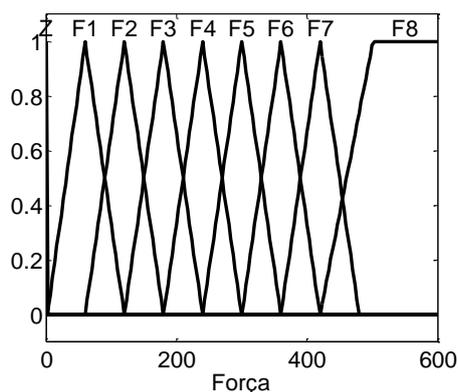
Na Figura 35 observa-se características de variação da força de amortecimento, dependendo da velocidade de deslocamento do êmbolo do amortecedor e de corrente elétrica aplicada à bobina. Uma maneira de determinar a corrente elétrica aplicada à bobina é através de Controle Nebuloso proposto por (TUSSET, 2008, e TUSSET et al., 2009), apresentada na seção (2.4.7)

Nas Figuras 36, 37 e 38 observamos as funções de pertinência para a velocidade [m / s], força [N] e corrente elétrica [A], as mesmas foram consideradas em modulo devido à simetria de ambas, bem como o tipo de função de pertinência e a sua superposição (TUSSET et al., 2009).



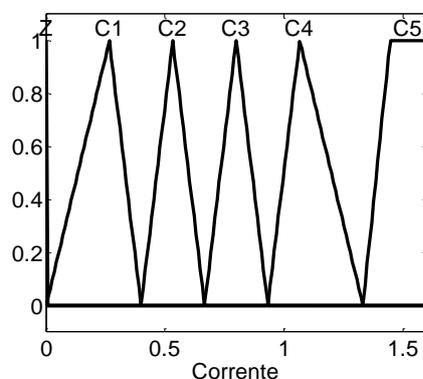
**Figura 36: Função de pertinência para a Velocidade**

Fonte: Própria Autoria.



**Figura 37: Função de pertinência para a Força.**

Fonte: Própria Autoria.



**Figura 38: Função de pertinência para a Corrente.**

Fonte: Própria Autoria.

Os consequentes a serem aplicados no controle *Nebuloso* serão obtidos da seguinte forma:

Se (Velocidade é ...) e (Força é ...) então (Corrente é ...)

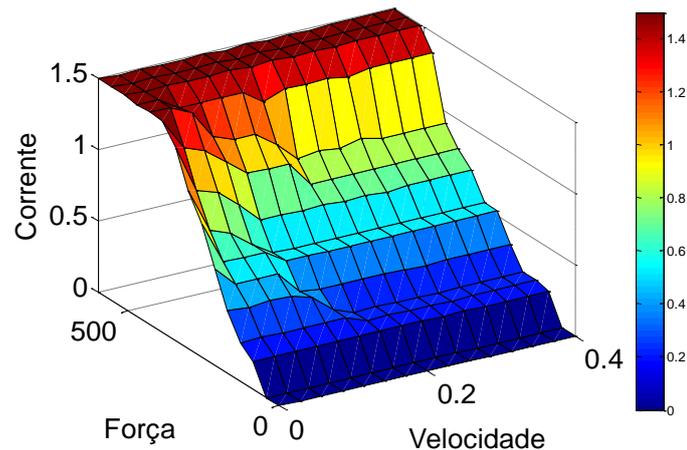
As regras a ser aplicada a inferência podem ser observadas no Quadro 5.

**Quadro 5: Mapa de regras *Nebuloso* para o controle da corrente.**

		Velocidade						
		[A]	Z	V1	V2	V3	V4	V5
Força	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	F1	C1	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	F2	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
	F3	C2	C2	C2	C1	C1	C1	C1
	F4	C3	C2	C2	C2	C2	C2	C2
	F5	C4	C3	C2	C2	C2	C2	C2
	F6	C5	C4	C3	C3	C3	C3	C3
	F7	C5	C5	C4	C4	C3	C3	C3
F8	C5	C5	C5	C5	C5	C5	C5	

Fonte: Tuset (2008).

No Quadro 5, podemos observar as regras definidas para determinar a corrente a ser aplicada na bobina, considerando a velocidade do pistão e a força determinada pela regra de controle semi-ativo ou ativo. A superfície gerada para as 63 regras pode ser observada na Figura 38.



**Figura 39: Superfície de controle dimensional para 63 regras do controle da corrente.**

Fonte: Própria Autoria.

### 5.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO CONTROLE PROPOSTO

Para simulações numéricas foram utilizados os parâmetros da Tabela 2 (GASPAR et al, 2003; ZHU; ISHITOBI ,2006.):

**Tabela 2: Os valores numéricos para os parâmetros do sistema.**

Massa do Chassi, $m_s$	1500 [kg]
Momento de inércia do movimento de Roll, $I_\phi$	460 [kg m]
Momento de inercia do movimento de Pitch, $I_\theta$	2160 [kg m]
Massa do eixo da roda, frente e atrás, $m_{unm}$	40 [kg]
Coefficientes da mola, frente e atrás, $K_{nm}^l$ ; $K_{nm}^{nl}$	$10^4$ ; $10^6$ [N/m]
Coefficientes do amortecedor, frente e atrás, $C_{nm}^l$ ; $C_{nm}^{nl}$ ; $C_{nm}^y$	1000; 400; 400 [N/m/s]
Coefficiente do pneu, $K_{nm}^t$	190000 [N/m]
Comprimento entre a frente e o centro de gravidade, <b>a</b>	1 [m]
Comprimento entre a traseira e o centro de gravidade, <b>b</b>	1.5 [m]
Largura do Chassi, <b>s</b>	1.5 [m]

Fonte: Gaspar; et al, (2003); Zhu; Ishitobi ,(2006):

A função impulso de deslocamento ( $\delta(t) = 0.2m$ ) é usada para descrever a excitação provocada pela superfície da estrada. Assim, a função de força de pneus na frente-direita, frente-esquerda, traseira direita e traseira esquerda são aproximadas por:

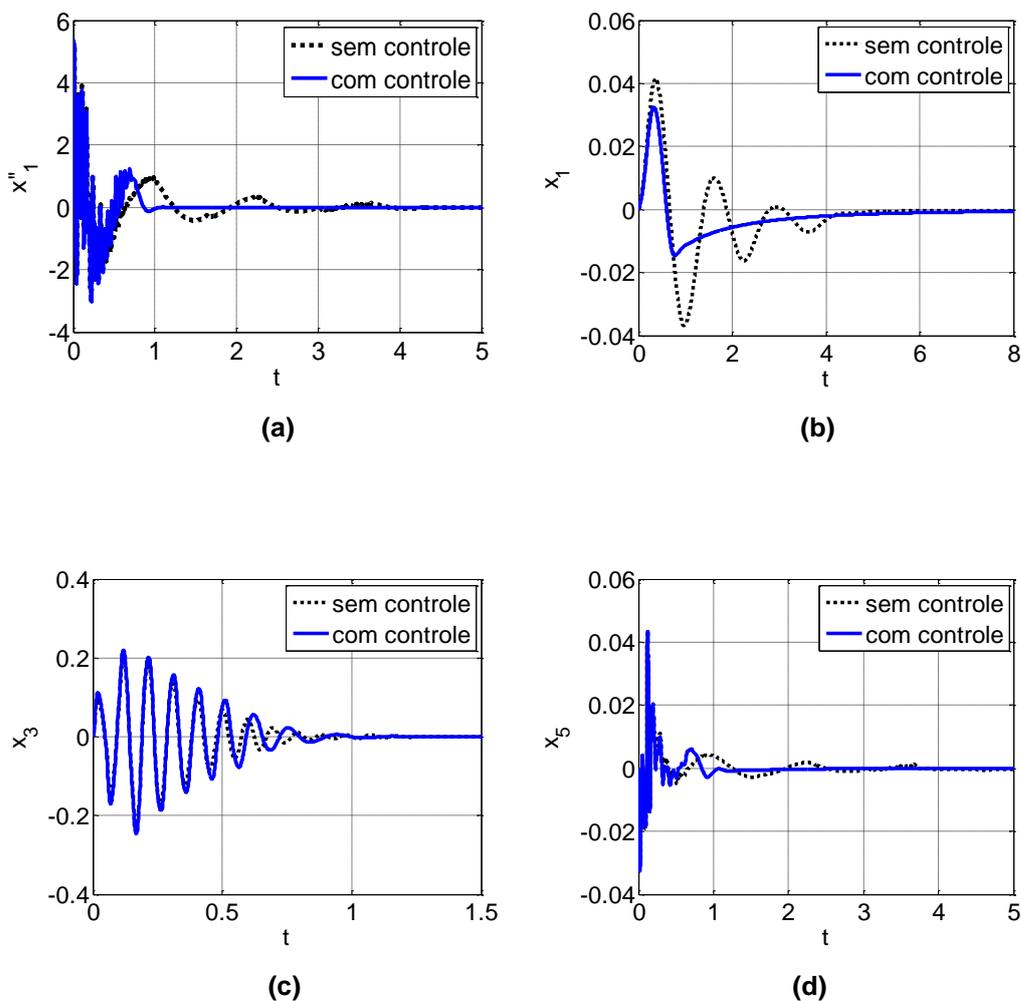
$$Z_{fl} = \delta(0) = 0.2m \quad (5.9)$$

$$Z_{fr} = \delta(0.05) = 0.2m \quad (5.10)$$

$$Z_{rl} = \delta(0.1) = 0.2m \quad (5.11)$$

$$Z_{rr} = \delta(0.15) = 0.2m \quad (5.12)$$

Na Figura 40 podemos observar os deslocamentos da massa do chassi:



**Figura 40: Chassi (a) Aceleração vertical. (b) Deslocamento vertical. (c) Movimento de pitch. (d) Movimento de roll.**  
**Fonte: Própria Autoria.**

Como pode ser observada, a introdução do amortecedor MR resultou em ganho de conforto, reduzindo o deslocamento do corpo do veículo.

A Figura 41 mostra os deslocamentos dos eixos das rodas dianteiras.

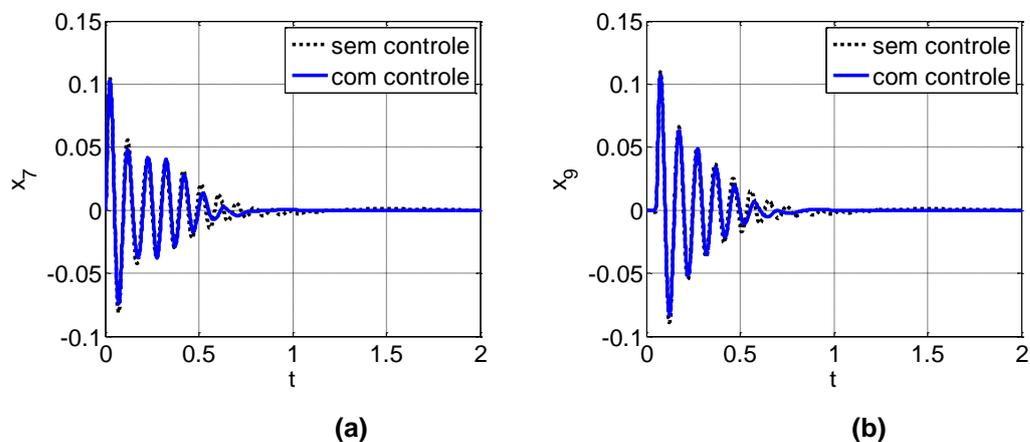


Figura 41: Deslocamento do eixo das rodas dianteiras. (A) Eixo esquerda. (B) Eixo direito.

Fonte: Própria Autoria.

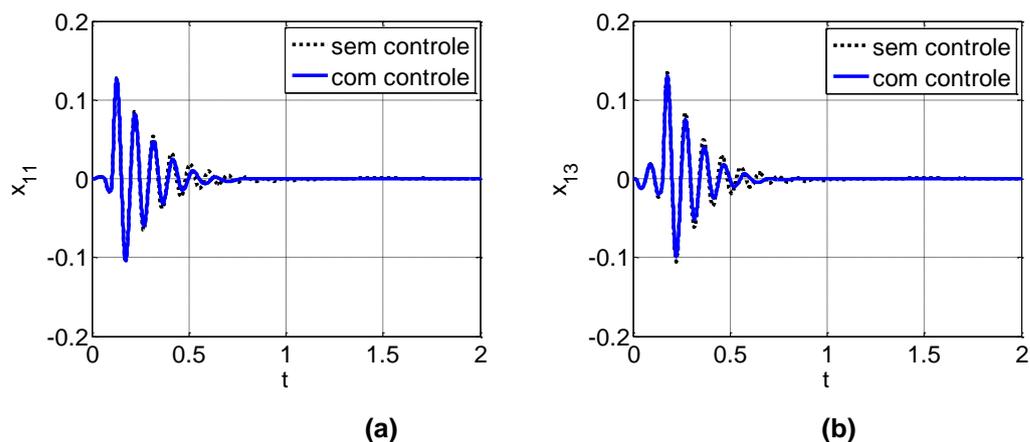
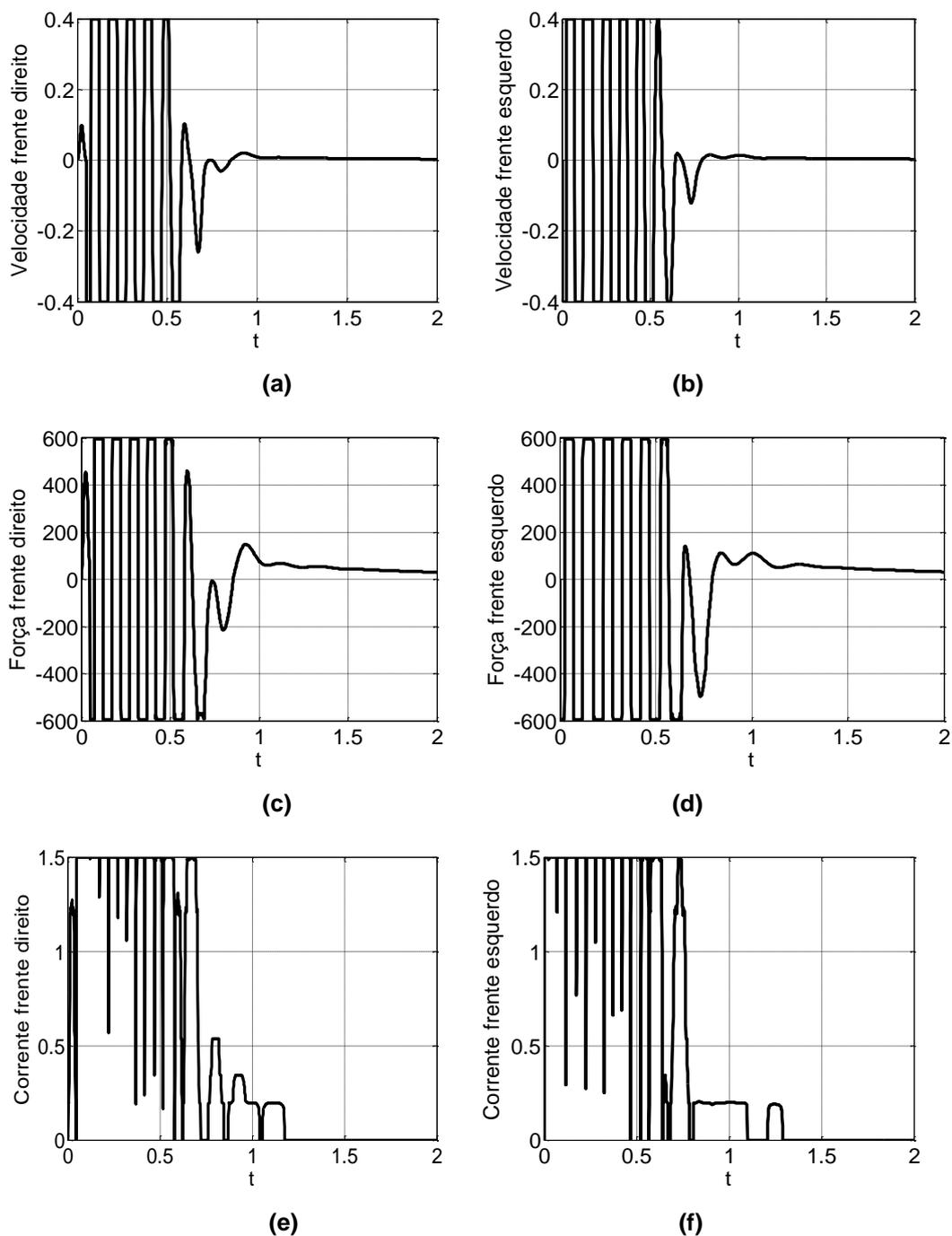


Figura 42: Deslocamentos dos eixos das rodas traseiras. (a) Eixo esquerda. (b) Eixo direito.

Fonte: Própria Autoria.

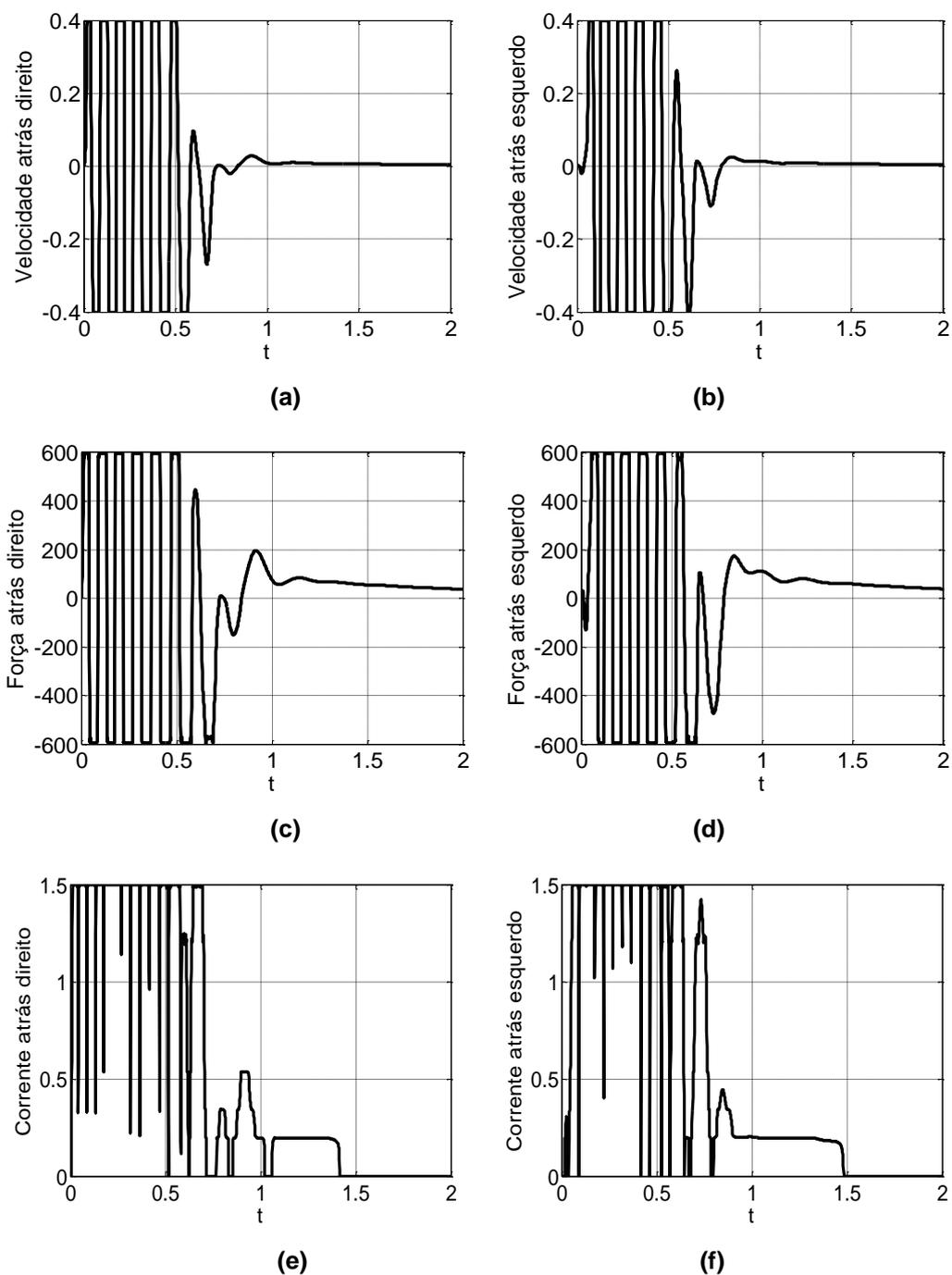
Na Figura 43 observa – se os valores utilizados no controle Nebuloso, tanto força como a corrente elétrica aplicada à suspensão dianteira do veículo.



**Figura 43:** (a) Velocidade do pistão do amortecedor dianteiro direito. (b) Velocidade do pistão do amortecedor dianteiro esquerdo. (c) Força estimada para o controle do amortecedor dianteiro direito. (d) Força estimada para o controle do amortecedor dianteiro esquerdo. (e) Corrente estimada para o controle do amortecedor dianteiro direito. (f) Corrente estimada para o controle do amortecedor dianteiro esquerdo.

Fonte: Própria Autoria.

Na Figura 43 observar-se os valores utilizados no controle *Nebuloso* tanto força como a corrente elétrica aplicada à suspensão traseira do veículo.



**Figura 44:** (a) Velocidade do pistão do amortecedor traseiro direito. (b) Velocidade do pistão do amortecedor traseiro esquerdo. (c) Força estimada para o controle do amortecedor traseiro direito. (d) Força estimada para o controle do amortecedor traseiro esquerdo. (e) Corrente estimada para o controle do amortecedor traseiro direito. (f) Corrente estimada para o controle do amortecedor traseiro esquerdo.

Fonte: Própria Autoria.

Na Tabela 3 analisamos a variação da aceleração do centro de massa do chassi para o sistema com controle e sem controle, sendo o VDV estimado pela equação (1.2) considerando os valores de compensação da Tabela 2, para o caso da frequência ser de 1 [Hz].

**Tabela 3: Aceleração do centro de massa do chassi causada por uma entrada tipo impulso:**

$\delta(t) = 0,2m$ , com  $n=451$  e  $t=4,41s$ .

Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	Pico máximo	Pico mínimo	Amplitude	rms	Aceleração compensada	VDV [m/s <sup>1,75</sup> ]	Tempo de exposição [s]
Sistema Passivo	5,2489	-2,924	8,1730	1,7054	0,8220	2,3983	4.458
Controle Fuzzy	5,3457	-3,014	8,3598	1.7484	0,8427	2,4678	1.055

Como pode ser observado na Tabela 3 o controle Nebuloso utilizado obteve valores sensivelmente superiores aos obtidos pelo sistema passivo, sendo que obteve apenas 1.25% a mais de VDV do que o sistema passivo, valor muito inferior aos considerados desconfortáveis pela norma BS 6841, 1987, que é de 8,5 [m/s<sup>1,75</sup>].

Podemos observar a Figura 37 que apesar do pequeno acréscimo no valor do VDV o tempo de exposição é muito inferior ao observado para o sistema passivo, resultados também observados em Tusset (2008) Simon e Ahmadian (2001). De acordo com Simon e Ahmadian (2001) e Tusset (2008) o fato de amortecedor MR amortecer rapidamente a vibração resulta em uma diminuição na intensidade de picos de aceleração, o que tem grande efeito sobre o conforto e estabilidade do veículo, reduzindo o tempo de exposição em 422,56%, justificando assim sua aplicação.

## 6 PROJETO DO SISTEMA ELETRÔNICO DE CONTROLE DA CORRENTE DA BOBINA DO AMORTECEDOR MR

Observado os resultados obtidos no Capítulo 3, a estratégia de controle utilizando a lógica nebulosa, temos resultados eficientes tanto no controle da vibração do chassi como na determinação da corrente aplicada na bobina do amortecedor.

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do protótipo considerando o controle nebuloso.

### 6.1 DESCRIÇÃO DO MICROCONTROLADOR

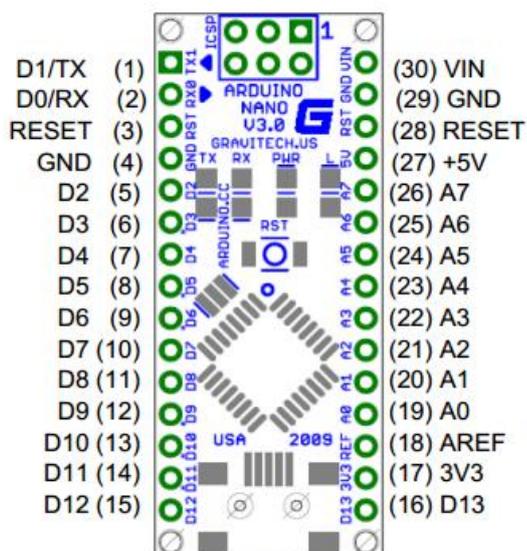
O Arduino Nano é uma placa de ensaio para *protoboard* baseado no microcontrolador ATmega328 (Arduino Nano 3.x), e ATmega168 (Arduino Nano 2.x), foi projetado e produzido por Gravitech.

Na Figura 45 podemos observar a configuração física do *Arduino Nano*.



**Figura 45: Arduino Nano.**  
Fonte: Arduino, (2014)

Na Figura 46 podemos observar a disposição dos pinos do Arduino Nano.



**Figura 46: Disposição dos pinos do Arduino Nano.**  
**Fonte: Arduino, (2014)**

Na Tabela 4 são apresentadas as características do microcontrolador.

**Tabela 4: Especificações do microcontrolador Arduino Nano.**

Microcontrolador	ATmega328
Tensão de operação (nível logico)	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Porta E/S digital	14 (onde 6 são PWM)
Porta de entradas analógicas	8
Corrente contínua portas de E/S	40mA
Memoria flash	32K dos quais 2 KB usados por bootloader
SRAM	2K
EEPROM	1K
Velocidade do Clock	16MHz

**Fonte: Arduino, (2014)**

### 6.1.1 Alimentação

O *Arduino Nano* pode ser alimentado através da ligação USB Mini-B, 6-20V, fonte de alimentação externa (pino 30), ou 5V fonte de alimentação externa (pino

27). A fonte de alimentação é selecionada automaticamente para a fonte de maior tensão.

### 6.1.2 Memória

ATmega328 tem 32 KB, (também com 2 KB usados para o *bootloader*). Tem 2 KB de SRAM e 1 KB de EEPROM.

### 6.1.3 Entrada e Saída

Cada um dos 14 pinos digitais do nano pode ser utilizado como uma entrada ou uma saída, usando *pinMode* ( ), *digitalWrite* ( ), e *digitalRead* ( ) funções. Eles operam com 5 volts. Cada pino pode fornecer ou receber um máximo de 40 mA e tem um resistor *pull-up* interno (desconectado por padrão) de 20-50 kOhms . Alguns pinos têm funções especializadas:

- I. **Serial:** 0 ( RX ) e 1 ( TX ). Usado para receber (RX) e transmitir (TX) dados seriais TTL. Estes pinos são ligados aos pinos correspondentes do USB- TTL chip serial FTDI.
- II. **Interrupções externas:** 2 e 3. Estes pinos podem ser configurados para disparar uma interrupção por um valor baixo, uma borda de subida ou queda , ou uma mudança de valor.
- III. **PWM:** 3, 5, 6, 9, 10 e 11. Assegura a saída PWM de 8-bit com o *analogWrite* ( ) função.
- IV. **SPI:** 10 (SS ), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Estes pinos suportam comunicação SPI, que, embora fornecido pelo hardware subjacente, não está incluída na linguagem Arduino.
- V. **LED:** 13. Há um *built-in* LED conectado ao pino digital 13 Quando o pino é de alto valor, o LED está ligado, quando o pino é LOW, ele está fora.

O Arduino Nano tem 8 entradas analógicas, cada uma das quais com 10 bits de resolução. Por padrão elas medem até 5 volts, embora seja possível mudar o limite superior de sua faixa usando a função *analogReference* ( ). Onde os pinos 6 e 7 não podem serem usadas como pinos digitais.

#### 6.1.4 Comunicação

O ATmega328 fornece UART TTL (5V) de comunicação serial, que está disponível nos pinos digitais 0 (RX) e 1 (TX). Um FT232RL FTDI nos canais de tabuleiro, e fornece uma porta COM virtual para o software no computador. O software Arduino inclui um monitor serial que permite que dados de texto sejam enviados de e para a placa Arduino. Uma biblioteca *SoftwareSerial* permite comunicação serial em qualquer um dos pinos digitais do Nano .

ATmega328 também suportam I2C (TWI) e comunicação SPI. O software Arduino inclui uma biblioteca *Wire* para simplificar o uso do bus I2C.

#### 6.1.5 Programação

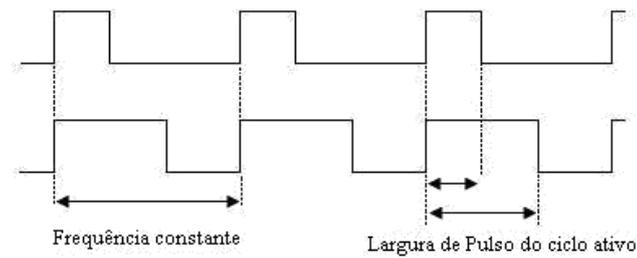
O Arduino Nano pode ser programado com o software Arduino (*download*). O ATmega328 no Arduino Nano vem *preburned* com um *bootloader* que permite o envio de novos códigos sem o uso de um programador de hardware externo. Ele se comunica utilizando o protocolo original STK500.

#### 6.1.6 Descrição da Configuração para a Operação do PWM Arduino

Para habilitar um sinal PWM, é necessário utilizar a função *analogWrite* ( ), e selecionar o pino qual desejar habilitar o sinal de saída PWM, mais frequência do sinal é de aproximadamente 490Hz, esta função é eficiente nos pinos 3, 5, 6, 9,10 e 11. Para frequências maiores é necessário mexer nos setups dos *timers* internos, inserindo dentro da linha *setup* ( ).

#### 6.1.7 Conversões do Sinal Digital/Analógico: Modulação por PWM

O PWM trata-se de uma onda de frequência constante (período fixo) e largura de pulso (ciclo ativo- *duty cycle*) variável, a Figura 47 representa duas formas de onda tipo PWM, cada uma delas com uma largura de pulso diferente.



**Figura 47: Representação de duas formas de onda tipo PWM.**

Fonte: Braga, (2005).

A modulação PWM consiste em transformar um sinal contínuo em um trem de pulsos e variar a largura do pulso alto, na intenção de controlar a intensidade do sinal. A tensão média varia em função do tempo em que o sinal ficar em nível alto ( $V_{cc}$ ) e do tempo que ficar em nível baixo ( $0V$ ), assim controla-se a intensidade de um sinal contínuo sem perder suas características. Esta relação é chamada de ciclo ativo, ou seja, um ciclo ativo de 50% significa que o sinal ficou metade do tempo em nível alto ( $V_{cc}$ ) e metade, em nível baixo ( $0V$ ). Analisando a teoria, a tensão média de uma forma de onda ( $V_{dc}$ ) é dada por:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (6.1)$$

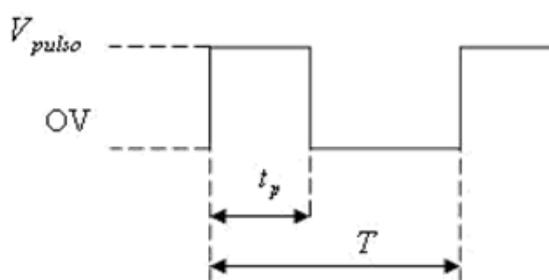
onde  $T$  é o período da forma de onda e  $V(t)$  é a dependência temporal da tensão. Para o PWM tem-se pela equação (6.2):

$$V(t) = \begin{cases} V_{pulso} \rightarrow 0 \leq t \leq t_p \\ 0 \rightarrow t_p < t \leq T \end{cases} \quad (6.2)$$

onde:  $t_p$  é a duração do pulso em nível lógico

$V_{pulso}$  é a tensão de pulso do sinal PWM

As variáveis mencionadas na equação (6.2) podem ser observadas na Figura 48.



**Figura 48: período e largura do pulso.**

Fonte: Braga, (2005).

Sendo:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{t_p} V_{pulso} dt + \int_{t_p}^T 0 dt \right) \quad (6.3)$$

onde:  $V_{dc} = \frac{t_p}{T} V_{pulso}$

A razão entre a largura de pulso e o período da onda recebe o nome de ciclo ativo (*duty cycle*) (Figura 45). O pulso PWM apresenta tensão fixa, porém o seu valor médio varia em função deste ciclo. A tensão média ( $V_{dc}$ ) é diretamente proporcional ao ciclo ativo e como este varia entre 0 (para  $t_p=0$ ) e 1 (para  $t_p=T$ ) tem-se que a tensão média da onda pode variar entre 0 e  $V_{pulso}$ . No caso a variação será de  $V_{ss}$  a  $V_{dd}$ , para uma variação de tensão de 0 a 5 V.

Com esta técnica, pode-se variar a intensidade média da corrente na bobina, alimentando-a com pulsos e controlando a duração dos mesmos, sendo assim a tensão de cada pulso se mantém igual à tensão máxima da fonte, mas seu valor médio aplicado ao motor será apenas metade do valor de entrada. Para alterar sua velocidade, basta alterar os pulsos aplicados.

Aumentando a duração dos pulsos, o motor receberá alimentação por período mais longo e na média, terá uma alimentação correspondente a uma tensão maior, com isso o motor irá rotacionar com maior velocidade. Reduzindo a largura dos pulsos, a velocidade do motor será reduzida, pois diminuindo o pulso aplicado ao motor, a tensão será menor gerando uma redução na sua velocidade (BRAGA, 2005).

Na prática, o elemento utilizado para ligar e desligar a tensão pode ser uma

chave, por exemplo, contato de um relé, um componente semiconductor (transistor bipolar), transistor de efeito de campo (MOSFET de potência) ou um SCR. Vários tipos de circuitos discretos e CIs podem gerar um PWM, tais como, o circuito integrado 555, o LM350T, o CI LM18201. O PIC 16F877, possui dois canais com a configuração PWM, sendo, portanto um PWM digital. No caso do trabalho foi utilizado o PWM do Arduino (SOUZA, 2003).

#### 6.1.8 Justificativa do Uso *Arduino Nano V3*

Após verificar as características físicas e de programação do *Arduino Nano V3*, verificou-se a possibilidade de uso desse microcontrolador para atender nos requisitos do projeto, a razão pela qual foi utilizado para confecção do protótipo são as seguintes:

- Por ter oito entradas de sinal analógico, das quais 2 serão utilizadas para o protótipo.
- Comunicação serial RXTX, qual possibilita a leitura dos dados no computador e possibilita a comunicação entre os microcontroladores.
- O mesmo contém seis pinos que geram o sinal PWM, dos quais é utilizado 1 pino para geração do sinal para realizar o chaveamento do MOSFET.
- Questão de custo para aquisição do microcontrolador.
- Programação do mesmo sendo feita direta na porta USB do computador, não havendo a necessidade do uso de gravador.

## 6.2 UTILIZAÇÃO DE RECURSOS DO SIMULINK<sup>®</sup> PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA (N)

Como podemos verificar na Figura 49, foi construído um diagrama no Simulink<sup>®</sup> com bloco da lógica *nebulosa*, variando os valores das constantes de entrada, qual simula a velocidade relativa e velocidade, assim definindo as duas entradas. E gerando no *workspace* o resultado da simulação conforme Figura 50, na qual possibilitará realizar as combinações necessárias das velocidades e realizar análise do valor da força determinado pela lógica *nebulosa*.

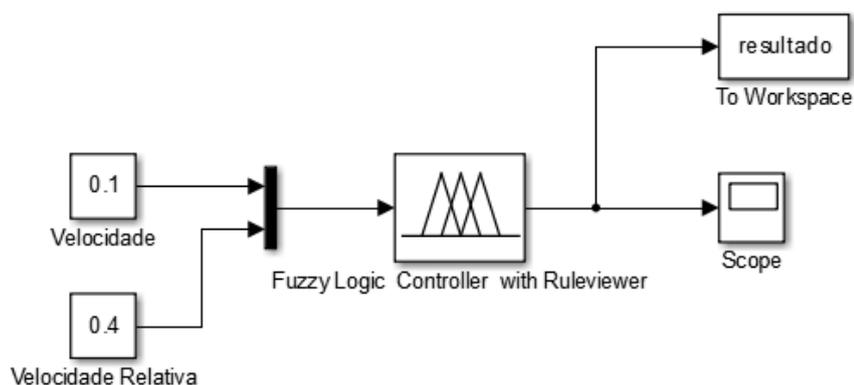


Figura 49: Determinação da força (N), utilizando recursos do *Simulink*®

Fonte: Própria Autoria.

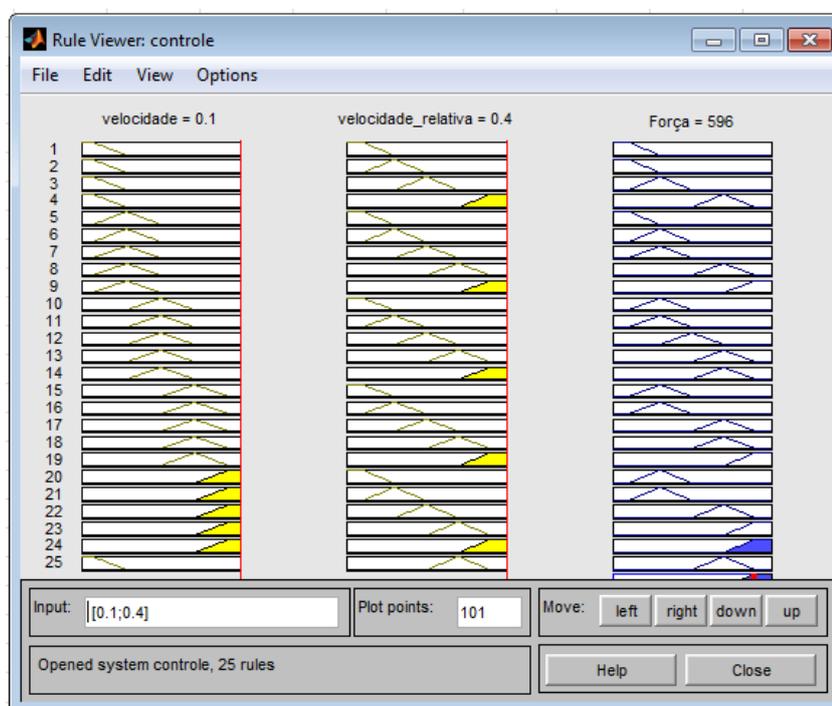


Figura 50: determinação da força utilizando *Simulink*®

Fonte: Própria Autoria..

### 6.3 UTILIZAÇÃO DE RECURSOS DO SIMULINK® PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA (A)

Como podemos verificar na Figura 51, foi construído um diagrama no *Simulink*® com bloco da lógica *nebulosa*, variando os valores das constantes de entrada, a qual simula a velocidade relativa e velocidade, assim definindo as duas

entradas. E gerando no *Workspace* o resultado da simulação conforme Figura 52, na qual possibilitará realizar as combinações necessárias das velocidades e realizar análise do valor da força determinado pela lógica nebulosa.

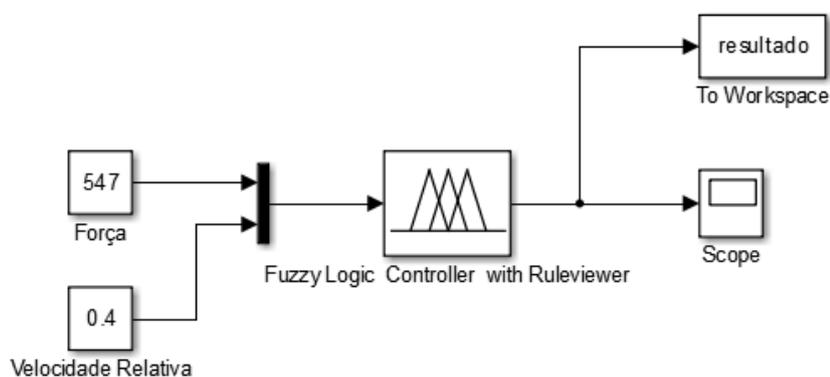


Figura 51: Diagrama no Simulink® para determinação da corrente elétrica (A)

Fonte: Própria Autoria.

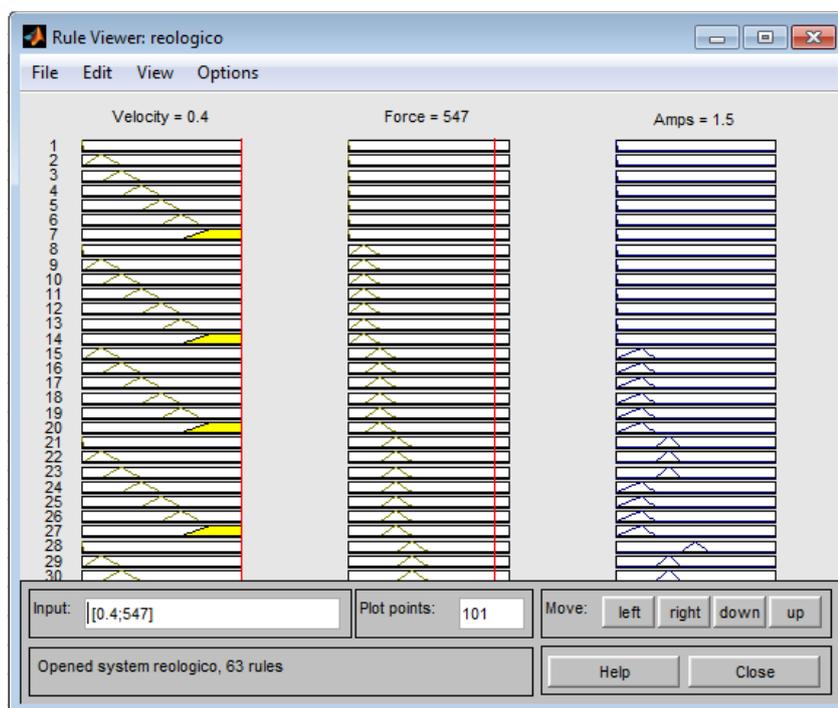


Figura 52: Reposta da corrente elétrica (A)

Fonte: Própria Autoria.

## 6.4 CONFIGURAÇÃO DO MICROCONTROLADOR PARA LEITURA DE SINAL ANALÓGICO

Para realizar a simulação e obter nos pinos A0 e A1 do Arduino Nano a leitura de um sinal analógico, é utilizado um potenciômetro como um divisor de tensão de 1KΩ, que representa um sensor (como um acelerômetro).

O processo de calibração é realizado, variando a tensão nos pinos A0 e A1 de 0,00049 a 4,9999 volts. Através dessa variação na entrada, é possível simular na entrada do microcontrolador as velocidades relativa e absoluta utilizadas no controle nebuloso (seção 3.2.2). Na Figura 53 podemos observar a disposição do potenciômetro RV1 (velocidade) e RV2 (velocidade relativa).

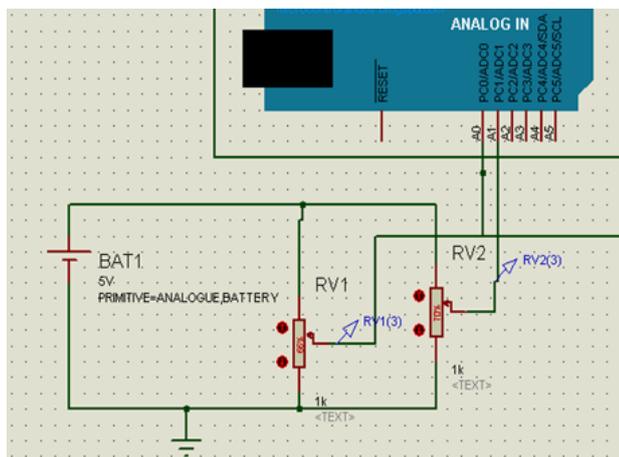


Figura 53: Ligação dos sensores com o microcontrolador.

Fonte: Própria Autoria.

### 6.4.1 Equação para Definição da Velocidade Relativa

Para determinação da escala de resolução para aquisição do sinal que representa a velocidade relativa, considerar-se-á a divisão dos 5V pela quantidade de níveis do conversor A/D do microcontrolador:

$$R_e = \frac{5}{1023} = 0,0048875553 \quad (6.4)$$

Assim é possível determinar o nível de tensão de entrada que o sensor está enviando para o microcontrolador com um o sinal variando de 0V a 5V. Podemos observar na Tabela 5 a relação da variação de nível para variação da velocidade relativa.

**Tabela 5: Determinação da Velocidade Relativa.**

Sinal de Entrada	Velocidade Relativa m/s
0	-0,4
1023	+0,4

Fonte: Própria Autoria.

Desta forma é possível determinar a velocidade relativa conforme a equação (6.5):

$$V_r = \left( \left( \frac{S_v \cdot R_e}{12,5} \right) \cdot 2 \right) - 0,4 \quad (6.5)$$

onde:  $S_v$  representa o valor de entrada do sensor.

#### 6.4.2 Equação para Definição da Velocidade

O mesmo processo para determinação da velocidade relativa foi utilizado para determinação da velocidade absoluta. Podemos observar na Tabela 6 a relação da variação de nível para variação da velocidade.

**Tabela 6: Determinação da velocidade**

Sinal de Entrada	Velocidade Relativa m/s
0	-0,1
1023	+0,1

Fonte: Própria Autoria.

Desta forma é possível determinar a velocidade conforme a equação (6.6):

$$V = \left( \left( \frac{S_v \cdot R_e}{50} \right) \cdot 2 \right) - 0,1 \quad (6.6)$$

#### 6.4.3 Diagrama do fluxo de operações para determinação da força

Como demonstra o diagrama na Figura 54, define-se as duas entradas como sensor 1 e sensor 2, e sendo responsáveis pela leitura das velocidades [m/s] e informando ao microcontrolador as suas variações no qual é feito a conversão do sinal analógico/digital e realizada as operações nebulosas, determinando a força a ser aplicada no amortecedor.

Enviando o valor da força [N] calculada via comunicação serial para o segundo microcontrolador, que é responsável pelo cálculo da corrente elétrica a ser aplicada na bobina do amortecedor.

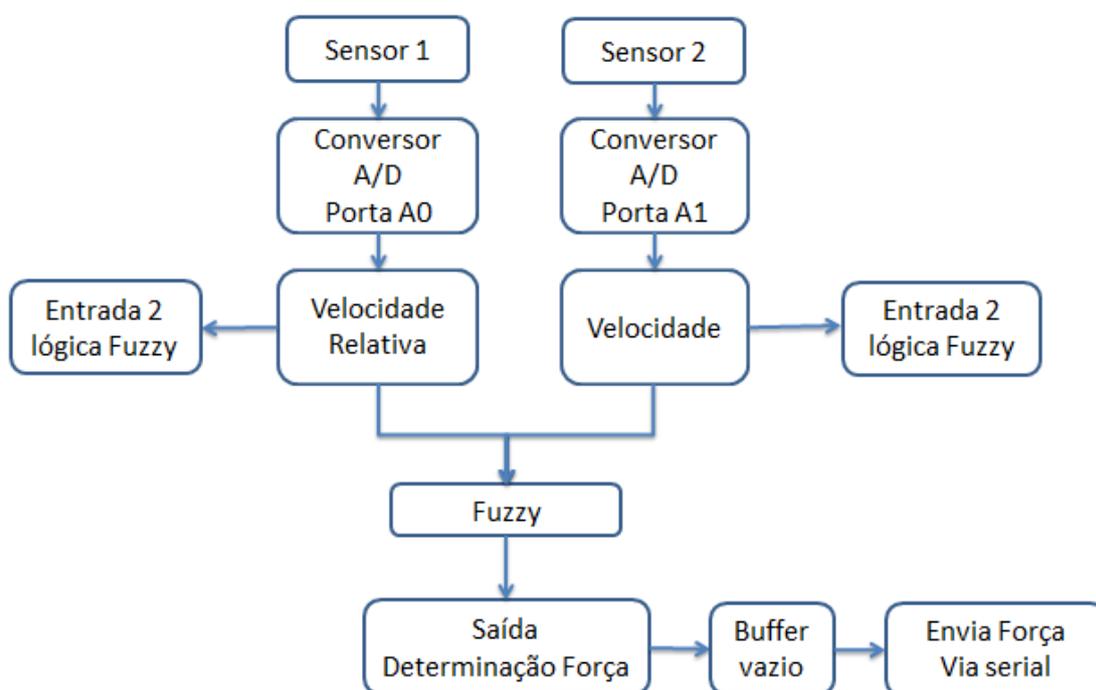
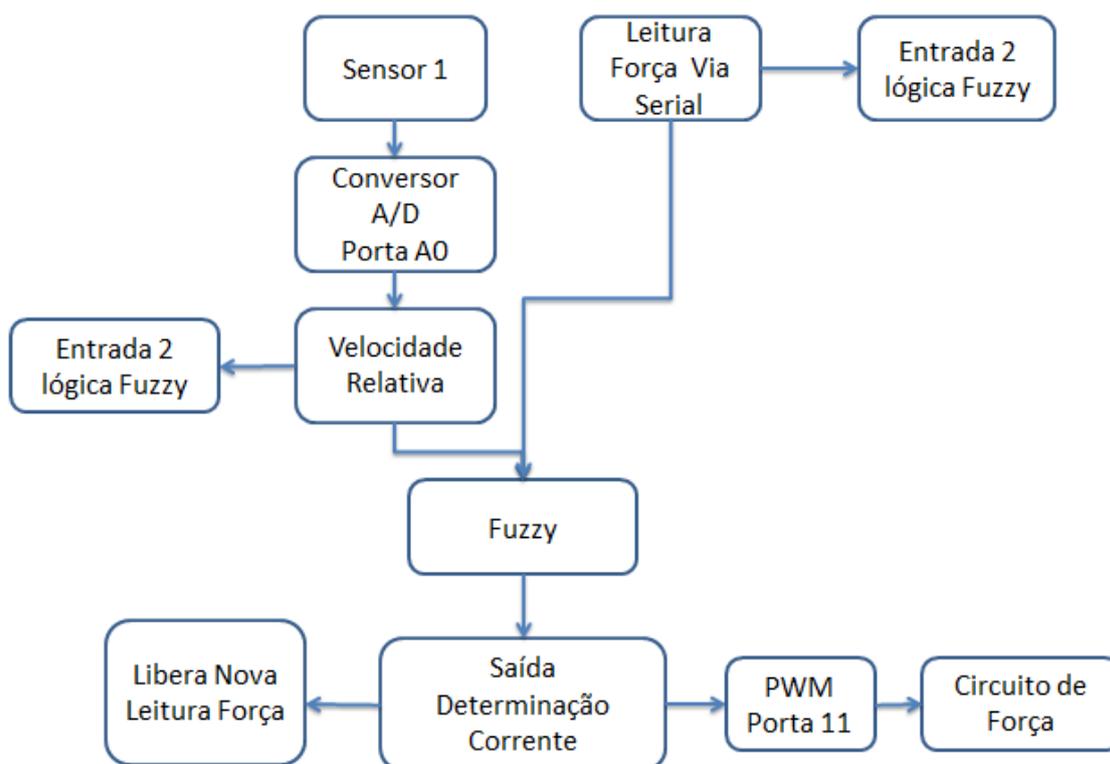


Figura 54 Diagrama dos passos para determinação da força.

Fonte: Própria Autoria.

#### 6.4.4 Diagrama do fluxo de operações para determinação da corrente

Como podemos observar o diagrama na Figura 55, o valor da velocidade relativa [m/s] é determinada pelo sensor 1, e o valor da força [N] pelo microcontrolador 1, o microcontrolador 2 recebe via comunicação serial a velocidade relativa [m/s] e a força [N] como as duas entradas do controlador nebuloso, determinado assim a corrente que será aplicada na bobina do amortecedor.

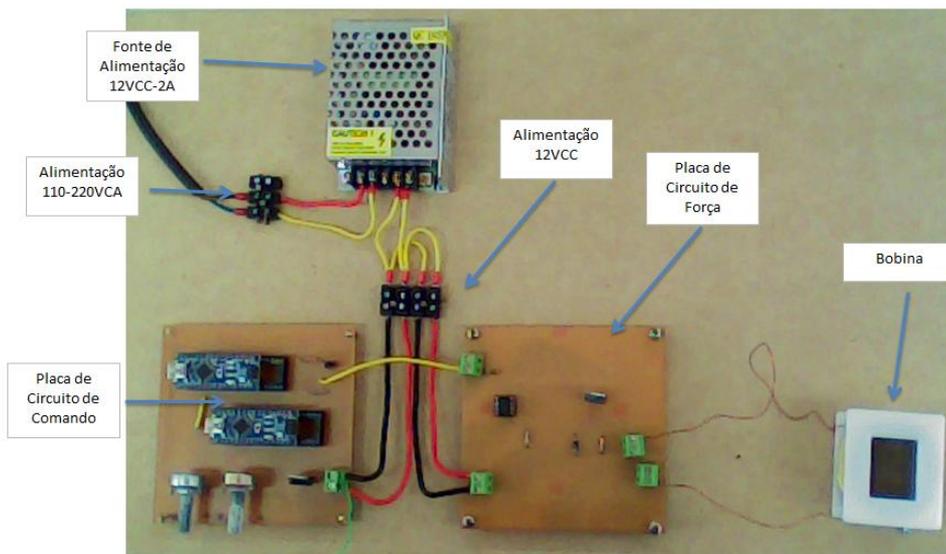


**Figura 55: Diagrama de passos para determinação da corrente**

Fonte: Própria Autoria.

## 6.5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Na Figura 56 podemos observar o protótipo proposto para as simulações experimentais. Sendo o protótipo composto por um circuito comando, um circuito de força, e uma bobina que representa o amortecedor MR.

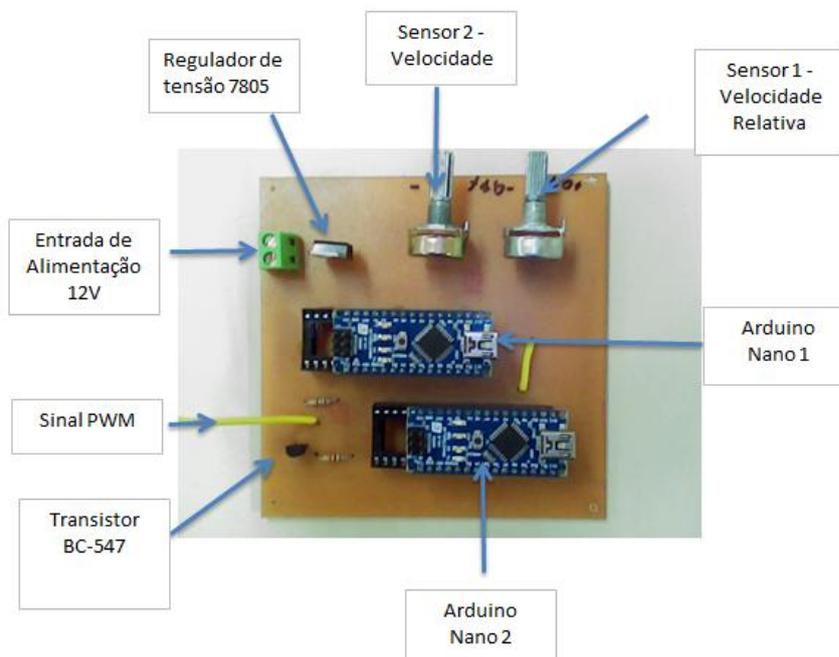


**Figura 56: Visão geral do protótipo.**

Fonte: Própria Autoria.

### 6.5.1 Circuito de Comando

Na Figura 57 podemos observar o circuito de comando.



**Figura 57: Circuito de comando.**

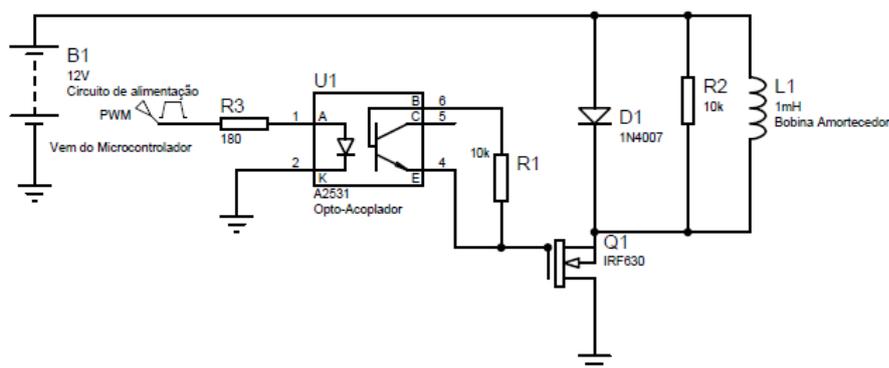
Fonte: Própria Autoria.

O circuito de comando é alimentado com 12VCC, com regulador de tensão 7805, para adequar o nível de tensão para 5VCC para alimentação dos

microcontroladores. Sendo utilizados 2 potenciômetros de  $1K\Omega$  para simular sensores que determinam a velocidade relativa e a velocidade para determinação da força (N) e da corrente elétrica (A). Dois Arduinos Nano, sendo o primeiro responsável pela determinação da força a ser aplicada no amortecedor, obtida da regra de controle nebuloso definida na seção 5.2.1, e o segundo é responsável pela determinação da corrente elétrica que será aplicada na bobina do amortecedor, definida na seção 5.2.2, o qual gera um sinal PWM proporcional ao valor da corrente através da porta 9 e enviará esse sinal para placa de circuito de força.

### 6.5.2 Circuito de Força

Na Figura 58 podemos observar o circuito esquemático do circuito de força.



**Figura 58: Circuito de força para aplicação da corrente elétrica (A).**

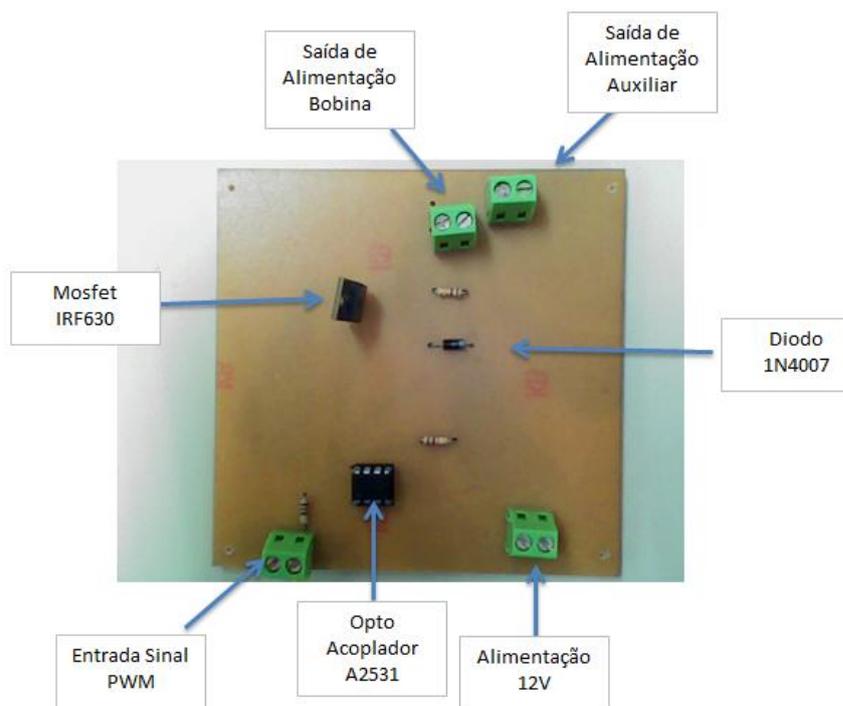
**Fonte: Própria Autoria.**

Podemos observar na Figura 58 onde será feita a ligação da bobina que representará o amortecedor MR, com 1mH e resistência de  $5\Omega$ . Para corrigir a corrente será considerado um circuito de potência, composto pelos seguintes componentes:

- 1 Fonte de alimentação de 12VCC;
- 1 Mosfet IRF630/640;
- 1 Opto-acoplador A2531;
- 1 Diodo 1N4007;

- 3 Resistores 1 de  $180\Omega$ , e 2 de  $10K\Omega$ .

Ao aplicar um PWM na bobina será aplicado um sinal de tensão médio, com essa variação da tensão a corrente terá variação na bobina de acordo com força estimada pelo controlador nebuloso.



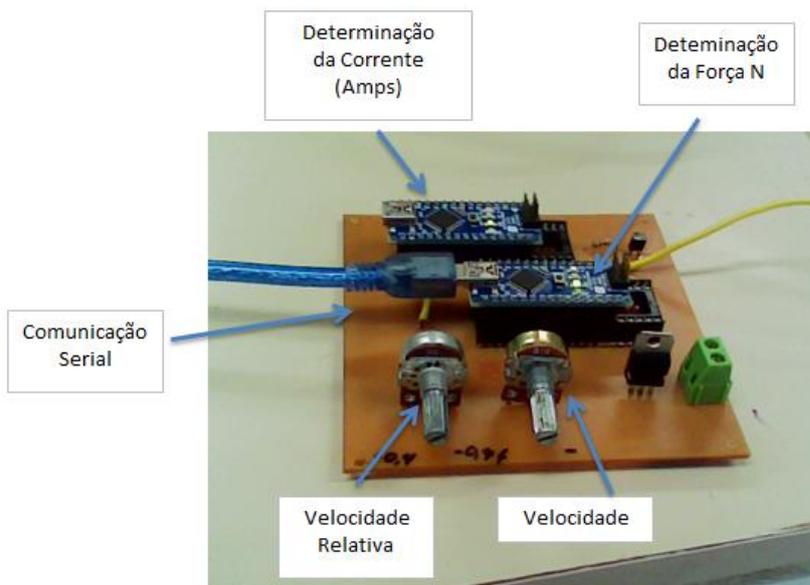
**Figura 59: Circuito de força.**

**Fonte: Própria Autoria.**

O circuito de força é alimentado com 12VCC. Para proteção dos Arduinos e para separação do circuito de controle e do circuito de força, é utilizado opto acoplador A2531, o qual é responsável pelo chaveamento do Mosfet IRF630, utilizado para entregar uma tensão média na bobina, e utilizando um diodo roda livre 1N4007.

### 6.5.3 Comunicação de dados

Na Figura 60 podemos observar o circuito utilizado para fazer a leitura do sinal analógico que representa a velocidade relativa, velocidade, através do recurso comunicação serial.



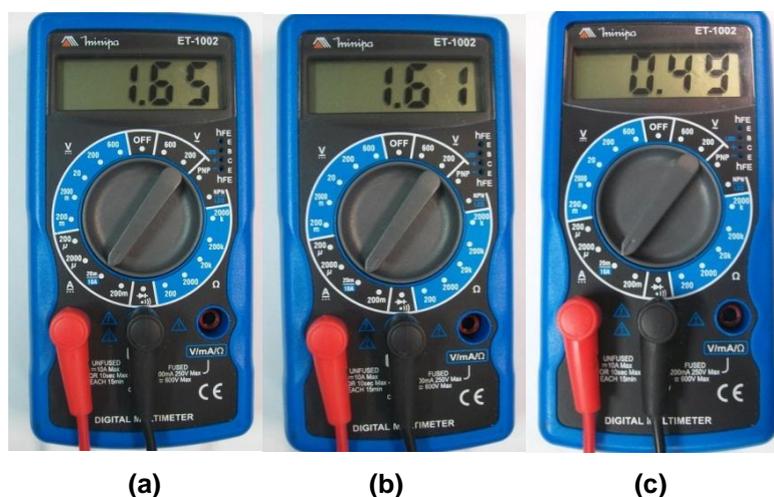
**Figura 60: Comunicação serial com o computador para aquisição de dados.**  
**Fonte: Própria Autoria.**

## 6.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 6.6.1 Medição da corrente aplicada na bobina do amortecedor

Para verificar o valor da corrente aplicada na bobina através do circuito de força foi utilizado multímetro marca Minipa ET-1002.

Na Figura 61 podemos observar algumas das medições realizadas para verificação da corrente aplicada na bobina.



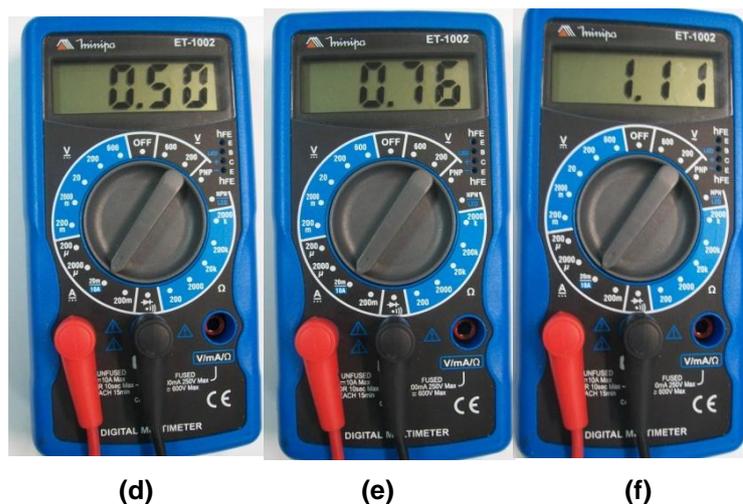
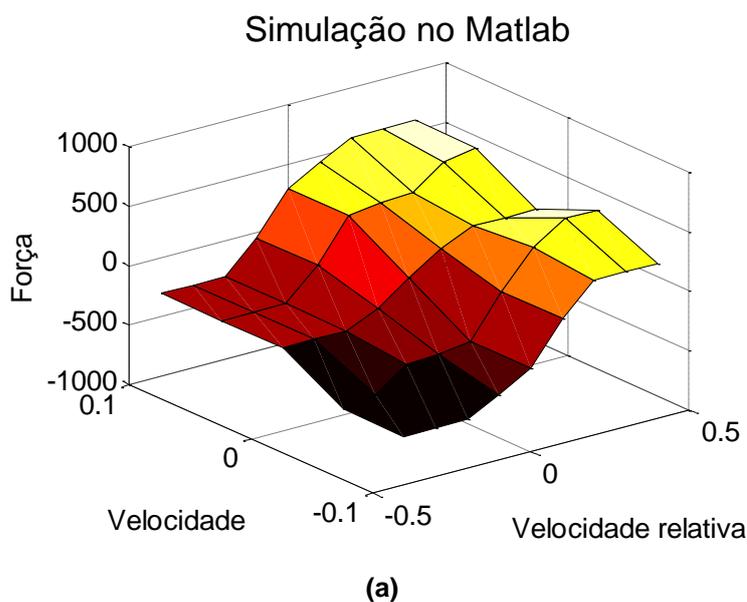


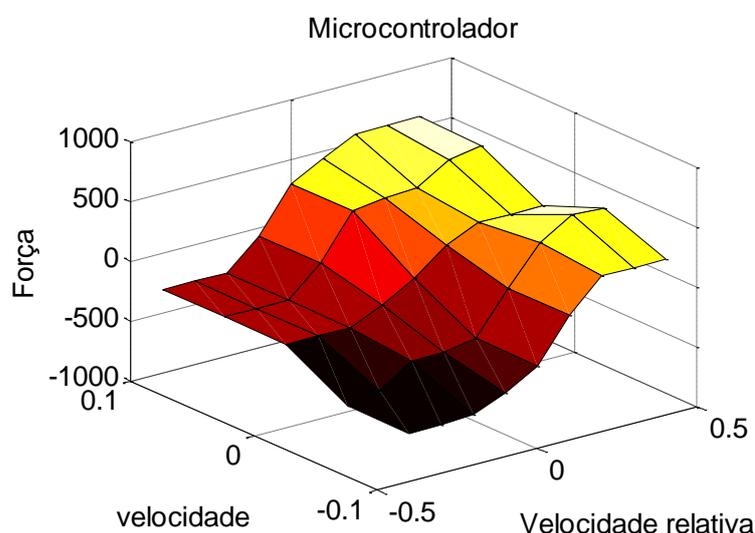
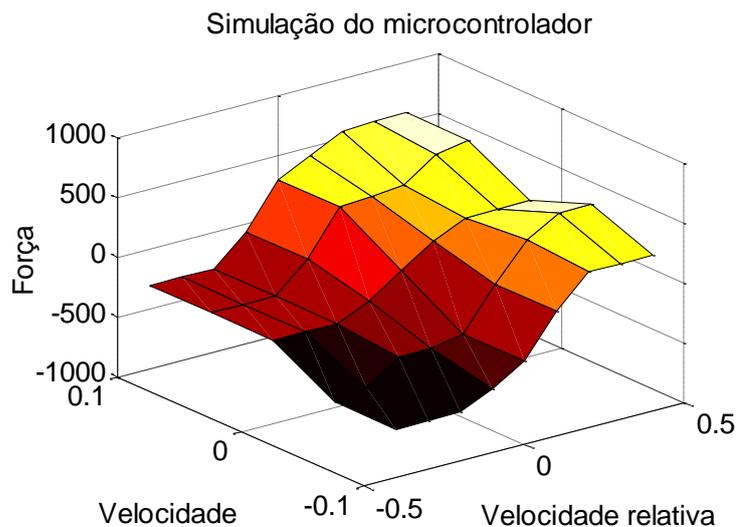
Figura 61: Corrente elétrica aplicada na bobina. (a)  $V_r=0,4$  [m/s] e  $F=547,79$  [N]. (b)  $V_r= -0,3$  [m/s] e  $F= -588,03$  [N]. (c)  $V_r= 0,2$  [m/s] e  $F= 300,63$  [N]. (d)  $V_r= -0.4$  [m/s] e  $F= -305,55$  [N]. (e)  $V_r= 0,3$  [m/s] e  $F= 347,52$  [N]. (f)  $V_r= -0.1$  [m/s] e  $F= -351,35$  [N].

Fonte: Própria Autoria.

### 6.6.2 Análise dos Resultados Experimentais Obtidos

Com o objetivo de analisar a eficiência do protótipo proposto, os resultados experimentais foram comparados com resultados obtidos da simulação numérica do toolbox de controle Nebuloso do *Matlab*<sup>®</sup>, e com as simulações computacionais do microcontrolador.





**Figura 62: Superfície de controle dimensional para o controle da Força. (a) Resultados obtidos com o Matlab<sup>®</sup>. (b) Resultados obtidos com o simulador do microcontrolador. (d) Resultados obtidos experimentalmente do protótipo**  
**Fonte: Própria Autoria.**

Podem ser observados na Figura 62 os resultados obtidos do experimento e que são muito semelhantes aos obtidos de simulações numéricas ou computacionais o que garante que o controle do protótipo terá o mesmo comportamento do que os obtidos nas simulações.

E de acordo com Tusset, (2008) uma forma de analisar a diferença entre os valores obtidos do modelo experimental e os obtidos através de simulações

computacionais e simulações numéricas é através do cálculo do erro padrão de estimativa.

O erro padrão de estimativa pode ser obtido considerando a seguinte equação:

$$S_F = \sqrt{\frac{\sum E_F^2}{n}}$$

$$S_C = \sqrt{\frac{\sum E_C^2}{n}}$$
(6.7)

onde:  $E_C^2 = (C_{ML} - C_M)^2$ , sendo  $C_{ML}$  corrente elétrica prevista para o controle do amortecedor MR obtida com o Matlab<sup>®</sup>,  $C_M$  corrente elétrica prevista para o controle do amortecedor MR obtida do microcontrolador.  $E_F^2 = (F_{ML} - F_M)^2$  sendo  $F_{ML}$  a força prevista para o controle do amortecedor MR obtida com o Matlab<sup>®</sup>,  $F_M$  a força prevista para o controle do amortecedor MR obtida do microcontrolador,  $n$  representa a quantidade de dados.

No Quadro 6 podemos observar as variações do erros da força ao quadrado entre as simulações obtidas do Matlab<sup>®</sup> e as simulações numéricas do microcontrolador.

**Quadro 6: Quadrado do erro da força  $E_F^2$**

		Velocidade Relativa									
		$E_F^2$	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Velocidade	-0,1		0,8281	0,2025	0,0144	68,3929	0,3481	102,82	0,2025	0,1764	0,1764
	-0,05		4,4944	90,25	0,6084	100,4	0,3481	102,82	146,652	579,365	532,225
	0		6,5025	6,6049	7,3984	29,9209	0,0121	41,4736	0,0009	0,0004	0,0009
	0,05		6,7081	6,7081	7,3984	135,024	0,0016	408,848	146,652	64	98,6049
	0,1		6,5025	6,6049	7,3984	135,024	0,0016	275,892	310,464	218,153	67,4041

Fonte: Própria Autoria.

Na Figura 63 podemos observar a variação dos erros apresentados no Quadro 6.

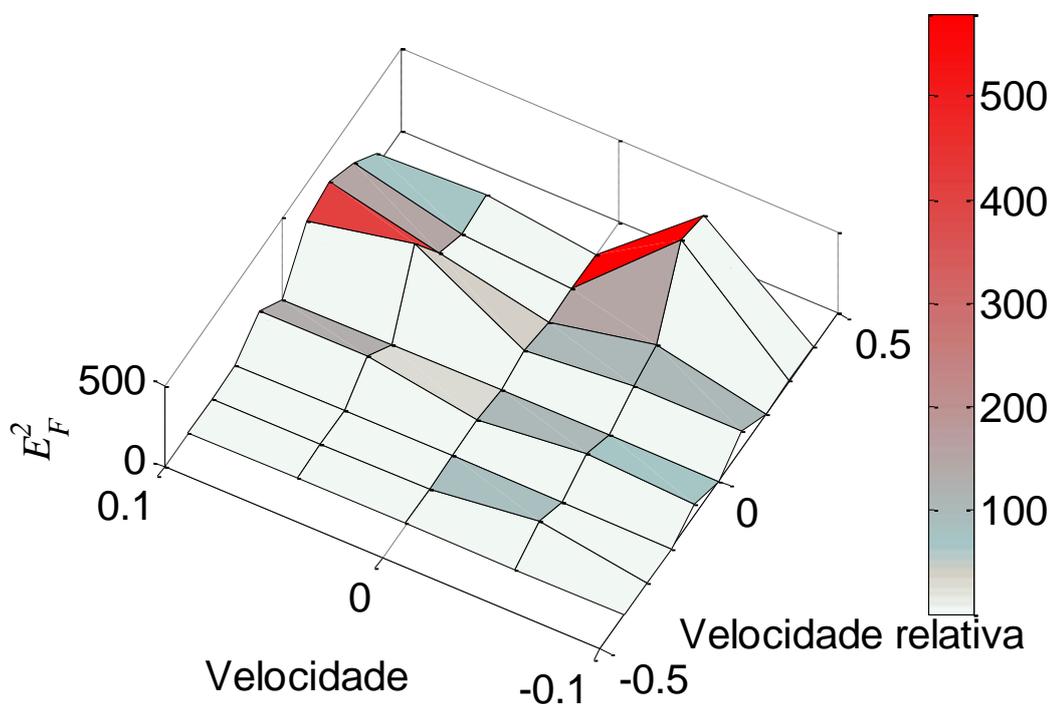


Figura 63: Quadrado do erro da força  $E_F^2$

Fonte: Própria Autoria.

No Quadro 7 podemos observar a variação dos erros da corrente ao quadrado entre as simulações obtidas do Matlab<sup>®</sup> e as simulações numéricas do microcontrolador.

Quadro 7: Quadrado do erro da corrente  $E_C^2$

		Velocidade Relativa									
		$10^3 \times E_C^2$	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Velocidade	-0,1		1,6	1,6	1,6	22,5	0,9	0	0,1	0,1	0
	-0,05		1,6	1,6	0,1	1,6	0,9	0	16,9	1,6	2,5
	0		0,1	0,1	0,1	2,5	0	3,6	0,1	0,1	0,1
	0,05		0,1	0,1	0,1	6,4	0,9	3,6	52,9	0,9	1,6
	0,1		0,1	0,1	0,1	6,4	0,9	32,4	1,6	1,6	1,6

Fonte: Própria Autoria.

Na Figura 64 podemos observar a variação dos erros apresentados no Quadro 7.

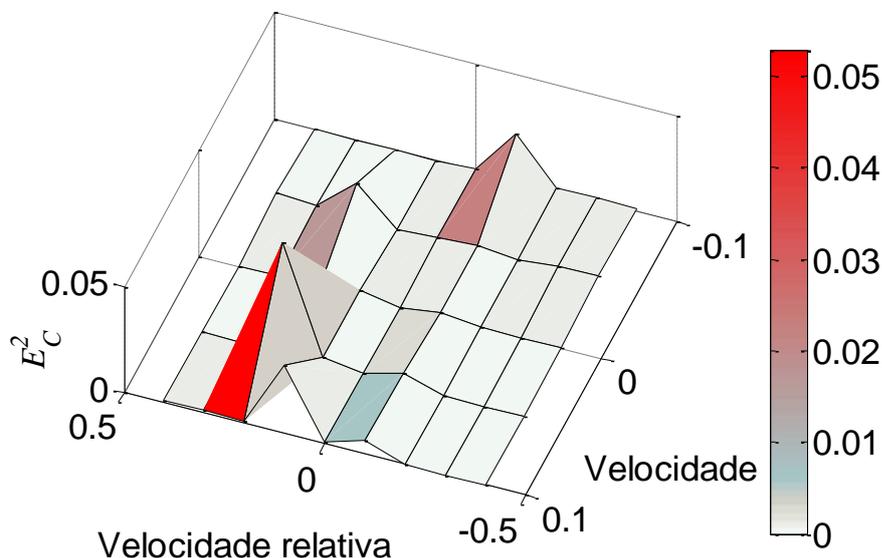


Figura 64: Quadrado do erro da corrente  $E_C^2$ .  
Fonte: Própria Autoria.

Considerando os valores dos Quadros 6 e 7, e as equações (6.7) o erro padrão de estimativa calculado é de:  $S_F = 9,0965$  [N],  $S_C = 0,0620$  [A].

No Quadro 8 podemos observar a variação dos erros da força ao quadrado entre as simulações obtidas do Matlab<sup>®</sup> e os resultados experimentais do microcontrolador.

Quadro 8: Quadrado do erro da força  $E_F^2$  para os dados experimentais

		Velocidade Relativa								
		-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Velocidade	$E_F^2$									
	-0,1	0,828	3,88	45,968	26,625	15,92	102,82	0,176	0,176	0,176
	-0,05	1,322	10,692	2,31	107,123	18,232	102,82	2,371	55,9504	705,434
	0	6,502	6,812	78,854	29,92	788,486	41,473	1,876	58,2169	25,806
	0,05	6,502	6,812	6,604	135,024	3,348	24,700	8,643	155,501	254,084
	0,1	6,502	6,812	6,502	135,024	2,073	43,692	119,465	149,084	67,404

Fonte: Própria Autoria.

Na Figura 65 podemos observar a variação dos erros apresentados no Quadro 8.

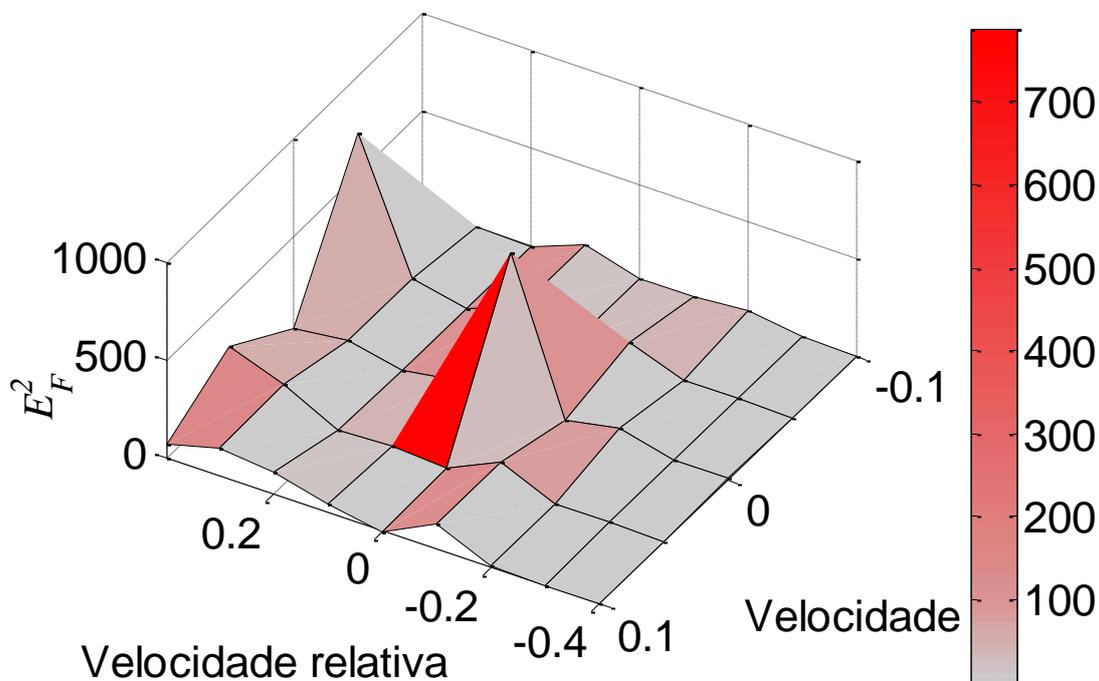


Figura 65: Quadrado do erro da força  $E_F^2$  para os dados experimentais

Fonte: Própria Autoria.

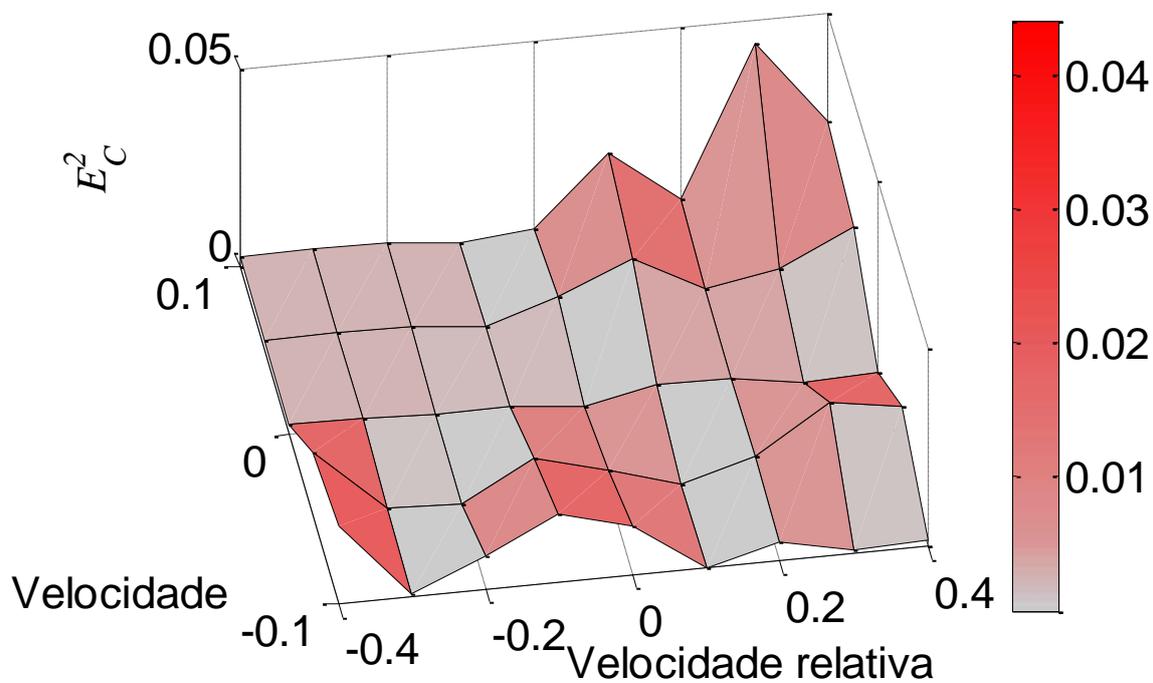
No Quadro 9 podemos observar a variação dos erros da corrente elétrica ao quadrado entre as simulações obtidas do Matlab® e os resultados experimentais do microcontrolador.

Quadro 9: Quadrado do erro da corrente elétrica  $E_C^2$  para os dados experimentais

		Velocidade Relativa								
		$10^3 \times E_C^2$	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3
Velocidade	-0,1	19,6	0,4	8,1	16,9	12,1	0	4,9	0,9	1,6
	-0,05	16,9	0,9	0,1	10	4,9	0	4,9	16,9	14,4
	0	2,5	2,5	1,6	1,6	0	3,6	3,6	0,9	1,6
	0,05	2,5	2,5	2,5	0,4	6,4	14,4	4,9	8,1	16,9
	0,1	2,5	2,5	2,5	0,4	2,5	19,6	6,4	44,1	22,5

Fonte: Própria Autoria.

Na Figura 66 podemos observar a variação dos erros apresentados no Quadro 9.



**Figura 66: Quadrado do erro da corrente elétrica  $E_C^2$  para os dados experimentais**  
 Fonte: Própria Autoria.

Considerando os valores do Quadro 9 e a equação (6.7) o erro padrão de estimativa calculado é de:  $S_F = 8,6648$  [N],  $S_C = 0,0833$  [A].

Como pode ser observado nos resultados obtidos nesta seção o protótipo demonstrou ser uma opção eficiente no controle da corrente da bobina de um amortecedor MR.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Através do desenvolvimento deste trabalho foi possível observar a importância do desenvolvimento de sistemas de controle que incorporem as não linearidades dos atuadores e dos controladores.

Com a utilização dos controladores *nebulosos* foi possível desenvolver um sistema de controle flexível com relação às variações dos parâmetros do amortecedor assim como a variações na suspensão, pois ambos o controladores (*nebuloso* da força) como o (*nebuloso* da corrente) podem ser adequados para diferentes situações, através da variação do range da Força.

Os resultados das simulações numéricas demonstraram que a estratégia de controle escolhida aumentou a segurança do veículo reduzindo os deslocamentos do eixo da roda e reduziu o tempo de exposição do chassi a vibrações causadas por distúrbios da estrada.

Com a montagem do protótipo foi possível observar a possibilidade de implementar na prática os resultados obtidos das simulações, e que os resultados são satisfatórios para o microcontrolador Arduino Nano V3.

Para trabalhos futuros considera-se a possibilidade de utilizar outros tipos de microcontroladores com fins comerciais que possuam uma velocidade de processamento superior ao utilizado.

Considera-se também a possibilidade de implementar outras técnicas de controle, como o controle adaptativo, controle ótimo, assim como modelos de amortecedor MR que consideram a histerese, como o modelo *Bouc-Wen* modelo matemático proposto por LuGre.

Publicação relativa aos resultados parciais do trabalho:

SILVA, R. N. E., Lenz, W. B., Balthazar, J. M., Bueno, A. M., Tusset, A. M., 2013. **“Nebuloso control strategy of a nonlinear full-car model using a magnethorheological (MR) damper”**. In: COBEM 2013, 2013, pp. 2068-2079.

## REFERÊNCIAS

ALLEYNE, A.; HEDRICK, J. K. Nonlinear Control of a Quarter Car Active Suspension. **Proc. American Control Conf**, v. 1, p. 21-25, 1992.

ARDUÍNO. **Arduino cc**. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 07 jul. 2014.

ANFLOR, C. T. M. Estudo da Transmissibilidade da Vibração no Corpo Humano na Direção Vertical e Desenvolvimento de um Modelo Biodinâmico de Quatro Graus de Liberdade, Dissertação de Mestrado, 2003, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.

BALBINOT, A. Caracterização dos níveis de vibração em motoristas de ônibus: um enfoque no conforto e na saúde. Tese de doutorado 2001, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.

BARROS, A. C; et al. Biblioteca para implementação de controladores utilizando lógica Nebuloso. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v: 27, n. 2, p. 141-149, 2006.

BARANWAL D.; DESHMUKH, T.S. MR-Fluid Technology and Its Application- A Review. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, p. 563-569, 2012.

BRAGA, N. Eletrônica básica para mecatrônica. 1. Ed, São Paulo: Saber, 2005.

BUCKNER, G. D.; SCHUETZE, K. T.; BENO, J. B. Active Vehicle Suspension Control using Intelligent Feedback Linearization. **Proc. American Control Conf.**, p. 4014-4018, 2000.

BUTZ T.; STRYK V. O. Modelling and Simulation of ER and MR Fluid Dampers. WILEY-VCH Verlag Berlin GmbH, 13086 Berlin, 2002.

CREWS J. H.; MATTSON M. G.; BUCKNER G. D. Multi-objective control optimization for semi-active vehicle suspensions. **Journal of Sound and Vibration**, v. 330, p. 5502–5516, 2011.

CRIVELLARO, C. Controle robusto de suspensão semi-ativa para caminhonetes utilizando amortecedores magneto-reológicos. 439 Tese 2008 (Doutorado) - Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica.

D'AZZO, J.; HOUPIS, C. H. Análise e projeto de sistemas de controle lineares. Rio de Janeiro: Guanabara, 1975.

DRIANKOV D.; HELLENDORN H.; REINFRANK M. An Introduction to Nebuloso Control. **Springer-Verlag**, 1993.

EHRGOTT, R.C.; MASRI, S.F. Modelling of Oscillatory Dynamic Behavior of Electrorheological Materials in Shear. *Smart Materials and Structures*, v. 4, p. 275-285, 1992.

FANG Z.; et al. Semi-active Suspension of a Full-vehicle Model based on Double-loop Control. **Procedia Engineering** v.16, p. 428 – 437, 2011.

GAMOTA, D.R., FILISKO, F.E. Dynamic Mechanical Studies of Electrorheological Materials: Moderate Frequencies. **Journal of Rheology**, v. 35, p. 399-425. 1991.

GASPAR, P.; SAZASZI, I.; BOKOR, J. Active suspension design using linear parameter varying control. **International Journal of Vehicle Autonomous Systems**, p. 206-221, 2003.

ISO 2631-1. Mechanical Vibration and shock: evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part I: general requirements, **In International Standard**. 1997.

JIMÉNEZ, R.; ÁLVAREZ-ICAZA, L.; Lugre friction model for magnetorheological damper. Structural control and health monitoring, Proceedings of the 42nd IEEE, **In Conference on Decision and Control**, Maui, Hawaii USA, p. 3840-3845.

KASEMI, B.; et al. Fuzzy-PID Controller for Semi-Active Vibration Control Using Magnetorheological Fluid Damper. *Procedia Engineering*, v. 41, p. 1221 – 1227, 2012

KOO, J. H. Using Magneto-Rheological Dampers in Semiactive Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations. Tese Mechanical Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. 2003.

LEE. C. C. Nebuloso logic in control systems: Nebuloso logic controller (part i); **IEEE Transactions on Systems**, Man an Cybernetics, v.20(2), p.408-418, Mar/Apr, 1990.

LIAO W. H.; LAI. C. Y. Harmonic analysis of a magnetorheological damper for vibration control. Institute of Physics Publishing, **Smart Mater Struct**, v. 11, p. 288–296, 2002.

LI, R.; CHEN, W. M.; YU, M.; LIU, D. K. Nebuloso Intelligent Control of Automotive Vibration via Magneto-rheological Damper. Proceedings of the 2004 IEEE, **In Conference on Cybernetics and Intelligent Systems**, Singapore, p. 503-507. 2004.

LORD. LORD Magneto-Rheological (MR). Disponível em: <[http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-\(mr\)/mr-controllers.xml](http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-(mr)/mr-controllers.xml)>. Acesso em: 14 jan. 2014.

MONROE. Amortecedores Monroe. Disponível em: <<https://www.monroe.com.br/>>. Acesso em: 01 set. 2014.

MOURA, E.D. A. Estudo de suspensões passiva, semi-ativa MR e ativa; Dissertação de Mestrado, P.P.E.M UFI. 2003.

MCMANUS, S. J.; St. CLAIR, A.; BOILEAU, P. E.; BOUTIN, J.; RAKHEJA, S. Evaluation of vibration and shock attenuation performance of a suspension seat with a semi-active magnetorheological fluid damper. **Journal of Sound and Vibration**, p. 313-327, 2002.

MA. X. Q.; WANG, E. R.; RAKHEJA S.; SU, C.Y. Evaluation of Modified Hysteresis Models for Magneto-Rheological Fluid Dampers. **In The Fourth International Conference on Control and Automation (ICCA'03)**, Montreal, Canada, p. 760-764, 2003.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a Nebuloso logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, p.1-13. 1975.

MAMDANI, E, H; Advances in the linguistic syntesis of Nebuloso controllers. **Int. J. Man-Mach Stud**, v. 8, p. 669-678, 1976.

MAMDANI, E, H, PROCYK T, and N, BAAKLINI; Application of Nebuloso Logic to Controller Design Based on Linguistic Protocol; Queem Mary College.

PARÉ, C. A. Experimental Evaluation of Semi-active Magento-Rheological Suspensions for Passenger Vehicles. Thesis for the degree of Máster of Science in Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

PICCIRILLO, V.; TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M. Dynamical jump attenuation in a non-ideal system through a magnetorheological damper. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, v. 52, p. 595-604, 2014.

PINHEIRO, C.. Estratégia de controle nebuloso para suspensão ativa automobilística. In: Congresso Brasileiro de Automática. 2004, **Anais**: Gramado, Brasil. 2004.

SIMON, D. E.; AHMADIAN, M. Vehicle Evaluation of the Performance of Magneto Rheological Dampers for Heavy Truck Suspension. **Journal of Vibration and Acoustics**, v. 123, p. 365-375. 2001.

SILVA, R. N. E.; LENZ, W. B.; BALTHAZAR, J. M.; BUENO, A. M.; TUSSET, A. M. Nebuloso control strategy of a nonlinear full-car model using a magnetorheological (MR) damper; In: **COBEM 2013**, 2013, p. 2068-2079. 2013.

SPENCER, B. F.; DYKE, S. J.; SAIN, M. K.; CARLSON, J. D. Phenomenological model of a magnetorheological damper. *J. Eng. Mech.*, p. 230-238, 1997.

SPAGGIARI, A. Properties and applications of Magnetorheological fluids. *Frattura ed Integrità Strutturale*, p. 57-61, 2013;

SANDRI S.; CORREA, C. Lógica Nebulosa. V Escola de Redes Neurais. Conselho Nacional de Redes Neurais ITA, São José dos Campos, SP, p. 73-90, 1999.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M.G. Controle e Modelagem Nebuloso. Edgard Blücher, São Paulo, 1999.

SIMON, D. E.; AHMADIAN, M. Vehicle Evaluation of the Performance of Magneto Rheological Dampers for Heavy Truck Suspension. **Jornal of Vibration and Acoustics**, p. 365-375, 2001.

SOEIRO, N. S. Curso de fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores. Belém, Universidade Federal do Pará, 2008.

SOUZA, D. J. **Conectando o PIC: recursos avançados**. 1. ed. Érica. São Paulo. 2003.

STANWAY, R.; SPROSTON, J. L.; STENVENS, N. G. Non-linear Identification of an Eleetctro-rheological Vibration Damper. IFAC Identification and System Parameter Estimation, p. 195-200, 1985.

STANWAY, R.; SPROSTON, J. L.; STENVENS, N. G. Non-linear Identification of an Eleetctro-rheological Vibration Damper. **J. Electrostatics**, v. 20, p. 167-184, 1987.

RAGHAVENDRA, D. N.; PRAVIN, M. SINGRU. Resonance, stability and chaotic vibration of a quarter-car vehicle model with time-delay feedback. Department of Mechanical Engineering, Birla Institute of Technology and Science, Pilani, K. K. Birla Goa Campus, Zuarinagar, Goa 403726, India, 2010 Elsevier B.V.

RILL, G. Vehicle Dynamics. Lecture notes, Fachhochschule Regensburg, 2003.

TEIXEIRA, R. L. Uma metodologia de projeto de controladores híbridos inteligentes com aplicações no controle ativo de vibrações mecânica. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFB, Uberlândia. 2001.

TUSSET, A. M. Controle ótimo aplicado em modelo de suspensão veicular não-linear controlada através de amortecedor magneto-reológico. Tese (Doutorado). P,P,E,M, UFRGS. 2008.

TUSSET, A. M.; TAMAGNA, A.; RAFIKOV, M.; GOMES, H. M. Comparação entre a aplicação do controle ótimo e o controle Nebuloso em um modelo de suspensão não-linear, In: XXVI ENEGEP, 2006.

TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M.; CHAVARETTE, F. R.; FELIX, J. L. P. On energy transfer phenomena, in a nonlinear ideal and nonideal essential vibrating systems, coupled to a (MR) magneto-rheological damper. *Nonlinear Dynamics*, p. 1859-1880, 2012.

TUSSET, A.M.; BALTHAZAR, J.M.; FELIX, J.L.P. On elimination of chaotic behavior in a non-ideal portal frame structural system, using both passive and active controls. *Journal of Vibration and Control*, p. 803-813, 2003.

TUSSET, A. M.; RAFIKOV, M.; BALTHAZAR, J. M. Intelligent controller design for magnetorheological damper based on quarter-car model. **Journal of Vibration and Control**, p. 1907-1920, 2009.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets\*. Department of Electrical Engineering and Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, California, Information and Control, v. 8, p. 338-353, 1965.

ZHU, Q.; ISHITOBI, M. Chaotic vibration of a nonlinear full-vehicle model. *International Journal of Solids and Structures*, p. 747-759. 2006.

## APENDICE

Tabela 7: Comparação entre os resultados obtidos nas simulações do matlab<sup>r</sup> e as simulações do microcontrolador.

V <sub>r</sub>	V	F <sub>ML</sub>	C <sub>ML</sub>	F <sub>M</sub>	C <sub>M</sub>	Erro <sub>F</sub>	Erro <sub>C</sub>
-0,4	-0,1	-596	1,5	-595,09	1,46	0,8281	0,0016
-0,4	-0,05	-587	1,5	-584,88	1,46	4,4944	0,0016
-0,4	0	-302	0,55	-304,55	0,54	6,5025	0,0001
-0,4	0,05	-302	0,55	-304,59	0,54	6,7081	0,0001
-0,4	0,1	-302	0,55	-304,55	0,54	6,5025	0,0001
-0,3	-0,1	-590	1,49	-590,45	1,45	0,2025	0,0016
-0,3	-0,05	-538	1,49	-547,5	1,45	90,25	0,0016
-0,3	0	-302	0,55	-304,57	0,54	6,6049	0,0001
-0,3	0,05	-302	0,55	-304,59	0,54	6,7081	0,0001
-0,3	0,1	-302	0,55	-304,57	0,54	6,6049	0,0001
-0,2	-0,1	-583	1,5	-582,88	1,46	0,0144	0,0016
-0,2	-0,05	-355	0,76	-355,78	0,77	0,6084	0,0001
-0,2	0	-302	0,55	-304,72	0,54	7,3984	0,0001
-0,2	0,05	-302	0,55	-304,72	0,54	7,3984	0,0001
-0,2	0,1	-302	0,55	-304,72	0,54	7,3984	0,0001
-0,1	-0,1	-454	1,28	-462,27	1,13	68,3929	0,0225
-0,1	-0,05	-341	0,7	-351,02	0,74	100,4004	0,0016
-0,1	0	-182	0,53	-187,47	0,48	29,9209	0,0025
-0,1	0,05	-51,4	0	-63,02	0,08	135,0244	0,0064
-0,1	0,1	-51,4	0	-63,02	0,08	135,0244	0,0064
0	-0,1	-302	1,13	-301,41	1,1	0,3481	0,0009
0	-0,05	-302	1,13	-301,41	1,1	0,3481	0,0009
0	0	0	0	0,11	0	0,0121	0
0	0,05	302	1,13	301,96	1,1	0,0016	0,0009
0	0,1	302	1,13	301,96	1,1	0,0016	0,0009
0,1	-0,1	51,4	0	41,26	0	102,8196	0
0,1	-0,05	51,4	0	41,26	0	102,8196	0
0,1	0	182	0,53	175,56	0,47	41,4736	0,0036
0,1	0,05	341	0,7	320,78	0,64	408,8484	0,0036
0,1	0,1	454	1,28	437,39	1,1	275,8921	0,0324
0,2	-0,1	302	0,55	301,55	0,54	0,2025	0,0001
0,2	-0,05	355	0,76	342,89	0,63	146,6521	0,0169
0,2	0	302	0,55	301,97	0,54	0,0009	0,0001
0,2	0,05	355	0,76	342,89	0,53	146,6521	0,0529
0,2	0,1	583	1,5	565,38	1,46	310,4644	0,0016
0,3	-0,1	302	0,55	301,58	0,54	0,1764	0,0001
0,3	-0,05	525	1,49	500,93	1,45	579,3649	0,0016
0,3	0	302	0,55	301,98	0,54	0,0004	0,0001
0,3	0,05	538	1,49	530	1,46	64	0,0009
0,3	0,1	590	1,49	575,23	1,45	218,1529	0,0016
0,4	-0,1	302	0,54	301,58	0,54	0,1764	0
0,4	-0,05	526	1,5	502,93	1,45	532,2249	0,0025
0,4	0	302	0,55	301,97	0,54	0,0009	0,0001
0,4	0,05	587	1,5	577,07	1,46	98,6049	0,0016
0,4	0,1	596	1,5	587,79	1,46	67,4041	0,0016

TABELA 8: Comparação entre os resultados obtidos nas simulações do matlab<sup>r</sup> e as simulações do protótipo.

V <sub>r</sub>	V	F <sub>ML</sub>	C <sub>ML</sub>	F <sub>MP</sub>	C <sub>MP</sub>	Erro <sub>F</sub>	Erro <sub>C</sub>
-0,4	-0,1	-596	1,5	-595,09	1,64	0,8281	0,0196
-0,4	-0,05	-587	1,5	-585,85	1,63	1,3225	0,0169
-0,4	0	-302	0,55	-304,55	0,5	6,5025	0,0025
-0,4	0,05	-302	0,55	-304,55	0,5	6,5025	0,0025
-0,4	0,1	-302	0,55	-304,55	0,5	6,5025	0,0025
-0,3	-0,1	-590	1,49	-588,03	1,51	3,8809	0,0004
-0,3	-0,05	-538	1,49	-534,73	1,52	10,6929	0,0009
-0,3	0	-302	0,55	-304,61	0,5	6,8121	0,0025
-0,3	0,05	-302	0,55	-304,61	0,5	6,8121	0,0025
-0,3	0,1	-302	0,55	-304,61	0,5	6,8121	0,0025
-0,2	-0,1	-583	1,5	-576,22	1,59	45,9684	0,0081
-0,2	-0,05	-355	0,76	-356,52	0,75	2,3104	0,0001
-0,2	0	-302	0,55	-310,88	0,51	78,8544	0,0016
-0,2	0,05	-302	0,55	-304,57	0,5	6,6049	0,0025
-0,2	0,1	-302	0,55	-304,55	0,5	6,5025	0,0025
-0,1	-0,1	-454	1,28	-459,16	1,41	26,6256	0,0169
-0,1	-0,05	-341	0,7	-351,35	0,6	107,1225	0,01
-0,1	0	-182	0,53	-187,47	0,49	29,9209	0,0016
-0,1	0,05	-51,4	0	-63,02	0,02	135,0244	0,0004
-0,1	0,1	-51,4	0	-63,02	0,02	135,0244	0,0004
0	-0,1	-302	1,13	-305,99	1,02	15,9201	0,0121
0	-0,05	-302	1,13	-306,27	1,06	18,2329	0,0049
0	0	0	0	-28,08	0	788,4864	0
0	0,05	302	1,13	300,17	1,05	3,3489	0,0064
0	0,1	302	1,13	300,56	1,08	2,0736	0,0025
0,1	-0,1	51,4	0	41,26	0	102,8196	0
0,1	-0,05	51,4	0	41,26	0	102,8196	0
0,1	0	182	0,53	175,56	0,47	41,4736	0,0036
0,1	0,05	341	0,7	336,03	0,58	24,7009	0,0144
0,1	0,1	454	1,28	447,39	1,14	43,6921	0,0196
0,2	-0,1	302	0,55	301,58	0,48	0,1764	0,0049
0,2	-0,05	355	0,76	353,46	0,69	2,3716	0,0049
0,2	0	302	0,55	300,63	0,49	1,8769	0,0036
0,2	0,05	355	0,76	352,06	0,69	8,6436	0,0049
0,2	0,1	583	1,5	572,07	1,58	119,4649	0,0064
0,3	-0,1	302	0,55	301,58	0,52	0,1764	0,0009
0,3	-0,05	525	1,49	517,52	1,36	55,9504	0,0169
0,3	0	302	0,55	294,37	0,52	58,2169	0,0009
0,3	0,05	538	1,49	525,53	1,58	155,5009	0,0081
0,3	0,1	590	1,49	577,79	1,7	149,0841	0,0441
0,4	-0,1	302	0,54	301,58	0,5	0,1764	0,0016
0,4	-0,05	526	1,5	499,44	1,62	705,4336	0,0144
0,4	0	302	0,55	296,92	0,51	25,8064	0,0016
0,4	0,05	587	1,5	571,06	1,63	254,0836	0,0169
0,4	0,1	596	1,5	587,79	1,65	67,4041	0,0225

## ANEXO I

### PROGRAMA DO ARDUINO NANO 2 PARA DETERMINAÇÃO DA FORÇA (N)

```

#include "controle.h"

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode (3, INPUT);
}

float input[2];
float output[1];
void loop()
{

    int sensorValue = analogRead(A0);
    float velocidaderelativa = (((sensorValue * 0.0048875553)/12.5)*2) - 0.4;

    int sensorValue1 = analogRead(A1);
    float velocidade = (((sensorValue1 * 0.0048875553)/50)*2) - 0.1;

    input[0] = velocidaderelativa;

    input[1] = velocidade;

    output[0] = 0;

    controle(input, output);

    while (digitalRead (3)==0);
    Serial.println (output[0]);

    delay(100);
}

float _not(float x)
{

```

```

        return (float)(1.0-x);
    }

void generate(float minimum, float maximum, float st, float* values,int length)
{
    float x = minimum;
    int i;
    for(i=0;i<length;i++,x+=st)
        values[i] = x;
}

void set(float* values,int length,float value)
{
    int i;
    for(i=0;i<length;i++)
        values[i] = value;
}

float min_array(float* x, int length)
{
    if(length <= 0) return (float)0;
    float m = x[0];
    int i=1;
    for(;i<length;i++)
        m = min(m,x[i]);
    return m;
}

float max_array(float* x, int length)
{
    if(length <= 0) return (float)0;
    float m = x[0];
    int i=1;
    for(;i<length;i++)
        m = max(m,x[i]);
    return m;
}

void centroid(float* x, float* y, int length, float* Cx, float* Cy)
{
    float a = 0.0;
    float t = 0.0;
    int limit = length - 1;
    float xmin = x[limit];
    *Cx = 0;
    // *Cy = 0;

    int i = 0, j = 1;
    for (; i < limit; ++i)
    {
        j = (i + 1);
    }
}

```

```

        if (y[i] > 0 && y[j] > 0)
        {
            if ((xmin > x[i]) || (i == 0)) xmin = x[i];
            t = (((x[i] - xmin) * y[j]) - ((x[j] - xmin) * y[i]));
            a += t;
            *Cx += (x[i] + x[j] - xmin - xmin) * t;
            // *Cy += (y[i] + y[j]) * t;
        }
    }

    //t = (((x[0] - xmin) * y[i]) - ((x[i] - xmin) * y[0]));
    //a += t;
    //*Cx += (x[0] + x[i] - (2 * xmin)) * t;
    // *Cy += (y[0] + y[i]) * t;

    a *= 0.5;
    *Cx = (*Cx / (6.0 * a)) + xmin;
    // *Cy /= (6.0 * a);
}

float trapmf(float x, float a, float b, float c, float d)
{
    return (float)max(min((x - a) / (b - a), min(1.0, (d - x) / (d - c))), 0);
}

float trimf(float x, float a, float b, float c)
{
    return (float)max(min((x - a) / (b - a), (c - x) / (c - b)), 0);
}

void aggregate3(float* rules, int* ruleIndexes, int ruleIndexLength, float* xArr, float
*yArr, int resultLength, _mffloat3 mf, float a, float b, float c)
{
    int i=0, j=0;
    for(;i<resultLength;i++)
    {
        for(j=0;j<ruleIndexLength;j++)
            {yArr[i] = max(yArr[i], min(rules[ruleIndexes[j]], mf(xArr[i], a, b, c)));}
    }
}

void aggregate4(float* rules, int* ruleIndexes, int ruleIndexLength, float* xArr, float
*yArr, int resultLength, _mffloat4 mf, float a, float b, float c, float d)
{
    int i=0, j=0;
    for(;i<resultLength;i++)
    {
        for(j=0;j<ruleIndexLength;j++)

```

```

        {yArr[i] = max(yArr[i],min(rules[ruleIndexes[j]],mf(xArr[i],a,b,c,d)));}
    }
}

```

```

void controle(float* inputs, float* outputs)
{
    float Inputs1[5];

    Inputs1[0] = trapmf(inputs[0],-0.1,-0.1,-0.08575,-0.04285);

    Inputs1[1] = trimf(inputs[0],-0.08575,-0.04285,0);

    Inputs1[2] = trimf(inputs[0],-0.04285,0,0.04285);

    Inputs1[3] = trimf(inputs[0],0,0.04285,0.08575);

    Inputs1[4] = trapmf(inputs[0],0.04285,0.08575,0.1,0.1);

    float Inputs2[5];

    Inputs2[0] = trapmf(inputs[1],-0.4,-0.4,-0.32,-0.16);

    Inputs2[1] = trimf(inputs[1],-0.32,-0.16,0);

    Inputs2[2] = trimf(inputs[1],-0.16,0,0.16);

    Inputs2[3] = trimf(inputs[1],0,0.16,0.32);

    Inputs2[4] = trapmf(inputs[1],0.16,0.32,0.4,0.4);

    float R[25];
    float CondR[2];

    CondR[0] = Inputs1[0];
    CondR[1] = Inputs2[0];
    R[0] = 1 * min_array(CondR,2);

    CondR[0] = Inputs1[0];
    CondR[1] = Inputs2[1];
    R[1] = 1 * min_array(CondR,2);

    CondR[0] = Inputs1[0];
    CondR[1] = Inputs2[2];
    R[2] = 1 * min_array(CondR,2);

    CondR[0] = Inputs1[0];
    CondR[1] = Inputs2[4];
    R[3] = 1 * min_array(CondR,2);
}

```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[0];  
R[4] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[1];  
R[5] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[6] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[7] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[8] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[0];  
R[9] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[1];  
R[10] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[11] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[12] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[13] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[0];  
R[14] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[1];  
R[15] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[2];
```

```

R[16] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[3];
CondR[1] = Inputs2[3];
R[17] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[3];
CondR[1] = Inputs2[4];
R[18] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[19] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[1];
R[20] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[2];
R[21] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[3];
R[22] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[4];
R[23] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[0];
CondR[1] = Inputs2[3];
R[24] = 1 * min_array(CondR,2);

int res = 100;
float step;
float xMin;
float xMax;
float x[res];
float y[res];
float t;
int value[25];

xMin = -755;
xMax = 755;
t=0;
step = (xMax - xMin) / (float)(res - 1);
generate(xMin, xMax, step, x, res);
set(y, res, 0);
value[0] = 0;

```

```
value[1] = 1;
value[2] = 4;
aggregate4(R,value,3,x,y,res,trapmf,-755,-755,-604,-302);
value[0] = 2;
value[1] = 5;
value[2] = 6;
value[3] = 9;
value[4] = 10;
value[5] = 14;
value[6] = 15;
value[7] = 19;
value[8] = 20;
aggregate3(R,value,9,x,y,res,trimf,-604,-302,0);
value[0] = 11;
aggregate3(R,value,1,x,y,res,trimf,-302,0,302);
value[0] = 3;
value[1] = 7;
value[2] = 12;
value[3] = 13;
value[4] = 16;
value[5] = 17;
value[6] = 21;
value[7] = 24;
aggregate3(R,value,8,x,y,res,trimf,0,302,604);
value[0] = 8;
value[1] = 18;
value[2] = 22;
value[3] = 23;
aggregate4(R,value,4,x,y,res,trapmf,302,604,755,755);
centroid(x, y, res, &outputs[0], &t);
}
```

## ANEXO II

### PROGRAMA DO ARDUINO NANO 2 PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA (A)

```

#include "reologico.h"
char pin;
char byteRead;
int valor;
String val = "";
int pwm;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(4, OUTPUT);
  digitalWrite(4,LOW);
  TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 0x03;
}

float input[2];
float output[1];

void loop()
{
  int sensorValue1 = analogRead(A0);
  float velocidaderelativa = (((sensorValue1 * 0.00488755533)/12.5)*2) - 0.4;
  digitalWrite(4,HIGH);
  delay(100);

  val="";
  while (Serial.available() > 0 )
  {

  byteRead = Serial.read();
  val.concat(byteRead);
  }

  input[0] = abs (velocidaderelativa);
  input[1] = abs (forca);
  output[0] = 0;
}

```

```

if (val != "")
{
digitalWrite(4,LOW);
forca = stringToNumber(val);

reologico(input, output);

Serial.println(output[0]);

pwm = output[0]*173;
analogWrite(9, pwm);

delay(10);
}

float _not(float x)
{
    return (float)(1.0-x);
}
void generate(float minimum, float maximum, float st, float* values,int length)
{
    float x = minimum;
    int i;
    for(i=0;i<length;i++,x+=st)
        values[i] = x;
}

void set(float* values,int length,float value)
{
    int i;
    for(i=0;i<length;i++)
        values[i] = value;
}
float min_array(float* x, int length)
{
    if(length <= 0) return (float)0;
    float m = x[0];
    int i=1;
    for(;i<length;i++)
        m = min(m,x[i]);
    return m;
}
float max_array(float* x, int length)
{
    if(length <= 0) return (float)0;
    float m = x[0];
    int i=1;

```

```

        for(;i<length;i++)
            m = max(m,x[i]);
        return m;
    }
void centroid(float* x, float* y, int length, float* Cx, float* Cy)
{
    float a = 0.0;
    float t = 0.0;
    int limit = length - 1;
    float xmin = x[limit];
    *Cx = 0;
    // *Cy = 0;

    int i = 0, j = 1;
    for ( ; i < limit; ++i)
    {
        j = (i + 1);

        if (y[i] > 0 && y[j] > 0)
        {
            if ((xmin > x[i]) || (i == 0)) xmin = x[i];
            t = (((x[i] - xmin) * y[j]) - ((x[j] - xmin) * y[i]));
            a += t;
            *Cx += (x[i] + x[j] - xmin - xmin) * t;
            // *Cy += (y[i] + y[j]) * t;
        }
    }

    //t = (((x[0] - xmin) * y[i]) - ((x[i] - xmin) * y[0]));
    //a += t;
    //*Cx += (x[0] + x[i] - (2 * xmin)) * t;
    // *Cy += (y[0] + y[i]) * t;

    a *= 0.5;
    *Cx = (*Cx / (6.0 * a)) + xmin;
    // *Cy /= (6.0 * a);
}
float trimf(float x, float a, float b, float c)
{
    return (float)max(min((x - a) / (b - a), (c - x) / (c - b)), 0);
}
float trapmf(float x, float a, float b, float c, float d)
{
    return (float)max(min((x - a) / (b - a), min(1.0, (d - x) / (d - c))), 0);
}
void aggregate3(float* rules, int* ruleIndexes, int ruleIndexLength, float* xArr, float
*yArr, int resultLength, _mffloat3 mf,float a,float b,float c)
{

```

```

int i=0, j=0;
for(;i<resultLength;i++)
{
    for(j=0;j<ruleIndexLength;j++)
        {yArr[i] = max(yArr[i],min(rules[ruleIndexes[j]],mf(xArr[i],a,b,c)));}
}
}

```

```

void aggregate4(float* rules, int* ruleIndexes, int ruleIndexLength, float* xArr, float
*yArr, int resultLength,_mffloat4 mf,float a,float b,float c,float d)
{
    int i=0, j=0;
    for(;i<resultLength;i++)
    {
        for(j=0;j<ruleIndexLength;j++)
            {yArr[i] = max(yArr[i],min(rules[ruleIndexes[j]],mf(xArr[i],a,b,c,d)));}
    }
}

```

```

void reologico(float* inputs, float* outputs)
{
    float Inputs1[7];

    Inputs1[0] = trimf(inputs[0],0,0,0.005);
    Inputs1[1] = trimf(inputs[0],0.004,0.05,0.1);

    Inputs1[2] = trimf(inputs[0],0.05,0.1,0.15);

    Inputs1[3] = trimf(inputs[0],0.1,0.15,0.2);

    Inputs1[4] = trimf(inputs[0],0.15,0.2,0.25);

    Inputs1[5] = trimf(inputs[0],0.2,0.25,0.3);

    Inputs1[6] = trapmf(inputs[0],0.25,0.325,0.4,4);

    float Inputs2[9];

    Inputs2[0] = trimf(inputs[1],0,0,2.4);

    Inputs2[1] = trimf(inputs[1],2.16,60,120);

    Inputs2[2] = trimf(inputs[1],60,120,180);

    Inputs2[3] = trimf(inputs[1],120,180,240);

    Inputs2[4] = trimf(inputs[1],180,240,300);

    Inputs2[5] = trimf(inputs[1],240,300,360);
}

```

```
Inputs2[6] = trimf(inputs[1],300,360,420);

Inputs2[7] = trimf(inputs[1],360,420,480);

Inputs2[8] = trapmf(inputs[1],420,501.1,600,624);

float R[63];
float CondR[2];

CondR[0] = Inputs1[0];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[0] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[1];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[1] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[2];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[2] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[3];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[3] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[4] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[5];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[5] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[6];
CondR[1] = Inputs2[0];
R[6] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[0];
CondR[1] = Inputs2[1];
R[7] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[1];
CondR[1] = Inputs2[1];
R[8] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[2];
CondR[1] = Inputs2[1];
R[9] = 1 * min_array(CondR,2);

CondR[0] = Inputs1[3];
```

```
CondR[1] = Inputs2[1];  
R[10] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[4];  
CondR[1] = Inputs2[1];  
R[11] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[5];  
CondR[1] = Inputs2[1];  
R[12] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[6];  
CondR[1] = Inputs2[1];  
R[13] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[14] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[15] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[16] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[4];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[17] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[5];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[18] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[6];  
CondR[1] = Inputs2[2];  
R[19] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[0];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[20] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[21] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[22] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[23] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[4];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[24] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[5];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[25] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[6];  
CondR[1] = Inputs2[3];  
R[26] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[0];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[27] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[28] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[29] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[30] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[4];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[31] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[5];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[32] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[6];  
CondR[1] = Inputs2[4];  
R[33] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[0];  
CondR[1] = Inputs2[5];  
R[34] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];
```

```
CondR[1] = Inputs2[5];  
R[35] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[5];  
R[36] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[5];  
R[37] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[4];  
CondR[1] = Inputs2[5];  
R[38] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[5];  
CondR[1] = Inputs2[5];  
R[39] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[6];  
CondR[1] = Inputs2[5];  
R[40] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[0];  
CondR[1] = Inputs2[6];  
R[41] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[1];  
CondR[1] = Inputs2[6];  
R[42] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[2];  
CondR[1] = Inputs2[6];  
R[43] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[3];  
CondR[1] = Inputs2[6];  
R[44] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[4];  
CondR[1] = Inputs2[6];  
R[45] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[5];  
CondR[1] = Inputs2[6];  
R[46] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```
CondR[0] = Inputs1[6];  
CondR[1] = Inputs2[6];  
R[47] = 1 * min_array(CondR,2);
```

```

CondR[0] = Inputs1[0];
CondR[1] = Inputs2[7];
R[48] = 1 * min_array(CondR,2);

```

```

CondR[0] = Inputs1[1];
CondR[1] = Inputs2[7];
R[49] = 1 * min_array(CondR,2);

```

```

CondR[0] = Inputs1[2];
CondR[1] = Inputs2[7];
R[50] = 1 * min_array(CondR,2);

```

```

CondR[0] = Inputs1[3];
CondR[1] = Inputs2[7];
R[51] = 1 * min_array(CondR,2);

```

```

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[7];
R[52] = 1 * min_array(CondR,2);

```

```

CondR[0] = Inputs1[5];
CondR[1] = Inputs2[7];
R[53] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 55

```

```

CondR[0] = Inputs1[6];
CondR[1] = Inputs2[7];
R[54] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 56

```

```

CondR[0] = Inputs1[0];
CondR[1] = Inputs2[8];
R[55] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 57

```

```

CondR[0] = Inputs1[1];
CondR[1] = Inputs2[8];
R[56] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 58

```

```

CondR[0] = Inputs1[2];
CondR[1] = Inputs2[8];
R[57] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 59

```

```

CondR[0] = Inputs1[3];
CondR[1] = Inputs2[8];
R[58] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 60

```

```

CondR[0] = Inputs1[4];
CondR[1] = Inputs2[8];
R[59] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 61
CondR[0] = Inputs1[5];

```

```
CondR[1] = Inputs2[8];
R[60] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 62
CondR[0] = Inputs1[6];
CondR[1] = Inputs2[8];
R[61] = 1 * min_array(CondR,2);
// Handle conditions for rule 63
CondR[0] = Inputs1[0];
CondR[1] = Inputs2[2];
R[62] = 1 * min_array(CondR,2);
// Basic output processing
int res = 100;
float step;
float xMin;
float xMax;
float x[res];
float y[res];
float t;
int value[63];
// Output variable Amps
xMin = 0;
xMax = 1.6;
t=0;
step = (xMax - xMin) / (float)(res - 1);
generate(xMin, xMax, step, x, res);
set(y, res, 0);
value[0] = 0;
value[1] = 1;
value[2] = 2;
value[3] = 3;
value[4] = 4;
value[5] = 5;
value[6] = 6;
value[7] = 7;
value[8] = 8;
value[9] = 9;
value[10] = 10;
value[11] = 11;
value[12] = 12;
value[13] = 13;
aggregate3(R,value,14,x,y,res,trimf,0,0,0.002133);
value[0] = 14;
value[1] = 15;
value[2] = 16;
value[3] = 17;
value[4] = 18;
value[5] = 19;
value[6] = 23;
value[7] = 24;
value[8] = 25;
```

```

value[9] = 26;
value[10] = 62;
aggregate3(R,value,11,x,y,res,trimf,0.001067,0.2667,0.4);
value[0] = 20;
value[1] = 21;
value[2] = 22;
value[3] = 28;
value[4] = 29;
value[5] = 30;
value[6] = 31;
value[7] = 32;
value[8] = 33;
value[9] = 36;
value[10] = 37;
value[11] = 38;
value[12] = 39;
value[13] = 40;
aggregate3(R,value,14,x,y,res,trimf,0.4,0.5333,0.6677);
value[0] = 27;
value[1] = 35;
value[2] = 43;
value[3] = 44;
value[4] = 45;
value[5] = 46;
value[6] = 47;
value[7] = 52;
value[8] = 53;
value[9] = 54;
aggregate3(R,value,10,x,y,res,trimf,0.6667,0.8,0.9333);
value[0] = 34;
value[1] = 42;
value[2] = 50;
value[3] = 51;
aggregate3(R,value,4,x,y,res,trimf,0.9323,1.067,1.333);
value[0] = 41;
value[1] = 48;
value[2] = 49;
value[3] = 55;
value[4] = 56;
value[5] = 57;
value[6] = 58;
value[7] = 59;
value[8] = 60;
value[9] = 61;
aggregate4(R,value,10,x,y,res,trapmf,1.333,1.447,1.6,1.92);
centroid(x, y, res, &outputs[0], &t);
}

int stringToNumber(String thisString) {
int i, value, length;

```

```
length = thisString.length();
char blah[(length+1)];
for(i=0; i<length; i++) {
    blah[i] = thisString.charAt(i);
}
blah[i]=0;
value = atoi(blah);
return value;
}
```