

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FERNANDO D'ASSUNÇÃO MORGADO JUNIOR

MODELAGEM E CONTROLE DE MÚSCULO PNEUMÁTICO

Rio de Janeiro

2011

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

FERNANDO D'ASSUNÇÃO MORGADO JUNIOR

MODELAGEM E CONTROLE DE MÚSCULO PNEUMÁTICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Maj Jorge Audrin Morgado de Gois
– Dr.-Ing

Rio de Janeiro

2011

c2011

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

São permitidas a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.

629.83 Morgado Junior, Fernando d'Assunção.
M847 Modelagem e Controle de Músculo Pneumático/
Fernando d'Assunção Morgado Junior – Rio de Janeiro:
Instituto Militar de Engenharia, 2011

79 p.: il.

Dissertação (mestrado). – Instituto Militar de Engenharia
- Rio de Janeiro, 2011

1. Controle. 2. Músculo. 3. Pneumática. 4. Lógica
Nebulosa. I. Título. II. Instituto Militar de Engenharia.

CDD 629.83

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

FERNANDO D'ASSUNÇÃO MORGADO JUNIOR

MODELAGEM E CONTROLE DE UM MÚSCULO PNEUMÁTICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Jorge Audrin Morgado de Gois – Dr.-Ing.

Aprovada em 3 de fevereiro de 2011 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Maj Jorge Audrin Morgado de Gois, Dr.-Ing, do IME – Presidente

Prof. Alberto Paiva, D.Sc., da UFF

Prof. Fernando Ribeiro da Silva, D. Sc., do IME

Prof. Luciano Luporini Menegaldo, D. Sc. do IME

Rio de Janeiro

2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio nesses dois longos anos nos quais fiquei afastado por alguns momentos do lar, dedicando-me a esta etapa tão importante em minha vida. Minha mãe Emilia, meu pai Fernando e meu irmão Fábio meu muito obrigado pela paciência e compreensão.

Ao meu orientador Prof. Maj Audrin, pelo caminho a ser seguido, desde o primeiro contato com a Instituição até este momento de término de um trabalho de mestrado.

Servilha pelas aulas e conselhos, mesmo que nunca tenha sido seu aluno diretamente, mas um amigo do Laboratório de Projetos Mecânicos. Louzada, pelas discussões sobre qual código utilizar e demais assuntos pertinentes ao meu trabalho. Diogo, pelos dias e mais dias passados no laboratório preparando trabalhos para “ontem”, um abraço especial. Ao Aquino, mesmo com um ano de convivência, ensinou-me muito, não só na engenharia. Ao Rodrigo pela ajuda direta e indireta no meu trabalho, pelos passeios extra IME e pelo amigo que cultivei. Ao Alexandre Back, pelo bom humor que sempre cultivou entre os amigos do Laboratório e a sua falta no último ano do meu mestrado. Aos demais amigos, Yuri, Leandro, Leandro “Mineiro”, meu muito obrigado por tê-los conhecido. Aos amigos da Mecânica dos Fluídos, um abraço.

Aos professores que fizeram parte da minha formação: Prof. Arnaldo, Prof. Fernando, Prof. Leonardo, Prof. Luciano. Ao Prof. Alberto Paiva, pela aceitação em fazer parte da banca examinadora.

Ao Maj Ribeiro, pelo primeiro contato, antes mesmo do meu ingresso nesta Instituição e pela atenção prestada a mim.

Ao Cel Luciano, pela apresentação ao Instituto e pelo incentivo prestado. O mesmo dedico ao Prof. Amoedo pelos conselhos e dicas.

Um agradecimento para um professor que muito me ajudou, não na área técnica, mas em outro tipo de formação, ao Prof. Rodolfo Bitencourt.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	08
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE SIGLAS.....	11
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Pneumática	14
1.2 Músculo Pneumático Artificial	14
1.3 Objetivos	18
1.4 Motivação.....	19
1.5 Revisão Bibliográfica.....	21
1.5.1 Músculos com Pregas (dobráveis)	22
1.5.2 Músculos Emaranhados	23
1.5.3 Músculo Yarlott	23
1.5.4 Músculo Kukolj.....	23
1.5.5 Músculos Embutidos	24
1.5.6 Músculos Trançados	24
2 EXPERIMENTO E INSTRUMENTAÇÃO	26
2.1 Experimento	26
2.2 Instrumentação	27
2.2.1 Célula de Carga	27
2.3 Sensor de Rotação	29
2.4 Válvula Solenóide	30
2.5 Placa de Aquisição.....	30
2.6 Microcontrolador	32

2.7	Demais Componentes do Sistema.....	34
2.7.1	Compressor de Ar	34
2.7.2	Reservatório.....	34
2.7.3	Linhas DE Transmissão	34
2.7.4	Músculos Pneumáticos Artificiais	34
3	MODELAGEM GEOMÉTRICA.....	35
3.1	Modelo Analítico Simplificado	35
3.2	Simulação e Resultados Parciais.....	37
4	MODELAGEM FÍSICA	42
4.1	Simplificações	43
4.2	Cálculo da Rigidez	46
4.3	Cálculo da Força de Contração.....	47
4.4	Resultados Obtidos.....	48
4.5	Segunda Abordagem	51
4.5.1	Limite 3 Sigma	51
4.5.2	Metodologia Experimental.....	52
4.5.3	Cálculo da Rigidez Nebulosa	54
4.5.4	Cálculo do Amortecimento Nebuloso	57
4.5.5	Cálculo da Força de Contração.....	60
4.5.6	Resultados	61
5	CONTROLE.....	64
5.1	Controle Baseado em Modelo.....	64
5.1.1	Resultados	67
5.2	Controle Baseado em Lógica Nebulosa.....	68

5.2.1	Resultados	72
6	CONCLUSÃO	74
6.1	Sugestões e Trabalhos Futuros	74
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
8	ANEXO	78
8.1	Anexo 1	79

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.2.1	Músculo pneumático MAS	15
FIG. 1.2.2	Configuração Operacional do MAS-20.....	15
FIG. 1.2.3	Expansão/Contração em função da Força exercida	16
FIG. 1.2.4	Faixa de operação MAS-20	17
FIG. 1.2.5	Aplicações simples do PAM - (a) Mola; (b) Atuador.....	17
FIG. 1.4.1	Exemplos de utilização (a) Prótese; (b) Braço Mecânico Rupert I .	20
FIG. 1.4.2	Exemplos de utilização (a) Braço Mecânico; (b) Filme “Eu, Robô”	20
FIG. 1.5.1.1	Músculo com Pregas	22
FIG. 1.5.3.1	Músculo Yarlott	23
FIG. 1.5.4.1	Músculo Kukolj.....	24
FIG. 1.5.6.1	Músculo Trançado	25
FIG. 2.1	Plataforma Experimental.....	27
FIG. 3.1.1	Célula de Carga	28
FIG. 3.1.2	Calibração da Célula de carga.....	28
FIG. 3.2.1	Sensor de Rotação	29
FIG. 3.2.2	Encoder.....	30
FIG. 3.3.1	Diagrama Válvula Solenóide.....	30
FIG. 3.4.1	Placa de Aquisição	31
FIG. 3.4.2	Diagrama dos terminais da placa de aquisição.....	31
FIG. 3.4.3	Diagrama elétrico da placa de aquisição	32
FIG. 3.5.1	Diagrama Micro Controlador	33
FIG. 3.5.2	Diagrama MAX232.....	33
FIG. 4.1.1	Geometria do atuador	36
FIG. 4.2.1	Resultado da modelagem do cilindro ideal	37
FIG. 4.2.2	Modelagem estática de Tsagarakis e Caldwell	38
FIG. 4.2.3	Resultado da modelagem do cilindro não ideal	38
FIG. 4.2.4	Dois tipos de modelagens estudadas	39
FIG. 4.2.5	Comparação Festo x Cilindro ideal (6 bar).....	39
FIG. 4.2.6	Comparação Festo x Cilindro não ideal (6 bar).....	40
FIG. 4.2.6	Comparação Simulado VS Fabricante	40
FIG. 5.1	Modelo PAM	42

FIG. 5.1.1	Laplace VS Laplace Simplificado.....	44
FIG. 5.1.2	EDO VS Laplace.....	45
FIG. 5.1.3	EDO VS Laplace Simplificado.....	45
FIG. 5.2.1	Regressão Linear para Rigidez.....	47
FIG. 5.4.1	Comparação Simulado VS Experimental para P=300kPa e M=2,7kg	48
FIG. 5.4.2	Comparação Simulado VS Experimental para P=300kPa e M=17,7kg	49
FIG. 5.4.3	Comparação Simulado VS Experimental para P=600kPa e M=2,7kg	50
FIG. 5.4.4	Comparação Simulado VS Experimental para P=600kPa e M=17,7kg	50
FIG.5.5.1.1	Gráfico de Controle de Shewhart.....	52
FIG.5.5.2.1	a) Curvas experimentais; b) Curvas experimentais em detalhe (gráfico ampliado).....	54
FIG. 5.5.3.1	Superfície da rigidez	55
FIG. 5.5.3.2	Rigidez nebulosa	56
FIG. 5.5.4.1	Amortecimento usando otimização Norma 2	57
FIG. 5.5.4.2	Amortecimento experimental	59
FIG. 5.5.4.3	Amortecimento nebuloso	60
FIG. 5.5.5.1	Regressão linear para Força de Contração	61
FIG. 5.5.6.1	Gráfico para P=300kPa e M=2,7kg.....	62
FIG. 5.5.6.2	Gráfico para P=600kPa e M=2,7kg.....	62
FIG. 5.5.6.3	Gráfico para P=300kPa e M=36,7kg.....	63
FIG. 5.5.6.4	Gráfico para P=600kPa e M=36,7kg.....	63
FIG. 6.1.1	Superfície da Rigidez.....	65
FIG. 6.1.2	Superfície do Amortecimento.....	66
FIG. 6.1.3	Rigidez nebulosa	67
FIG. 6.2.1	Superfície Experimental.....	69
FIG. 6.2.2	Superfície Experimental rotacionada	70
FIG. 6.2.3	Matrizes de massa, deslocamento e pressão.....	71
FIG. 6.2.4	Superfície nebulosa	71

LISTA DE TABELAS

TAB. 5.5.3.1 Rigidez experimental	56
TAB. 5.5.4.1 Amortecimento ótimo	58
TAB. 6.1.1.1 Resultados Experimental VS Simulado.....	68
TAB. 6.2.1.1 Resultado Experimental VS Simulado	72
TAB. 6.2.1.2 Erro dos valores simulados [%].....	72

LISTA DE SIGLAS

LPM	Laboratório de Projetos Mecânicos.
MAS	PAM fabricado pela Festo.
MATLAB	LABoratório de MATrizes
PAM	Músculo Artificial Pneumático.
SE/4	Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais.

RESUMO

O desenvolvimento de um sistema de controle para um músculo artificial pneumático é de grande interesse nos dias de hoje, por se tratar de uma aplicação importante para a robótica, sendo o atuador que mais se assemelha ao músculo humano.

Neste trabalho será abordada a modelagem do PAM, assim como o controle deste. Dois tipos de modelagem serão apresentados, a primeira focando no modelo geométrico do músculo e a segunda prezando a física envolvida no processo. Serão apresentados dois tipos de controles, sendo o primeiro o controle baseado em modelo inverso e o segundo baseado em lógica nebulosa.

Avaliam-se, também, os valores encontrados por simulação em ambiente MATLAB com dados colhidos experimentalmente em laboratório. Com isso, além da teoria empregada, a prática não será negligenciada, apresentando comparações entre o simulado e o experimental.

ABSTRACT

Nowadays, there is great interest on the development of a control system for a pneumatic artificial muscle, because it is an important application in robotics, since this kind of actuator presents a behavior which is the most similar to human muscle behaviour.

In this paper we shall consider the modeling of PAM, as well as its control. Two types of modeling are presented, the first with focus on the geometric model of the muscle and the second based on the physics involved in the process. It will be presented two types of controls, the first one based on inverse model of the system and the second one based on fuzzy logic.

The model parameters are estimated by means of an algorithm implemented in MATLAB from data obtained experimentally in the laboratory. Thus, besides the theory used, the practice will not be neglected, showing comparisons between the values obtained by simulation and experimentally.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PNEUMÁTICA

Apesar de possuir relatos de utilização da pneumática antes do nascimento de Cristo, o grego Katesibios foi o primeiro homem a entender as propriedades do ar, por isso é conhecido como o pai da pneumática, onde este fez um maquinário responsável pelo aumento do alcance de um tiro de canhão, segundo Encyclopaedia Britannica. Katesibios também foi o fundador da Escola de Mecânicos, responsável, dentre outras coisas, pela criação de máquinas a ar comprimido. A pneumática somente ressurgiu no final do século XVI com estudos de grandes nomes da ciência como Galileu. Já na era industrial, iniciada com a máquina a vapor de Watt, uma relevância muito maior e mais aplicada às indústrias tornou esta técnica evidente e destacada das demais pelas diversas vantagens existentes, podendo ser citados:

Custo vs. benefício, melhoria considerável em um sistema com um pequeno custo de implementação e de manutenção.

Rapidez de resposta, tanto no movimento de um sistema pneumático, como no aumento do ritmo de trabalho.

Robustez do sistema, pouca ou nenhuma interferência por vibrações, umidade, poeira ou corrosão.

Fácil manutenção, troca rápida do sistema caso apresente defeito.

Atualmente o ar comprimido possui um alto grau de eficiência, atuação em ambientes hostis e com destaque recente na robótica. Diversos atuadores pneumáticos podem ser encontrados, dentre eles encontram-se os músculos artificiais pneumáticos ou simplesmente PAMs.

1.2 MÚSCULO PNEUMÁTICO ARTIFICIAL

Devido à sua disponibilidade no LPM (Laboratório de Projetos Mecânicos) serão apresentados neste trabalho PAMs fabricados pela Festo, que são semelhantes ao inventado por McKibben (tipo de músculo pneumático artificial que será apresentado no capítulo 5.6), porém algumas diferenças importantes podem ser apontadas, como aumento da força na direção axial devido ao revestimento com fibras bastante robustas em forma de losango e à montagem do equipamento, possuindo tal fibra embutida no tubo, diminuindo a fricção do material da junta com a fibra, evitando assim rompimento desta. O músculo é constituído por um tubo flexível com uma estrutura tridimensional composta de fibras entrelaçadas, aumentando assim a resistência. As extremidades são compostas por acessórios que podem ser fixados diretamente ao sistema no qual o PAM será empregado.



FIG. 1.2.1 - Músculo pneumático MAS

<http://www.festo.com.br> [capturado em 6 nov. 2009].

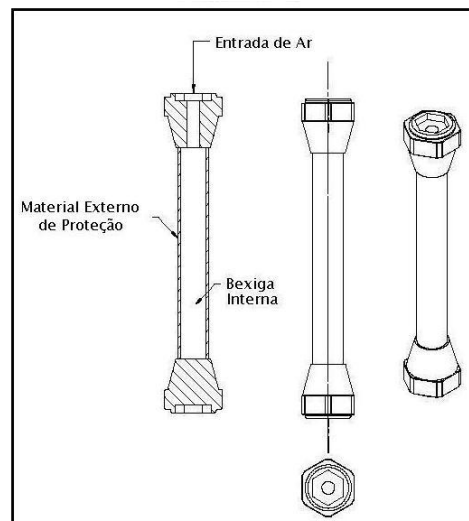


FIG. 1.2.2 - Configuração Operacional do MAS-20

<http://www.festo.com.br> [capturado em 6 nov. 2009].

Os PAMs são atuadores de movimento linear operados por diferença de pressão, onde um aumento na pressão interna do tubo resulta em uma contração das fibras do mesmo, no caso dos PAMs, aumentando seu diâmetro em cerca de 25% do tamanho em repouso (sem carga), ocasionando a diminuição do comprimento no sentido axial e assim, a deformação resultante transfere-se em tração para as cargas presas nas duas extremidades do PAM. A força de tração tem seu valor máximo no início da contração do músculo e decresce linearmente até zero, conforme mostrado nas FIG. 1.2.3 e FIG 1.2.4.

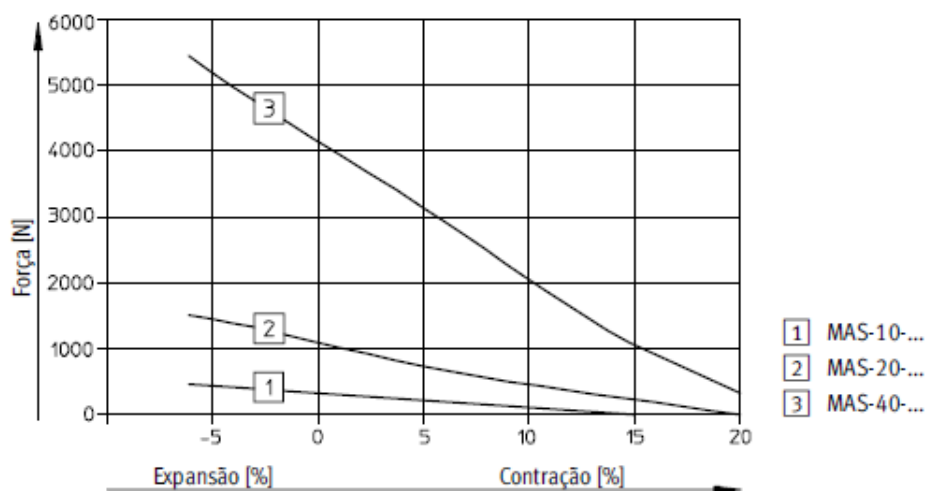


FIG. 1.2.3 – Expansão/Contração em função da Força exercida
<http://www.festo.com.br> [capturado em 6 nov. 2009].

A figura anterior nos mostra o comportamento da Força vs. Expansão/Contração de três tipos de músculos pneumáticos fabricados pela Festo, sendo estes: MAS-10, MAS-20 e MAS-40. Onde os dígitos 10, 20 e 40 correspondem ao diâmetro em milímetros da parte cilíndrica do PAM em repouso e sem carga aplicada.

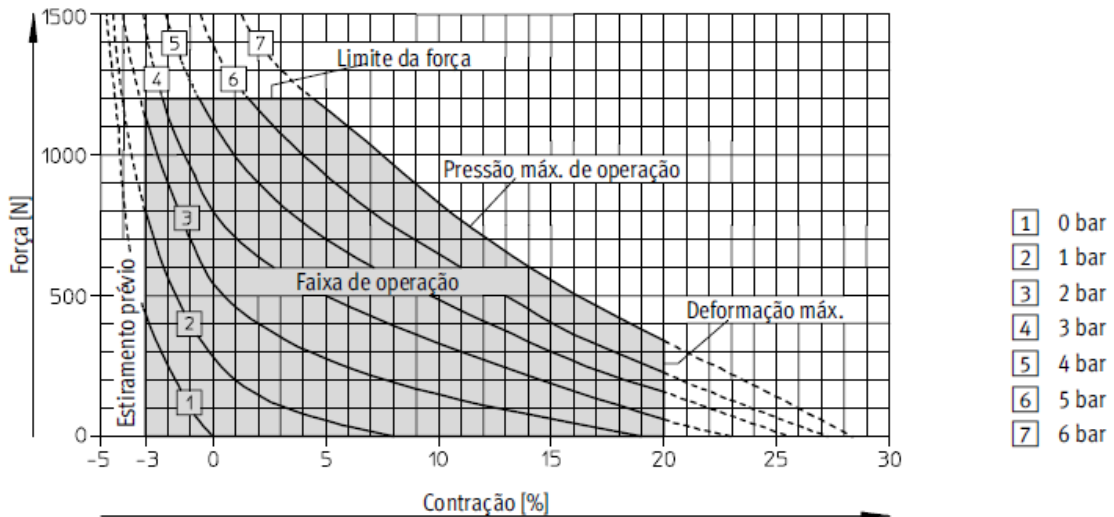


FIG. 1.2.4 - Faixa de operação MAS-20

<http://www.festo.com.br> [capturado em 6 nov. 2009].

A fonte de energia empregada nos PAMs é o próprio ar que ao ser forçado a entrar ou a sair do músculo, ou seja, a diferença de pressão interna e externa dá-se a energia para que o músculo aumente ou diminua seu volume e com isso exerça uma tração ou contração em seu próprio eixo. Quase que na totalidade dos casos, por questões óbvias, em que é muito mais fácil aumentar a pressão interna do tubo do que diminuí-la, a pressão acima da pressão atmosférica é utilizada para que os PAMs exerçam seu trabalho no sistema.

O PAM, em uma aplicação simples pode ser comparado a uma mola caso sejam aplicadas forças variáveis em suas extremidades, ou então pode ser um simples atuador caso uma carga seja aplicada diretamente sobre uma de suas extremidades.

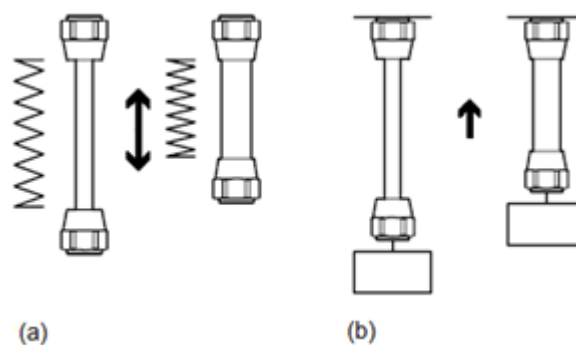


FIG. 1.2.5 - Aplicações simples do PAM - (a) Mola; (b) Atuador

<http://www.festo.com.br> [capturado em 6 nov. 2009].

Os músculos pneumáticos são assim chamados pois apresentam características parecidas com as encontradas no corpo humano. Uma delas é a monotonicidade entre a carga e a contração sofrida, ou seja, a força máxima sempre decai até zero do maior comprimento do músculo até este totalmente contraído.

A flexibilidade encontrada em músculos pneumáticos também é um fator relevante, uma vez que além da membrana ser flexível, o ar ambiente utilizado nestes atuadores é compressível.

Apesar dessas vantagens, o controle de um PAM ainda é algo desafiador, já que o princípio de funcionamento é não linear.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por finalidade modelar e controlar o músculo artificial pneumático produzido pela empresa Festo, modelo MAS20-200.

Neste trabalho são apresentadas diversas comparações entre tipos diferentes de modelagens adotadas, assim como controles baseados em lógica nebulosa, são comparados com os dados experimentais encontrados no próprio Laboratório de Projetos Mecânicos do Instituto Militar de Engenharia e com dados fornecidos pelo fabricante do músculo, englobando tanto a parte teórica quanto a parte prática. Vale frisar que este trabalho inicia um processo, no Instituto Militar de Engenharia, de estudo acerca dos músculos artificiais pneumáticos e que todos os dados encontrados experimentalmente foram realizados pelo autor em uma plataforma experimental construída pelo próprio exclusivamente para atestar os valores encontrados por simulação computacional.

Este trabalho também tem por objetivo dar suporte para a futura aplicação deste sistema em um atuador pneumático como um braço robótico, por exemplo.

1.4 MOTIVAÇÃO

O interesse pelo estudo deste título advém das inúmeras empregabilidades dos sistemas que se utilizam dos músculos artificiais, assim como a escassez na literatura nacional de trabalhos sobre o assunto, embora este seja empolgante e desafiador.

Diversas áreas da engenharia e demais especialidades podem ser citadas como beneficiárias desta tecnologia, dentro destas, destacam-se as seguintes áreas de estudo:

- Engenharia robótica, industrial e de processos;
- Biomecânica;
- Simuladores.

Em engenharia robótica uma importante área de estudos que é a de próteses para deficientes físicos ou braços mecânicos atuados por músculos artificiais pneumáticos, já podem ser encontradas na literatura. Grandes avanços neste campo de estudo dão esperança para inúmeros pacientes que passam por dificuldades de locomoção ou tarefas diárias consideradas simples. Além de acidentes automotivos causando amputações de membros superiores e/ou inferiores, lesões na medula, doenças degenerativas e algumas outras doenças como a paralisia infantil, podem causar este dano considerado irreversível em muitos casos. Na FIG. 1.4.1 a) tem-se uma prótese para membros inferiores e na FIG. 1.4.1 b) encontra-se o braço robótico denominado Rupert I que pode ser utilizado por pessoas com derrames cerebrais por exemplo.

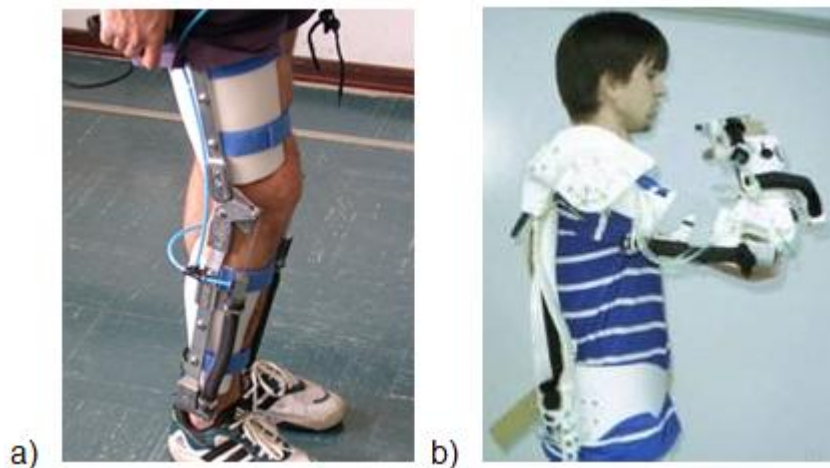


FIG. 1.4.1 - Exemplos de utilização (a) Prótese; (b) Braço Mecânico Rupert I
<http://www.biodesign.asu.edu> [capturado em 12 nov. 2009].

Inclusive alimentando a imaginação do telespectador, um renomado filme (“Eu, Robô” de 2004) apresentou diversos robôs utilizando estes atuadores pneumáticos, onde um deles pode ser observado na FIG. 1.4.2 b).

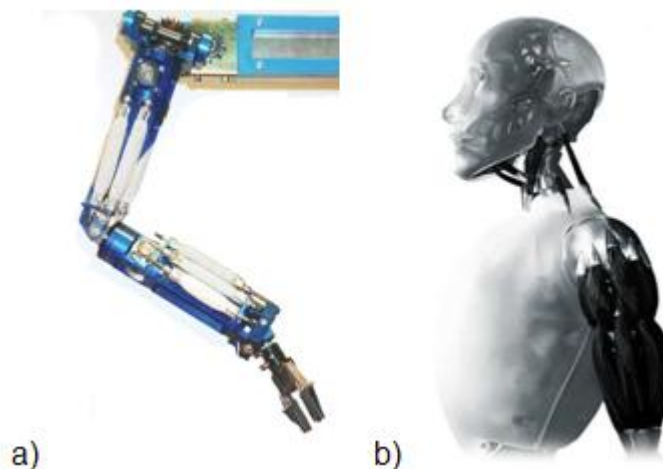


FIG. 1.4.2 - Exemplos de utilização (a) Braço Mecânico; (b) Filme “Eu, Robô”

<http://www.biodesign.asu.edu> [capturado em 12 nov. 2009].

Na área industrial diversos maquinários utilizam a tecnologia pneumática, como prensas, freio de emergência para rotores, peneiras e tensionadores, por exemplo.

A maior motivação para este trabalho remete à área da robótica, mais precisamente a área de exoesqueletos. Ao contrário do termo em zoologia,

exoesqueleto não se refere somente a camada externa de proteção e suporte para os músculos. Na engenharia, exoesqueleto diz respeito ao equipamento acoplado ou traje mecânico capaz de fazer com que um ser humano consiga aumentar suas habilidades, sendo a mais comumente encontrada, a força. A utilização do músculo pneumático artificial é uma das possibilidades de atuadores, possuindo grande destaque dado pelos pesquisadores por causa dos benefícios que esta tecnologia traz em relação às demais utilizadas. Além da área de próteses mais complexas, a área militar não pode ser negligenciada na motivação deste trabalho, já que no campo de batalha o militar é exigido ao máximo da sua força e preparo físico e com estes exoesqueletos os esforços poderão ser minimizados e até extrapolados sem prejudicar o combatente.

O exoesqueleto empregado na área industrial também pode ser citado, por exemplo, na ajuda a um empregado quando este necessita utilizar uma força para mover uma carga excessivamente pesada ou desenvolver trabalhos repetitivos, evitando lesões que poderiam provocar, além dos traumas no indivíduo, ausência do trabalhador por um período de tempo considerável, viabilizando o investimento financeiro no exoesqueleto.

1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os músculos artificiais pneumáticos são sistemas que apresentam contração quando submetidos à pressão de gás. Em geral são constituídos por uma membrana exterior reforçada e flexível para dar mobilidade para o manipulador. Eles possuem engates em suas extremidades para proporcionar ao usuário vários tipos de conexões, abrangendo uma imensa gama de utilidades para este sistema. O PAM funciona da seguinte forma: ao injetar gás a uma pressão maior que a pressão atmosférica do local, este se contrai gerando uma força de tração diretamente aplicada nas suas extremidades e quando este gás for retirado de dentro do músculo, este se dilata (expande). Sendo assim fica evidente a linearidade de seu movimento.

Em diversos trabalhos nesta área, algumas variações para o nome adotado pode ser encontrado, dentre eles: *Axially Actuator* (Kukolj), *Tension Actuator* (Paynter), dentre outros.

De acordo com Daerden e Lefeber, cada vez mais pesquisas na área de desenvolvimento de atuadores semelhantes ao humano vêm sendo desenvolvidas, grande parte sendo baseada no inventor Garasiev, de nacionalidade russa. Dentre estes atuadores, podem ser classificados de acordo com suas operações: pneumática ou hidráulica, sobrepressão ou subpressão, membrana trançada ou embutida e membrana deformável ou organizável. Dentre os trabalhos até hoje apresentados, grande destaque pode ser dado aos seguintes tipos de músculos encontrados:

1.5.1 MÚSCULOS COM PREGAS (DOBRÁVEIS)

Possui uma membrana auto-organizável, sendo que esta não se deforma, apenas se expande, abrindo (desdobrando) tais pregas. Uma vantagem é a não fricção do material e sua tensão na direção oposta à axial é mínima e não comumente descartada para efeitos de cálculo.

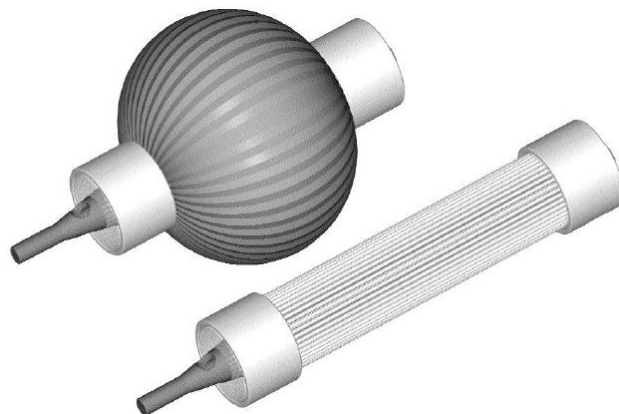


FIG. 1.5.1.1 - Músculo com Pregas

1.5.2 MÚSCULOS EMARANHADOS

Semelhantes ao anterior, tendo como diferença apenas o espaçamento entre as pregas, sendo este mais espaçado.

1.5.3 MÚSCULO YARLOTT

Este tipo de músculo é operado por fluido, possui uma bexiga circular, que ao se expandir, torna-se quase esférica. Esta bexiga é envolta por fios para dar resistência ao músculo. Interessante notar, que quanto menor for a expansão, maior é a tração, sendo este músculo constituído para operar a baixas pressões.

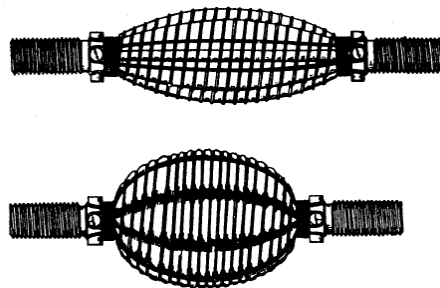


FIG. 1.5.3.1 - Músculo Yarlott

1.5.4 MÚSCULO KUKOLJ

Bastante semelhante ao músculo de McKibben, variando no que diz respeito à malha, sendo esta aberta conforme pode ser observado na figura abaixo. Quando em repouso (sem pressão e sem carga), existe uma distância entre o tubo e a parte exterior. Ao introduzir pressão dentro do tubo, este se expande até encontrar com a armação.

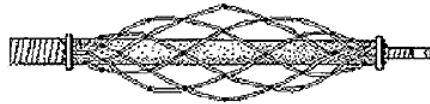


FIG. 1.5.4.1 - Músculo Kukolj

1.5.5 MÚSCULOS EMBUTIDOS

Neste caso, existem diversos modelos para músculos embutidos, que são caracterizados por possuírem a parte inflável embutida na membrana muscular.

Músculo de Morin é exemplo desta categoria, por possuir um tubo embutido em fios para aumentar a rigidez do material, este pode ser considerado o mais importante dos músculos embutidos, pois foi a origem ou a base para a invenção do músculo McKibben. A membrana é unida em suas extremidades, fazendo com que o gás que será utilizado na expansão não escape de dentro do tubo.

Além do Morin, Baldwin, Subpressão, Paynter, dentre outros estão contidos nesta categoria.

1.5.6 MÚSCULOS TRANÇADOS

São os atuadores que possuem uma fibra entrelaçada, em forma helicoidal, com uma angulação θ em relação ao eixo axial. Ao inflar este dispositivo, através do aumento da pressão no interior do tubo, a fibra trançada é expandida balanceando a pressão interna deste tubo. Já com essa configuração, observa-se que não se pode atuar com subpressão neste tipo de músculo.

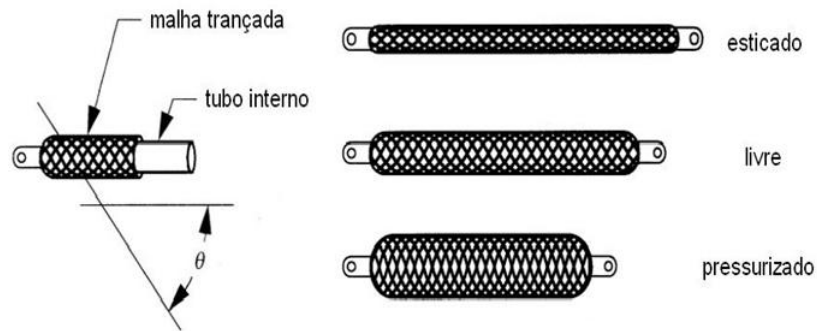


FIG. 1.5.6.1 - Músculo Trançado

Os músculos trançados, também conhecidos como músculo de McKibben é o tipo mais pesquisado e estudado na literatura. Possuem ambos os lados acoplados em alguma estrutura, em geral uma delas fixa, para que a tração seja transferida totalmente.

Com relação à modelagem, segundo Chou e Hannaford (1994 e 1996), a partir da Lei da Conservação de Energia, pode-se obter a equação da Força que o músculo pneumático exerce em função da espessura da parede interna, pressão interna, diâmetro e o ângulo entre a fibra e o eixo do manipulador.

Já no modelo dinâmico, segundo D. B. Reynolds, D. W. Repperger, C. A. Phillips e G. Bandry, o sistema pode ser representado ou aproximado por um sistema mola amortecedor, muito comumente usado em engenharia mecânica para simplificações de sistemas mais complexos.

Tratando-se do controle do sistema, diversas abordagens são sugeridas na literatura. A primeira seria a utilização da Lógica Nebulosa na implementação do controle, segundo P. B. Petrovic e V. R. Milacic.

Outra abordagem pode ser obtida utilizando controladores PID discretos, segundo D., G., Caldwell, A., Razak, e M., J., Goodwin. Ainda segundo estes autores, um controle adaptativo pode ser empregado.

2 EXPERIMENTO E INSTRUMENTAÇÃO

2.1 EXPERIMENTO

No Laboratório de Projetos Mecânicos do Instituto Militar de Engenharia, foi montada uma bancada para testar e reproduzir as simulações realizadas no programa MATLAB. Esta bancada de testes possui um aparato para manter o músculo pneumático artificial na posição horizontal e engastado/fixado por meio de porca e parafuso, de modo a permitir somente movimentação na outra extremidade, chamada de extremidade livre. Esta por sua vez está acoplada a uma célula de carga por meio de cabo de aço. Após a célula de carga, passa-se por uma roldana e o cabo de aço é ligado a outros quatro cabos, cada um preso em suas outras extremidades a uma peça retangular de madeira, chamada de plataforma. Esta plataforma está apoiada sobre uma mesa vazada em seu centro de modo a permitir uma conexão por uma corda fina que liga a plataforma ao sensor de rotação, que se encontra sob a mesa e plataforma. Sendo assim, toda vez que uma pressão é inserida no músculo pneumático, este se movimenta somente em uma extremidade, de forma a contrair e exercer uma tração em todo o sistema, fazendo com que a plataforma se eleve de acordo com a força de tração exercida pelo músculo, chamada neste trabalho de Força de Contração. Com essa elevação, já que o sensor de rotação está acoplado à plataforma, uma rotação é medida. O deslocamento também é dependente da massa inserida no sistema, com isso, a célula de carga mede constantemente as possíveis variações da força peso, no caso chamado de Força Externa.



FIG. 2.1.1 – Plataforma Experimental

Na FIG. 2.1.1 encontra-se o experimento montado e apresentado no parágrafo anterior.

2.2 INSTRUMENTAÇÃO

2.2.1 CÉLULA DE CARGA

Um aspecto importante para o levantamento dos dados é a aferição das massas envolvidas no experimento, pois elas influenciam diretamente no resultado final destes dados. Para tal, anilhas foram utilizadas no experimento e aferidas usando uma balança eletrônica de precisão série AC modelo 10K. Após, a célula de carga modelo Líder CS50 foi adicionada ao trabalho e uma curva de calibração foi traçada utilizando estas mesmas anilhas para que qualquer massa fosse adicionada ao sistema sem que seja preciso conhecê-la antecipadamente.



FIG. 2.2.1 - Célula de Carga

A curva para a calibração da célula de carga pode ser encontrada na FIG. 2.2.2:

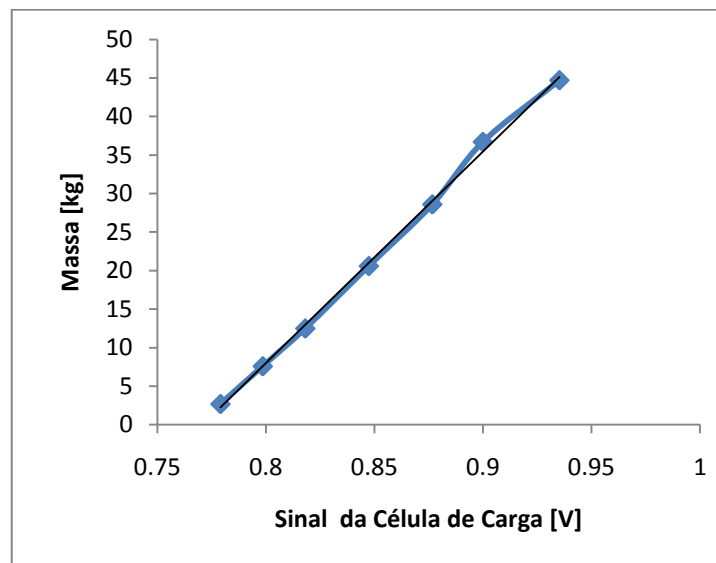


FIG. 2.2.2 - Calibração da Célula de carga

Uma regressão linear foi utilizada para converter o sinal enviado pela célula de carga em quilogramas, já que a resposta desta pode ser entendida como linear, de acordo com a FIG. 2.2.2. Sendo assim, a seguinte função de calibração desta célula de carga é empregada:

$$Massa = 274,26 \times S_{cc} - 211,4 \quad \text{EQ 2.2.1}$$

Onde S_{cc} é o sinal enviado pela célula de carga e a Massa é expressa em quilograma.

2.3 SENSOR DE ROTAÇÃO

O sensor de rotação Pasco modelo CI-6538 com resolução de $0,25^\circ$ (podendo ser convertido para $0,055\text{mm}$) foi utilizado em duas situações distintas:



FIG. 2.3.1 - Sensor de Rotação

Quando analisado no programa da Pasco, DataStudio, reconhece o sensor usado e somente precisa de interface da placa de aquisição, também da Pasco, para gerar o gráfico e obter os dados necessários para o trabalho. Tais dados são exportados em extensão “.txt” para futura análise no programa MATLAB.

O sensor de rotação utilizado foi modificado quando a leitura deste é feita no programa MATLAB, apenas recebendo o sinal enviado pelo *encoder* propriamente dito, ou seja, foi retirada do circuito toda a parte eletrônica envolvida após o *encoder* e a comunicação entre o sensor e o computador é feita pela interface serial, através do microcontrolador PIC 16F877A, não mais é utilizada a placa de aquisição da Pasco. O *encoder* presente dentro do sensor de rotação é do fabricante HP modelo HEDS-9100. Neste código, a cada vez que é enviado pela porta serial o caractere “r”, o sistema é reiniciado e quando é enviado qualquer outro caractere, o *encoder* é lido e sua resposta enviada pela porta serial ao computador.



FIG. 2.3.2 - Encoder

2.4 VÁLVULA SOLENÓIDE

A válvula solenóide utilizada neste trabalho é da fabricante Metal Work, modelo 7C10020200. Tal válvula é usada para acionar o músculo artificial pneumático para os diversos experimentos realizados neste trabalho.

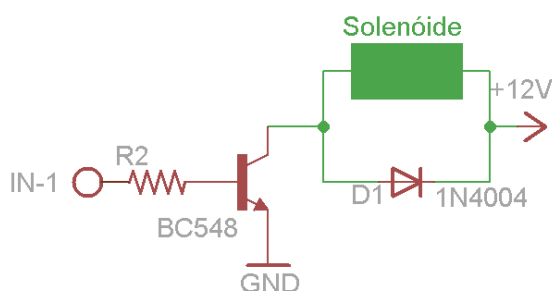


FIG. 2.4.1 - Diagrama Válvula Solenóide

Na FIG. 2.4.1 pode ser visto o acionamento da válvula por meio do próprio computador através do software MATLAB (IN-1).

2.5 PLACA DE AQUISIÇÃO

Para o acionamento da válvula solenóide e a instrumentação da célula de carga, foi utilizada uma placa de aquisição para ser a interface entre os atuadores/sensores

e o computador, no caso com o MATLAB. O modelo da placa de aquisição em questão é DT9802 da Data Translation.



FIG. 2.5.1 - Placa de Aquisição

Esta possui a seguinte configuração de terminais, de acordo com o fabricante:

DT9800 Standard Series Modules		
User Clk Input 0	54	1 Channel 00
User Cntr Out 0	53	2 Channel 08/00 Ret
External Gate 0	52	3 Channel 01
Isolated Dig Gnd	51	4 Channel 09/01 Ret
User Clk Input 1	50	5 Channel 02
User Cntr Out 1	49	6 Channel 10/02 Ret
External Gate 1	48	7 Channel 03
Isolated Dig Gnd	47	8 Channel 11/03 Ret
Dynamic Dig Out	46	9 Channel 04
Digital Output 0	45	10 Channel 12/04 Ret
Digital Output 1	44	11 Channel 05
Digital Output 2	43	12 Channel 13/05 Ret
Digital Output 3	42	13 Channel 06
Digital Output 4	41	14 Channel 14/06 Ret
Digital Output 5	40	15 Channel 07
Digital Output 6	39	16 Channel 15/07 Ret
Digital Output 7	38	17 Isolated An Gnd
Isolated Dig Gnd	37	18 Amp Low
	36	19 Analog Out 0+
	35	20 Analog Out 0 Ret
		21 Analog Out 1+
		22 Analog Out 1 Ret
		23 Isolated Dig Gnd
		24 Ext A/D Trigger
		25 Ext A/D Sample Clk
		26 Isolated Dig Gnd
		27 Isolated +5 V Out
	28	28 Digital Input 0
	29	29 Digital Input 1
	30	30 Digital Input 2
	31	31 Digital Input 3
	32	32 Digital Input 4
	33	33 Digital Input 5
	34	34 Digital Input 6
	35	35 Digital Input 7
	36	36 Isolated Dig Gnd

FIG. 2.5.2 - Diagrama dos terminais da placa de aquisição

Para o caso da célula de carga foram utilizadas as entradas dos terminais 7 e 8 para o recebimento do sinal da célula de carga, ou seja, os fios verde e amarelo respectivamente e o canal 17 para o terra (negativo) sendo o fio preto. O quarto fio, o de cor vermelha, é o fio de alimentação da célula de carga e este foi ligado à fonte

de alimentação com tensão de 5V. A ligação feita foi a recomendada pelo fabricante de acordo com o diagrama da FIG. 2.5.3:

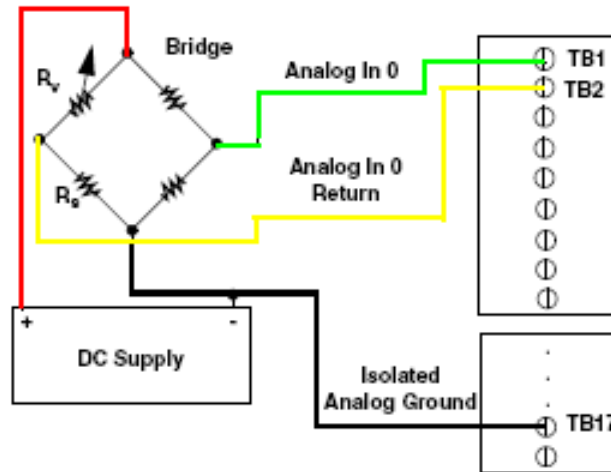


FIG. 2.5.3 - Diagrama elétrico da placa de aquisição

Para o acionamento da válvula solenóide utilizaram-se as portas de saída digitais 45 e 37 da placa DT9802. Desta saída digital passou-se por um transistor que, quando um sinal é dado, ele permite a passagem de 12V de tensão para o acionamento da válvula solenóide, ou seja, funcionando como uma porta lógica.

2.6 MICROCONTROLADOR

O micro controlador foi utilizado para receber o sinal originário do *encoder* e enviá-lo para o computador através da comunicação RS232. O micro controlador utilizado foi o PIC16F877. O sinal do *encoder* é recebido pelas portas 39 e 40 do micro controlador e o envio para o MAX232 é realizado pelas portas 25 e 26 conforme a FIG. 2.6.1:

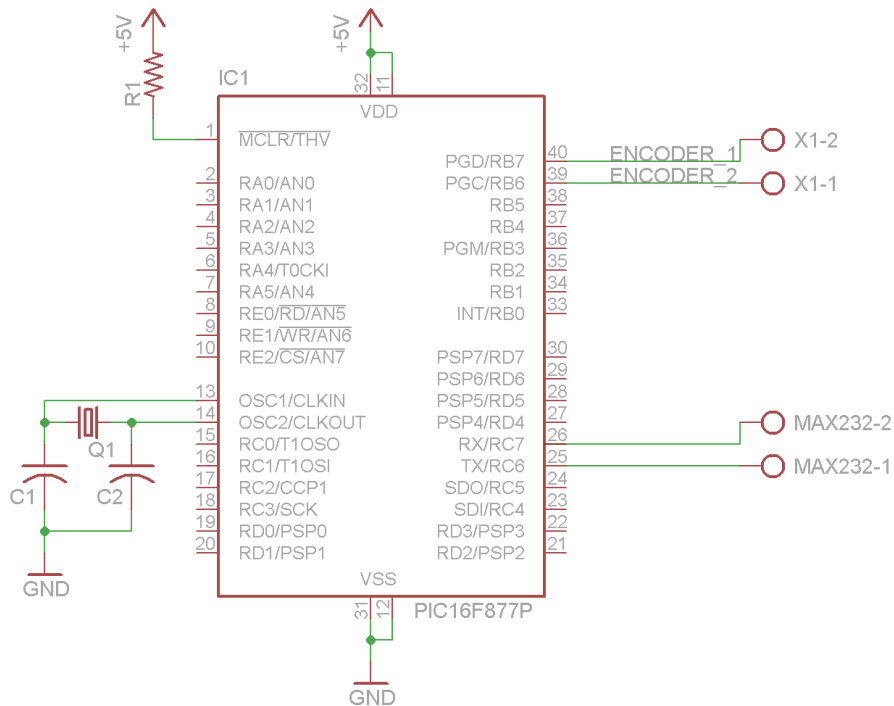


FIG. 2.6.1 - Diagrama Micro Controlador

Já o MAX232 recebe o sinal originário do micro controlador e tem a função de enviar via RS232 para o computador.

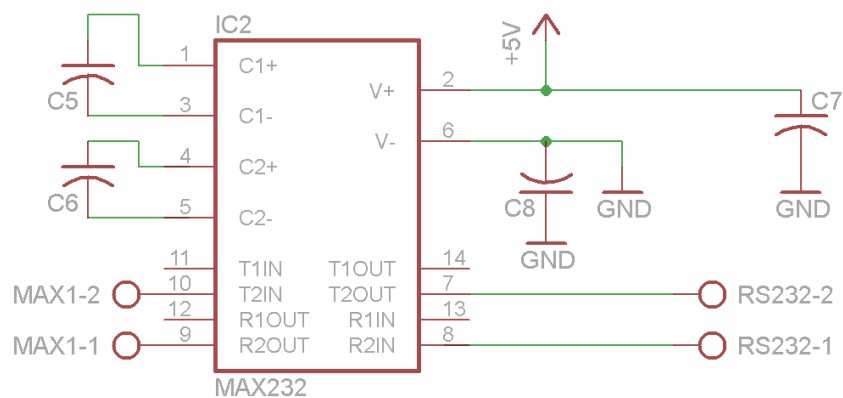


FIG. 2.6.2 - Diagrama MAX232

2.7 DEMAIS COMPONENTES DO SISTEMA

2.7.1 COMPRESSOR DE AR

Para alimentar o sistema foi adquirido o compressor de ar direto da marca Schultz, sendo este o compressor com maior pressão dentre os compressores de fácil locomoção, possuindo uma pressão máxima estimada em 800 kPa.

2.7.2 RESERVATÓRIO

O reservatório escolhido para armazenar o ar comprimido proveniente do compressor citado acima é o modelo CRVZS-5 produzido pela Festo, com capacidade máxima de 16 bar e 5L.

2.7.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Mangueiras são utilizadas para conduzir o ar comprimido até os atuadores (PAMs). Para isto, emendas de engate rápido também estão presentes no LPM.

2.7.4 MÚSCULOS PNEUMÁTICOS ARTIFICIAIS

O LPM também possui 4 PAMs, fabricados pela Festo, modelo MAS 20, com o tamanho de 200 mm (apenas a membrana) e com 20 mm de diâmetro (em repouso e sem carga).

3 MODELAGEM GEOMÉTRICA

3.1 MODELO ANALÍTICO SIMPLIFICADO

De acordo com a Lei de Conservação de Energia, pode-se encontrar a tensão axial em função do comprimento do PAM e da pressão exercida neste, utilizando um modelo simplificado adotado por Chou e Hannaford (1994 e 1996), não considerando por completo a geometria do músculo. Para tal, tem-se o trabalho de entrada (W_e), P sendo a pressão interna absoluta, P_{atm} pressão atmosférica, P' a pressão relativa, dI_i expansão/contração da superfície interna, S_i a superfície interna total, dS_i vetor de área e dV variação no volume, tem-se:

$$dW_e = (P - P_{atm}) \int_{S_i} dI_i \times dS_i = P' dV \quad \text{EQ 3.1.1}$$

Já o trabalho de saída (W_s) é dado quando houver uma variação no volume:

$$dW_s = -FdL \quad \text{EQ 3.1.2}$$

Onde F e dL são a tensão axial e deslocamento axial, respectivamente. Considerando um sistema sem perda nem acúmulo de energia, tem-se:

$$dW_e = dW_s \therefore -FdL = P' dV \therefore F = -P' \frac{dV}{dL} \quad \text{EQ 3.1.3}$$

Considerando, simplificada, que o volume do músculo só dependa do seu comprimento e sendo este de parede fina, para que esta espessura seja desprezada.

$$V_{cilindro} = \frac{\pi D^2 L}{4} = \frac{b^3 \text{sen}^2 \theta \text{cos} \theta}{4\pi n^2} \quad \text{EQ 3.1.4}$$

Onde b , n , L e θ podem ser entendidos através da figura abaixo:

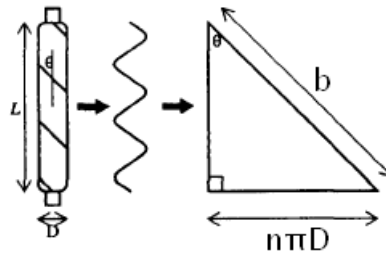


FIG. 3.1.1 - Geometria do atuador

Com isso e sabendo (da figura acima) que:

$$\begin{aligned} L &= b \cos \theta \\ D &= \frac{b \operatorname{sen} \theta}{n\pi} \end{aligned} \quad \text{EQ 3.1.5}$$

Tem-se:

$$F = -P' \frac{dV/d\theta}{dL/d\theta} = \frac{\pi D_0^2 P' (3 \cos^2 \theta - 1)}{4} \quad \text{EQ 4.1.6}$$

Onde L é o tamanho do PAM, θ é o ângulo entre o trançado e o eixo do cilindro, n é o número de voltas de um fio no trançado, b o comprimento do fio e D_0 é o diâmetro D do músculo quando o ângulo $\theta = 90^\circ$.

Esta é, portanto, a forma mais simplificada para encontrar a tensão axial gerada por uma dada pressão. Um detalhamento maior pode ser obtido quando, ainda por Chou e Hannaford (1994 e 1996), for considerada a espessura t_k da parede do músculo. Com isto, tem-se:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi(D-2t_k)^2 L}{4} \quad \text{EQ 3.1.7}$$

A nova formulação é:

$$F = \frac{\pi D_0^2 P' (3 \cos^2 \theta - 1)}{4} + \pi P' \left[D_0 t_k \left(2 \operatorname{sen} \theta - \frac{1}{\operatorname{sen} \theta} \right) - t_k^2 \right] \quad \text{EQ 3.1.8}$$

3.2 SIMULAÇÃO E RESULTADOS PARCIAIS

Considerando os cálculos anteriores do modelo simplificado em que a espessura da parede interna ainda não foi inserida como relevante na formulação e modificando tal expressão para deixar de uma forma mais evidente a contração do músculo, tem-se:

$$F = \pi D_0^2 P \frac{(3 \operatorname{sen}(\theta_0)(1 - \Delta l)^2 - 1)}{\operatorname{tg}^2(\theta_0) \operatorname{sen}(\theta_0)} \quad \text{EQ 3.2.1}$$

$$\Delta l = 1 - \frac{l}{l_0} \text{ (contração do PAM)}$$

Onde l é o comprimento do PAM no instante analisado, l_0 é o comprimento do músculo em repouso e sem carga e θ_0 é o ângulo θ também em repouso e sem carga.

Sendo assim, o resultado obtido foi:

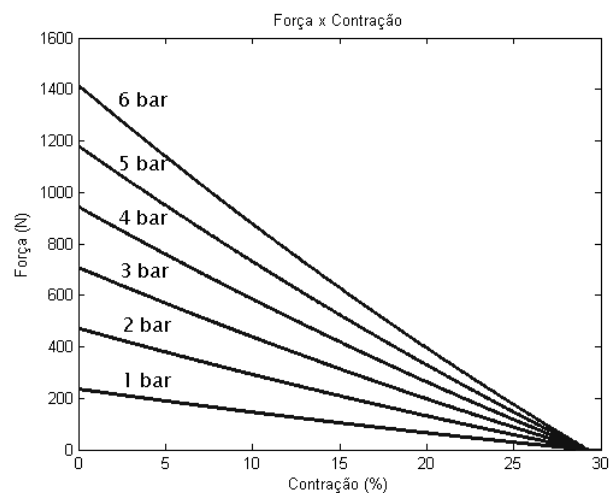


FIG. 3.2.1 - Resultado da modelagem do cilindro ideal

De acordo com Daerden e Lefebvre e Tsagarakis e Caldwell, o resultado encontrado era o esperado, já que, apesar de utilizarem atuadores grandes (completamente esticados medem 1,78m e completamente contraídos medem 1,2m), chegaram a resultados semelhantes, como pode ser observado na figura a seguir:

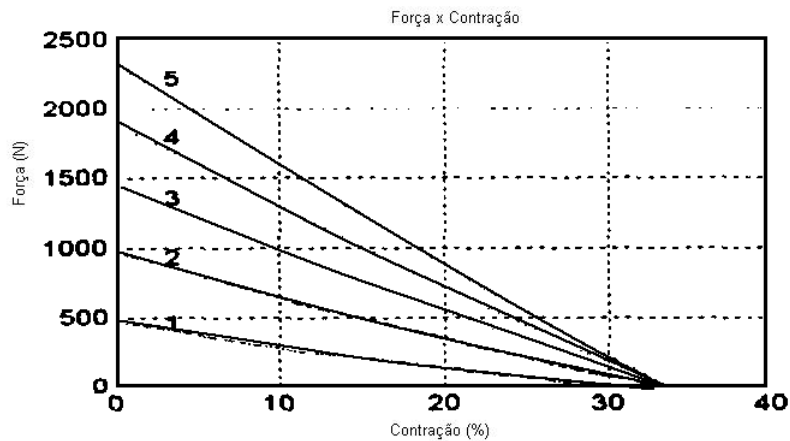


FIG. 3.2.2 - Modelagem estática de Tsagarakis e Caldwell

Já ao analisar o modelo sem considerar o cilindro sendo um cilindro ideal, ou seja, considerando a espessura da parede, tem-se a fórmula demonstrada anteriormente na EQ 3.18. Encontrando, assim, ao seguinte resultado:

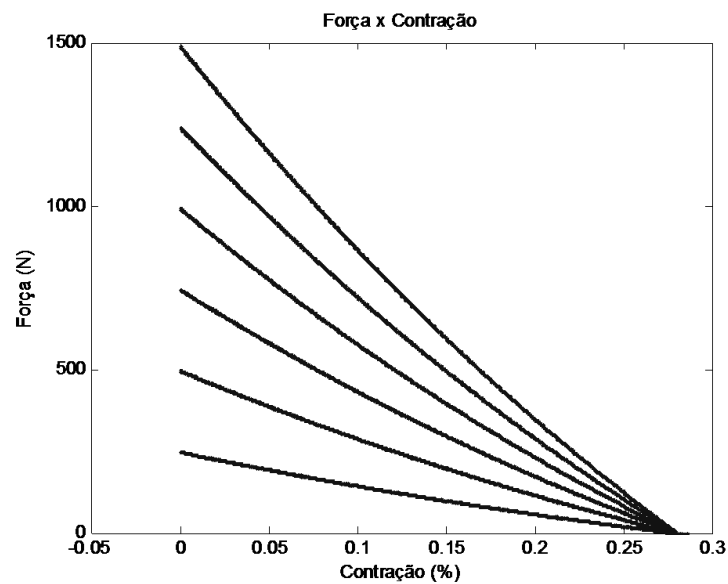


FIG. 3.2.3 – Resultado da modelagem do cilindro não ideal

Como no caso anterior, este modelo não é adequado para baixas pressões. Sendo assim, somente para altas pressões este modelo será comparado. Comparando somente a pressão de 6 bar (máxima admitida pelo atuador), encontra-se:

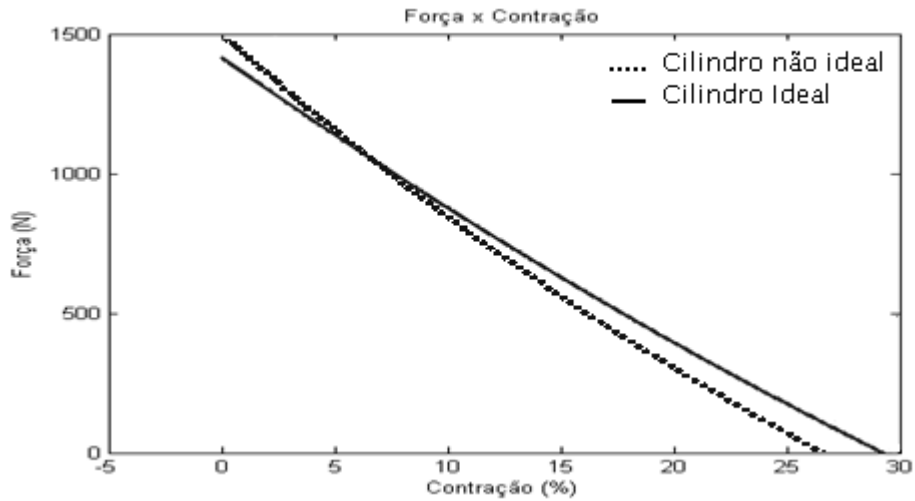


FIG. 3.2.4 - Dois tipos de modelagens estudadas

O que realmente importa é validar o modelo com o gráfico fornecido pela Festo, sendo assim, todos os modelos já implantados (considerando ou não considerando a espessura do cilindro, sendo cilindro não ideal ou ideal, respectivamente) serão comparados.

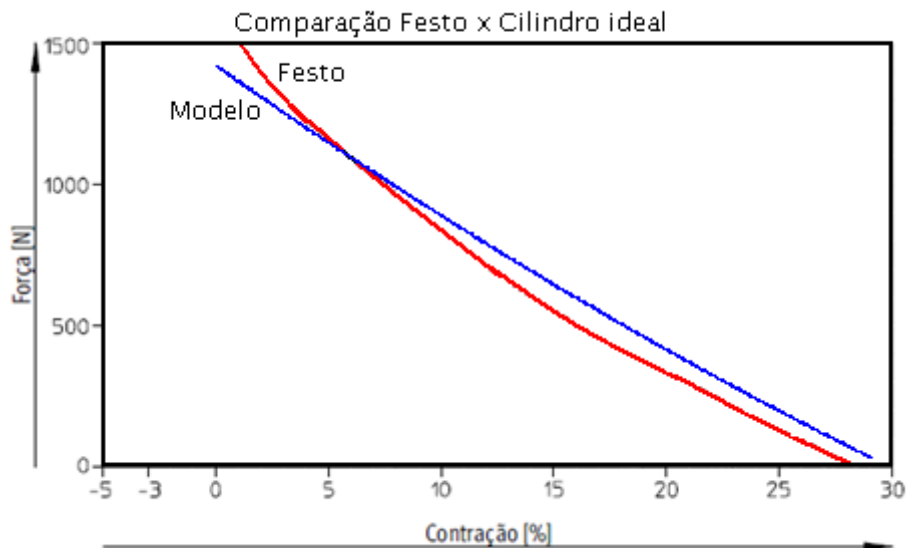


FIG. 3.2.5 - Comparação Festo x Cilindro ideal (6 bar)

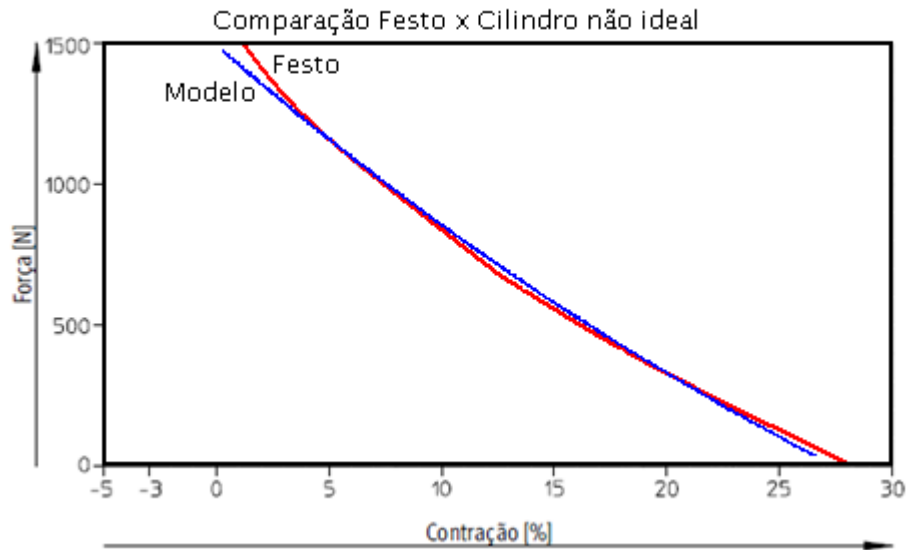


FIG. 3.2.6 – Comparação Festo x Cilindro não ideal (6 bar)

Com a visualização dos gráficos acima, fica claro a importância e a melhora na modelagem quando a parede do músculo é considerada, ainda mais quando observada a faixa de utilização do músculo que pode ser observada na FIG. 3.2.6.

Apesar da melhoria para alta pressão, o modelo não é adequado para as demais pressões, obtendo erros muito acima do dito como aceitável, no caso 10%. A figura abaixo faz essa comparação entre o modelo proposto e o gráfico apresentado pelo fabricante do músculo artificial:

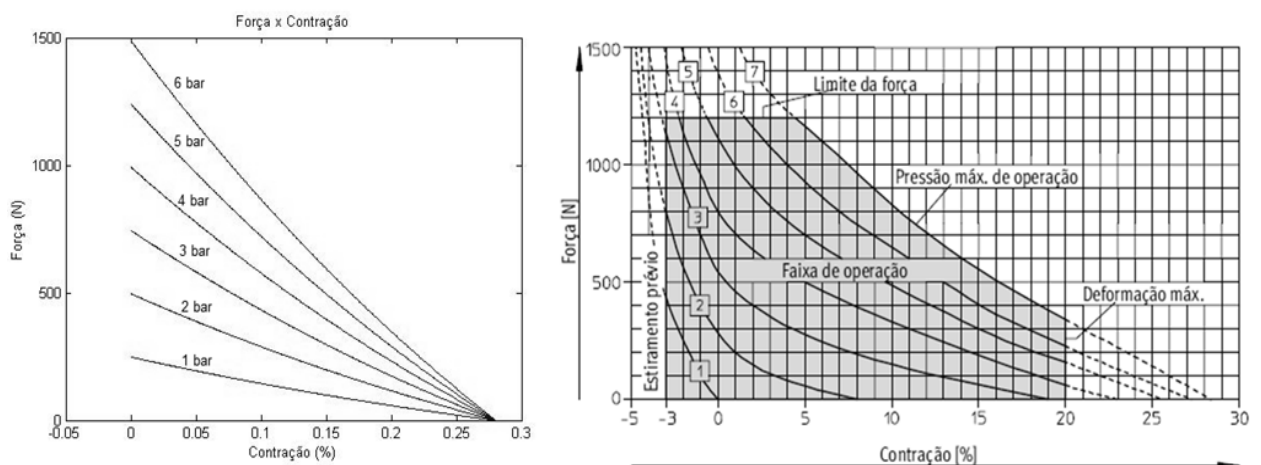


FIG. 3.2.6 – Comparação Simulado VS Fabricante

Na curva do gráfico dado pelo fabricante à direita, observa-se que a curva referente ao número 7 equivale à pressão de 6 bar (600 kPa), a curva 6 equivale à pressão de 5 bar (500 kPa) e assim sucessivamente. Tendo em vista o problema apresentado acima, onde claramente a curva do primeiro gráfico não se aproxima da curva do segundo gráfico, optou-se pela modificação do modelo apresentado. O novo modelo é baseado na física do músculo, não mais na geometria do mesmo, que poderá ser observada no capítulo referente à modelagem física.

4 MODELAGEM FÍSICA

O modelo apresentado é a modelagem de um músculo cardíaco simplificado, proposto por Y.C. Fung em *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissue* (1993) e citado por Jennifer L. Serres, sem os elementos elásticos em série, consistindo apenas em um modelo mola amortecedor em paralelo, amplamente utilizado na engenharia mecânica. Já sendo caracterizado pela física envolvida, não mais pela geometria do músculo.

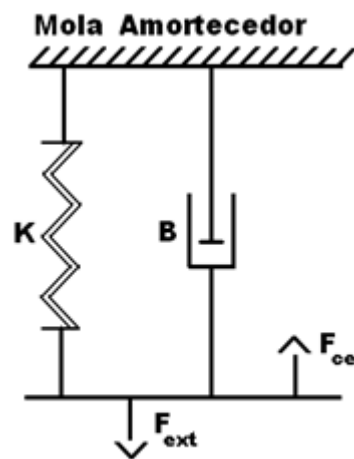


FIG. 4.1 – Modelo PAM

De acordo com o modelo apresentado na FIG. 4.1, a equação referente a esta figura pode ser visualizada abaixo:

$$M\ddot{X} + B\dot{X} + KX = F$$

$$F = F_{ce} - F_{ext}$$

EQ 4.1

Onde K é a constante elástica, B é a constante de amortecimento, F_{ce} é a força de contração do músculo, F_{ext} é a força externa aplicada na extremidade livre do músculo artificial pneumático, M é 1/3 da massa do músculo pneumático, já que este

músculo encontra-se fixado em uma das extremidades e X é o deslocamento do atuador.

Nos capítulos anteriores, foi verificado que o valor para a força de contração do músculo não correspondia satisfatoriamente ao apresentado pela Festo, com isso o cálculo desta força de contração deve ser modificado. Além desta força, ainda necessita-se calcular os valores da rigidez e amortecimento do músculo.

4.1 SIMPLIFICAÇÕES

A fim de obter uma resposta mais rápida do modelo simulado, tentou-se simplificar o código implementado da seguinte maneira:

Ao invés de utilizar a abordagem por meio de uma equação diferencial ordinária, partiu-se para uma abordagem através da transformada de Laplace. Chegou-se então ao seguinte resultado, através da utilização do programa MATLAB:

$$X(t) = -\left(\cosh(t(Q))\right) - \frac{\sinh(t(Q))\left(\frac{B}{2M} + \frac{KX_0}{F - KX_0}\right)(F - KX_0)}{Q \left(Ke^{(B/2M)t}\right)} \quad \text{EQ 4.1.1}$$

Onde:

$$Q = \frac{1}{4}\left(\frac{B^2}{M^2} - \frac{K}{M}\right)^{1/2} \quad \text{EQ 4.1.2}$$

Tem-se também o Laplace Simplificado, onde a inércia é retirada do sistema a fim de simplificar o código.

$$X(t) = \frac{F}{K}\left(1 - e^{-\frac{K}{B}t}\right) \quad \text{EQ 4.1.3}$$

Tal simplificação pode ser encontrada em anexo. Apesar do Laplace não simplificado possuir os mesmos passos para a solução, esta foi omitida por ser bastante trabalhosa e optou-se por resolvê-la utilizando o programa MATLAB.

Comparando os três métodos apresentados (EDO, Laplace e Laplace Simplificado) verificam-se os gráficos comparativos nas figuras abaixo.

Na FIG. 4.1.1 encontra-se a comparação entre o Laplace e o Laplace Simplificado:

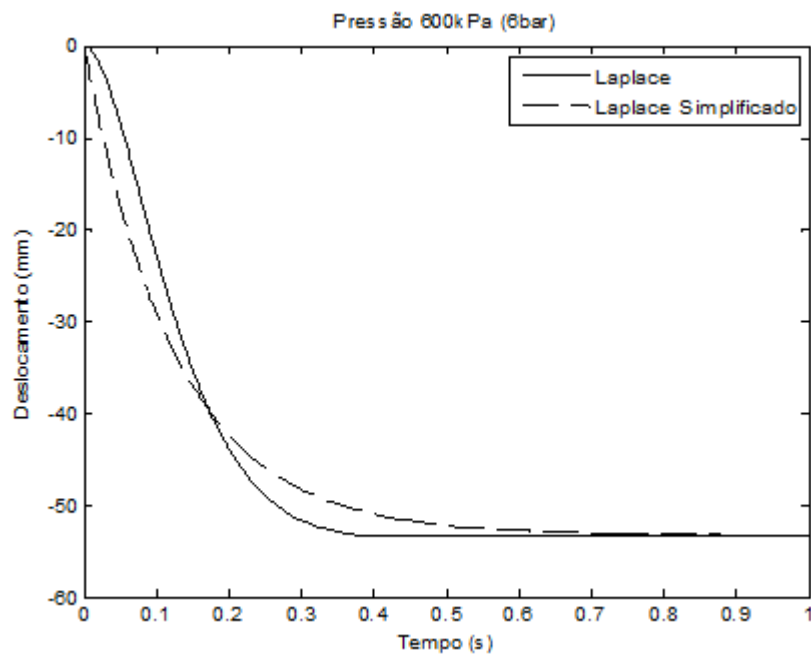


FIG. 4.1.1 – Laplace VS Laplace Simplificado

Nesta figura observa-se claramente a interferência da inércia no transiente, mas conforme esperado, o regime permanente é o mesmo para ambos os métodos.

Já o comparativo entre os dois métodos de Laplace com o método utilizando a EDO, pode ser observado nas FIG. 4.1.2 e FIG. 4.1.3:

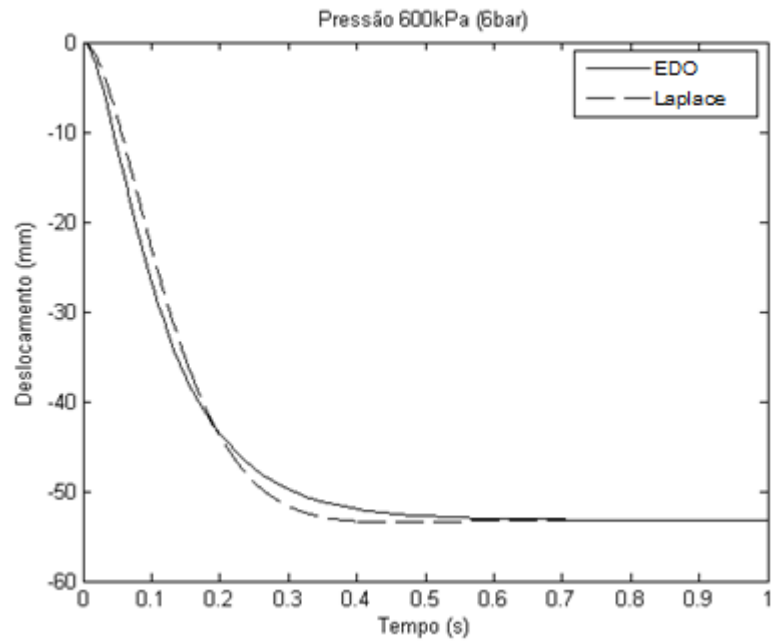


FIG. 4.1.2 – EDO VS Laplace

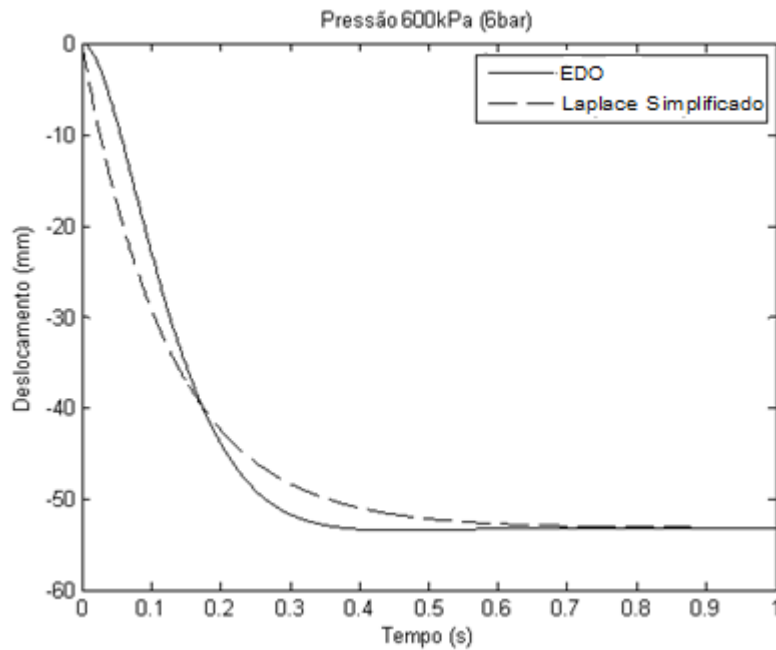


FIG. 4.1.3 – EDO VS Laplace Simplificado

No método de Laplace em que a inércia não é retirada do sistema, tem-se uma aproximação ao método da EDO. No caso do modelo simplificado de Laplace, este possui o mesmo valor em regime permanente e existe uma pequena diferença no regime transiente. Tal diferença pode ser considerada desprezível, também de acordo com o estudo feito por Jennifer L. Serres, a inércia representa menos de 1%

na posição do atuador. Por questões de simplificação e melhoria no tempo de simulação (ou tempo de máquina), o modelo simplificado de Laplace, ou seja, sem a inclusão da inércia será utilizado.

4.2 CÁLCULO DA RIGIDEZ

Para o cálculo da rigidez uma pressão interna foi aplicada ao músculo e depois uma massa de valor conhecido foi aplicada na plataforma e esta foi acoplada à extremidade livre do músculo através de cabos de aço. A rigidez e amortecimento dos cabos de aço serão desconsiderados; sendo assim, o deslocamento pode ser visualizado pelo sensor de rotação acoplado à plataforma com a massa conhecida. Com os dados da massa, pressão e deslocamento, pode-se finalmente calcular o valor da constante elástica para cada pressão, utilizando uma média dos valores encontrados para a rigidez dentre os diversos valores de massa mensurados, conforme tabela abaixo:

TAB. 4.2.1 – Rigidez (valor médio)

Pressão [kPa]	Rigidez K [N/m] – valor médio
300	14448,00
350	15856,33
400	16973,33
450	17889,00
500	18489,33
550	19123,33
600	20256,67

Utilizando uma regressão linear, encontram-se os seguintes resultados:

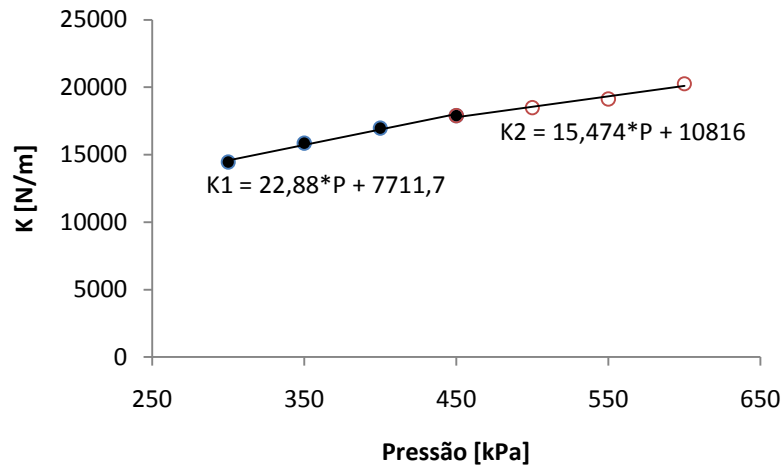


FIG. 4.2.1 – Regressão Linear para Rigidez

Para pressões até 450 kPa, o valor K1 é utilizado, para pressões acima deste valor, a regressão linear K2 é empregada, conforme visualizado no gráfico acima.

4.3 CÁLCULO DA FORÇA DE CONTRAÇÃO

O cálculo da força de contração foi estabelecido de acordo com os dados obtidos com o fabricante. O mesmo utilizado por Jennifer Serres com o músculo pneumático semelhante ao utilizado neste trabalho, a única diferença encontra-se no comprimento, sendo este 5 cm maior que o utilizado no LPM. De acordo com o gráfico da FIG. 3.2.6, o mesmo gráfico é capaz de oferecer a força de contração. Pensando nisso, observa-se que o mesmo equacionamento utilizado no MAS-20-250 (usado por Jennifer Serres) pode ser utilizado no MAS-20-200 (estudado neste trabalho), logo, segue a equação da força de contração:

$$\begin{cases} F_{ce} = 2,29 \times P & ; P \leq 200\text{kPa} \\ F_{ce} = 179,2 + 1,39 \times P & ; P > 200\text{kPa} \end{cases} \quad \text{EQ 4.3.1}$$

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

Por especificações técnicas da válvula solenóide, foi verificado que a mesma não é capaz de apresentar um bom funcionamento para pressões inferiores a 300 kPa, então decidiu-se apenas realizar o estudo para pressões iguais ou acima deste valor.

Pelo programa MATLAB dá-se início ao trabalho da válvula solenóide, fazendo com que o músculo infle por um tempo de 5 segundos e desinfele em seguida a uma dada pressão e verifica-se o deslocamento encontrado. Com o programa da Pasco DataStudio, recebem-se as leituras do encondor, a fim de calcular o deslocamento por tempo do experimento. Após, uma tabela é exportada por esse mesmo programa em extensão “.txt” que é lido pelo MATLAB e então se exportam os gráficos comparativos entre o experimento e o resultado simulado pelo modelo do MATLAB.

A plataforma onde os pesos são colocados tem a massa de 2,7 kg. Foram feitas três medições: Sem carga (2,7 kg), com 12,7 kg e com 17,7 kg. Sendo assim, inicia-se pela menor pressão possível e após compara-se com a maior pressão possível no músculo artificial pneumático, apenas os extremos da pressão serão analisados assim como os extremos das massas:

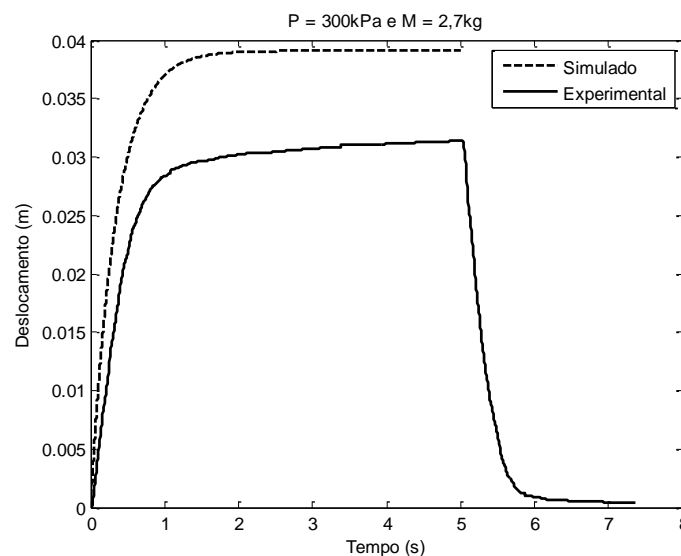


FIG. 4.4.1 – Comparação Simulado VS Experimental para P=300kPa e M=2,7kg

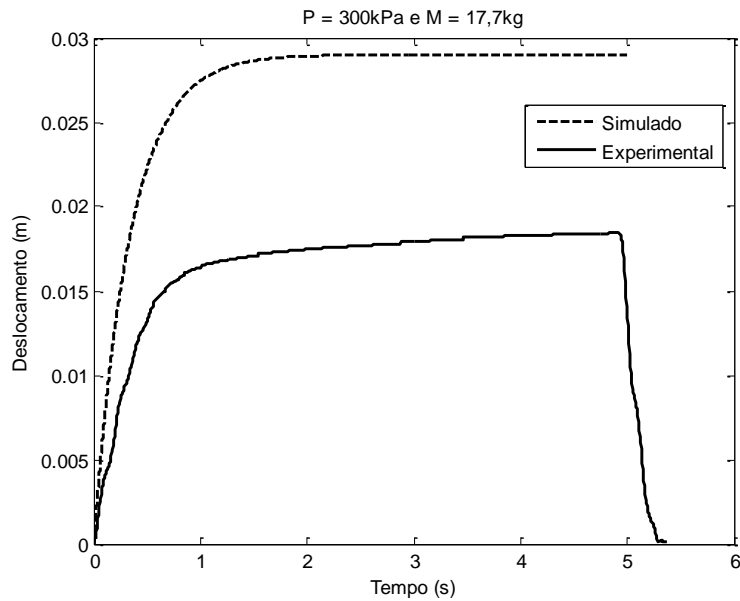


FIG. 4.4.2 - Comparação Simulado VS Experimental para P=300kPa e M=17,7kg

Observa-se que para pressões de 300 kPa o resultado é inaceitável, uma vez que os erros encontrados são de 25% e 57% respectivamente. Neste caso, quanto menor for a pressão e maior for a carga aplicada, tem-se uma piora considerável na resposta do sistema, não condizendo com o encontrado experimentalmente. Esta configuração pode ser considerada a mais crítica no que se diz respeito ao erro em regime permanente, por isso, esta foi apresentada.

Já para a melhor configuração, ou seja, com uma pressão no limite de operação do músculo artificial pneumático, que neste caso é de 600 kPa, tem-se um erro considerado aceitável, abaixo de 5%.

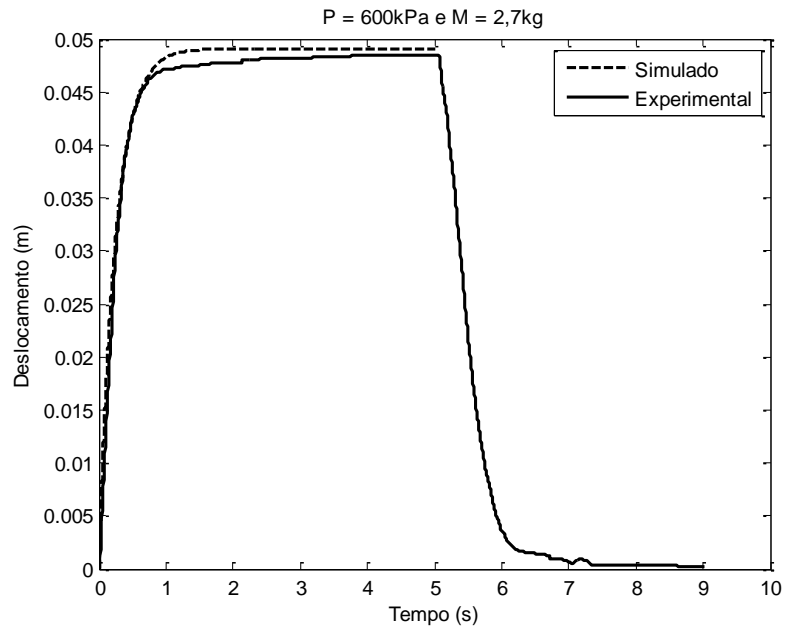


FIG. 4.4.3 - Comparação Simulado VS Experimental para P=600kPa e M=2,7kg

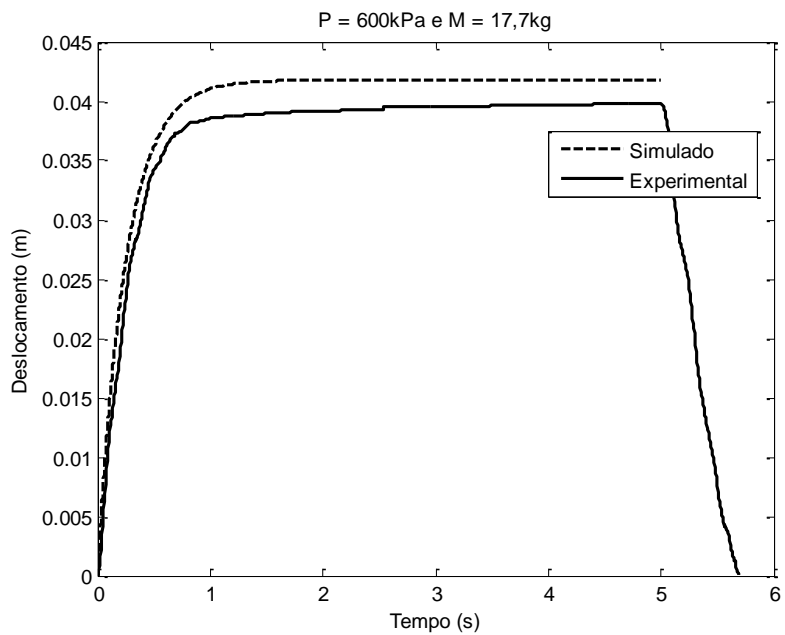


FIG. 4.4.4 - Comparação Simulado VS Experimental para P=600kPa e M=17,7kg

Os erros encontrados acima são respectivamente 1,2% e 4,9%. Sendo assim, para esta configuração, todos os dados medidos encontram-se dentro do aceitável.

Verifica-se que quanto menor for a pressão, pior é o resultado encontrado em comparação com o experimental. Se, aliado a este fato, for aplicada pouca carga, ou seja, pouca massa apoiada na extremidade livre acarreta numa piora ainda maior nos resultados. Sendo assim, acredita-se que uma otimização nos resultados somente poderá ser encontrada caso sejam refeitos os experimentos e valores próprios (não mais valores encontrados em referências bibliográficas) da rigidez, amortecimento e força de contração sejam encontrados. Além disso, uma metodologia para evitar propagação de erro foi adotada.

4.5 SEGUNDA ABORDAGEM

4.5.1 LIMITE 3 SIGMA

Limite de 3 sigma é uma ferramenta para controle estatístico e qualidade amplamente empregada tanto na teoria quanto implementada em indústrias, empresas ou em locais que necessitem deste tipo de controle estatístico para adequações de processos.

A idéia proposta por Shewhart, considerado o pai do controle estatístico da qualidade, visa a não modificação do processo quando estiver sob controle, evitando assim a variabilidade. Por isso, uma abertura de 3 desvios padrões em relação à linha média é aplicada, pois dificilmente um ponto vai desestabilizar o sistema.

O intervalo escolhido de 3 sigma, possui 99,73% de chance de englobar todos os pontos da média amostral, desde que a dispersão e a média não modifique, o que é o caso em questão, ou seja, apenas 27 médias surgem fora dos limites em 10.000 experimentos.

Se for considerado que Q é uma estatística amostral, sua média sendo μ_Q e o seu desvio padrão σ_Q , o gráfico que exemplifica e apresenta a idéia de Shewhart irá possuir uma linha central, denominada de Linha Média (μ_Q). O limite superior de controle (LSC) pode ser calculado através da fórmula $\mu_Q + L\sigma_Q$ e o limite inferior de controle (LIC) por sua vez pode ser encontrado no cálculo $\mu_Q - L\sigma_Q$. O coeficiente L representa a distância dos limites de controle à linha central medida em unidades do

desvio padrão da estatística. Como o controle generalizado e mais utilizado dentre os limites baseados nesta idéia é o 3 sigma, este coeficiente L é igual a 3. Com isso, tem-se:

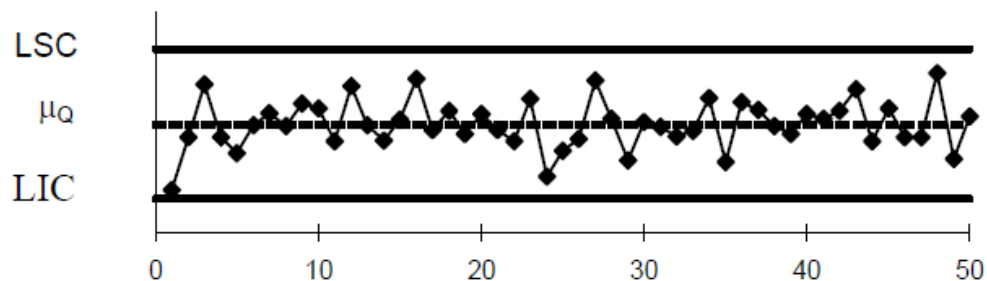


FIG. 4.5.1.1 - Gráfico de Controle de Shewhart

4.5.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para uma maior confiabilidade nos dados coletados e com o interesse em obter os próprios dados da rigidez, amortecimento e força de contração do músculo, foi criada uma metodologia para a coleta das séries de dados experimentais. O experimento consiste em variar a pressão aplicada no músculo artificial pneumático e a massa aplicada na extremidade livre deste. A pressão é incrementada de 50 kPa iniciando em 300 kPa até 600 kPa, são estes os limites inferior e superior de pressão, já que a válvula solenóide utilizada no experimento não possui um funcionamento adequado para pressões abaixo do valor de 300 kPa e o músculo artificial pneumático atua somente até 600 kPa segundo os dados obtidos com o fabricante. A carga aplicada na extremidade livre foi variada de 2,7 kg até 36,7 kg, sendo o limite inferior motivado pela massa somente da plataforma sem carga e o limite máximo pelo número de anilhas aliado a um limite de segurança dado pela junção nos cabos de aço.

Após a preparação do experimento, o reservatório de ar comprimido é posto no limite de operação do compressor, ou seja, aproximadamente 8 kPa. A válvula reguladora de pressão é ajustada para a pressão de operação do experimento em questão e então, através do programa MATLAB, a válvula solenóide é acionada por

5 ou 90 segundos. A diferença nesses tempos se deve ao fato de qual tipo de experimento deseja-se efetuar. No experimento de menor tempo, avalia-se o tempo de subida, ou seja, regime transiente, enquanto que no tempo de 90 segundos, avalia-se o regime permanente do sistema, que são ligadas diretamente as variáveis que os regem, sendo o regime transiente regido pelo amortecimento e o regime permanente pela rigidez. Para cada pressão e massa aplicada no sistema são feitas duas etapas de 5 experimentos cada, totalizando 10 experimentos para cada configuração de massa e pressão. Entre a etapa 1 e 2, todo o sistema é reconfigurado, ou seja, o reservatório é esvaziado e completado até o limite do compressor e a pressão é novamente ajustada. No final de todas as configurações possíveis, chegou-se a 700 experimentos concluídos com sucesso.

Estes dados foram tratados da seguinte maneira: cada dado de certa configuração foi capturado pelo programa da DataStudio da Pasco, fabricante do sensor de rotação, sendo então exportados para o programa Excel através da extensão “.txt”. Neste, foram separados somente os dados de deslocamento e tempo. Os dados obtidos nos 10 experimentos, sendo 5 da primeira etapa e 5 da segunda etapa, são submetidos à regra do “limite de 3 sigma”, caso algum desses dados estiver fora da especificação, ou seja, fora do limite mínimo ou do máximo de controle, este dado ou estes dados serão retirados da amostragem e esta será reformulada até atender à regra. Quando isto acontecer, a série será utilizada e acreditada como sendo o real valor experimental para dada pressão e massa, uma média aritmética é retirada dos dados aprovados e então esta passa a ser usada para futuros empregos nos cálculos ou comparações com os dados simulados. Segue na FIG. 4.5.2.1 uma exemplificação do gráfico gerado pelas diversas séries de dados experimentais obtidos:

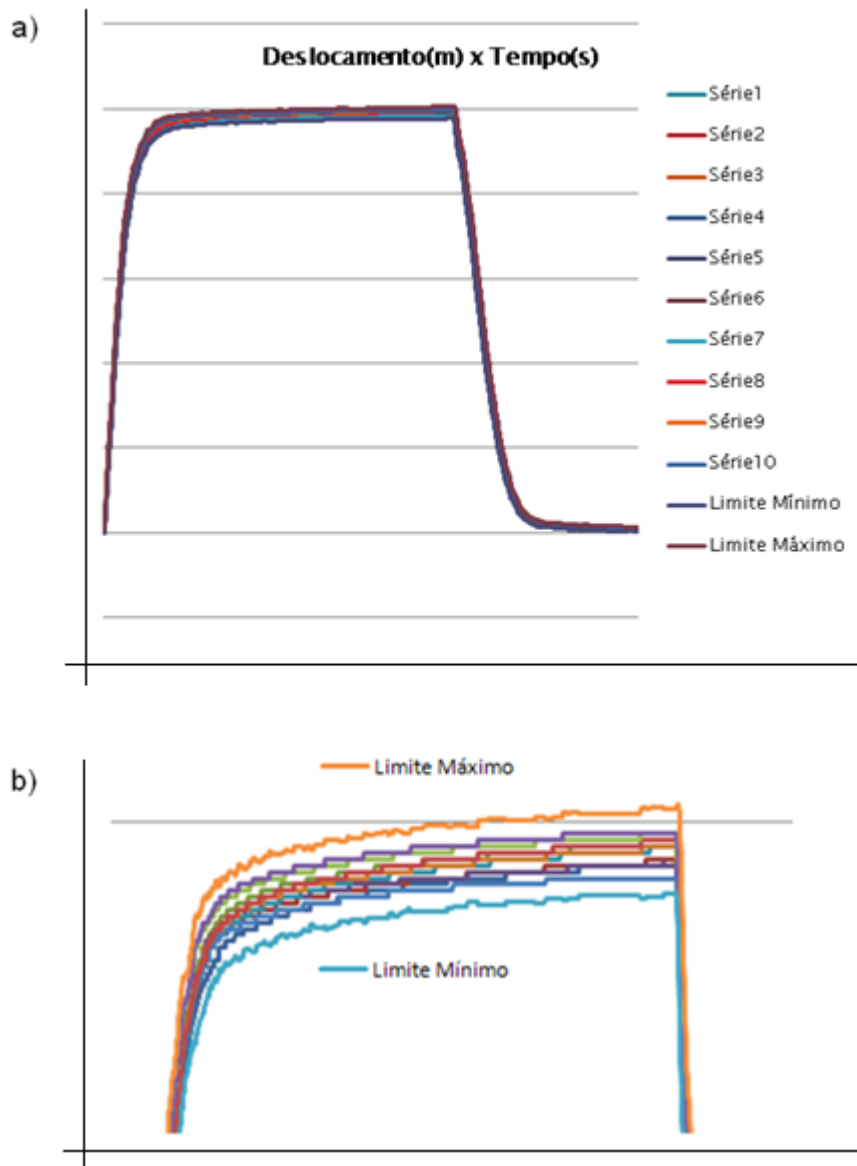


FIG. 4.5.2.1 – a) Curvas experimentais; b) Curvas experimentais em detalhe (gráfico ampliado)

No caso da FIG. 4.5.2.1 observa-se que todas as séries de dados encontram-se dentro dos limites gerados pelo limite de 3 sigma, ou seja, todas as 10 séries foram aprovadas e então pode-se obter a média aritmética dos dados em questão apresentados acima.

4.5.3 CÁLCULO DA RIGIDEZ NEBULOSA

Para o cálculo da rigidez, conforme mencionado no capítulo anterior decidiu-se por obter uma nova função, já que a função utilizada anteriormente não foi capaz de reproduzir com a precisão aceitável, então utilizou-se a lógica nebulosa. O gráfico de referência para o cálculo utilizando a lógica nebulosa é o da FIG. 4.5.3.1. Este gráfico foi obtido experimentalmente, calculando-se o K (rigidez) 10 vezes para cada valor de massa e pressão, variando estas de 2,7 até 36,7 kg e 300 até 600 kPa, respectivamente. Desses 10 valores foram calculados o limite superior de controle e o limite inferior de controle de acordo com o limite de 3 sigma e então as linhas médias dos experimentos foram calculadas. Este método de experimento foi utilizado para todos os valores encontrados neste trabalho.

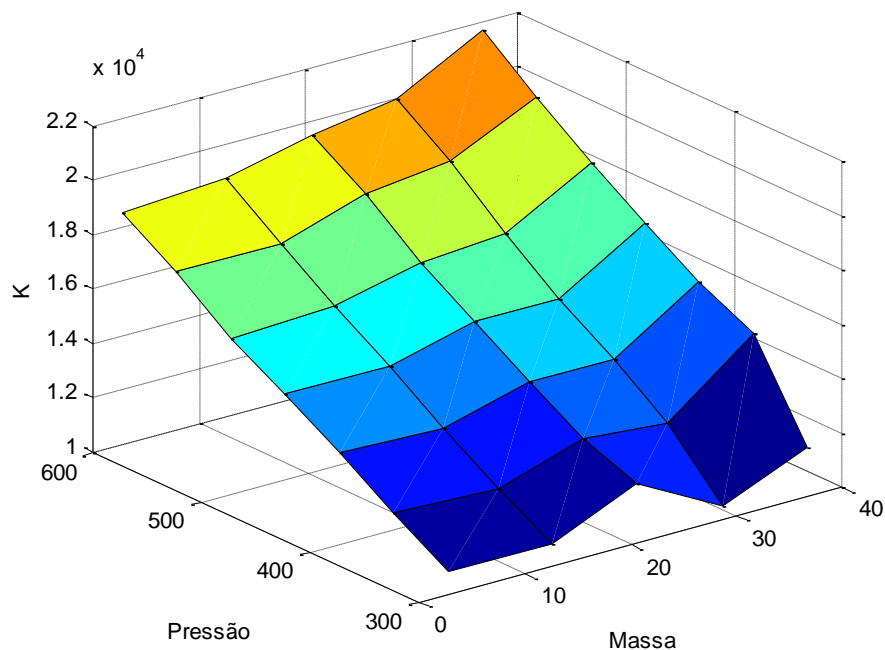


FIG. 4.5.3.1 – Superfície da rigidez

Na TAB. 4.5.3.1 a seguir, encontram-se os valores utilizados para o cálculo do gráfico da FIG. 4.5.3.1:

TAB. 4.5.3.1 – Rigidez experimental

Valores de K					
Pressão	2,7kg	12,5kg	20,6kg	28,6kg	36,7kg
300	10800	10800	12200	10500	11800
350	12050	11900	12900	12650	15100
400	13350	13250	14100	14100	16050
450	14600	14600	15400	15400	17350
500	15750	15900	16650	16850	18600
550	17300	17300	18250	18600	20100
600	18550	18750	19500	20000	21700

Para o cálculo da rigidez nebulosa, utilizou-se o *toolbox* do programa MATLAB. A inferência utilizada foi Mandani, com duas entradas, sendo elas a Pressão e a Massa e uma saída sendo a rigidez K. Nas funções de pertinência da entrada, no caso da Massa, foram utilizadas 3 funções do tipo “trimf” e no caso da Pressão foram utilizadas 2 funções do mesmo tipo. A saída foi dividida em 3 funções de pertinência, também do tipo “trimf”. Segue na FIG. 4.5.3.2 a superfície resultante através deste método nebuloso.

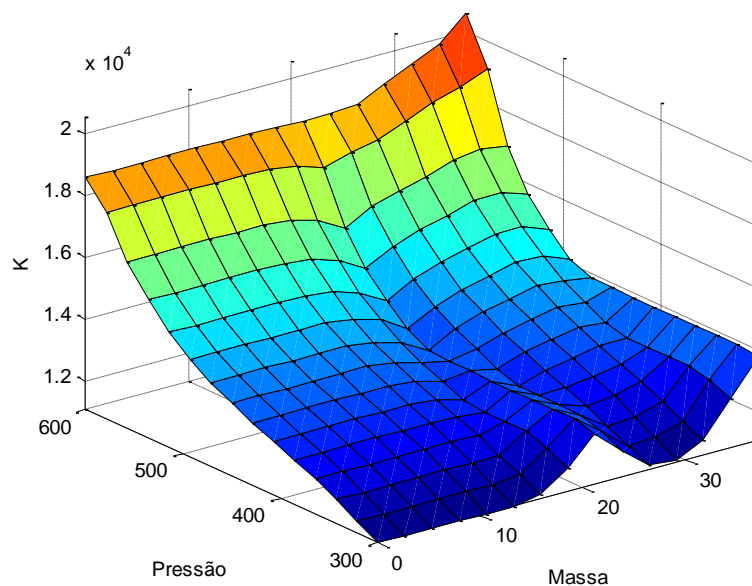


FIG. 4.5.3.2 – Rigidez nebulosa

4.5.4 CÁLCULO DO AMORTECIMENTO NEBULOSO

Para o cálculo do Amortecimento (B), utilizou-se a “Norma 2” para otimizar a constante de amortecimento para cada entrada. Na FIG. 5.5.4.1 encontra-se um exemplo desta otimização para 2,7 kg com 600 kPa. As curvas contínuas são as otimizações para cada B e a curva com pontos “O” é a curva obtida experimentalmente.

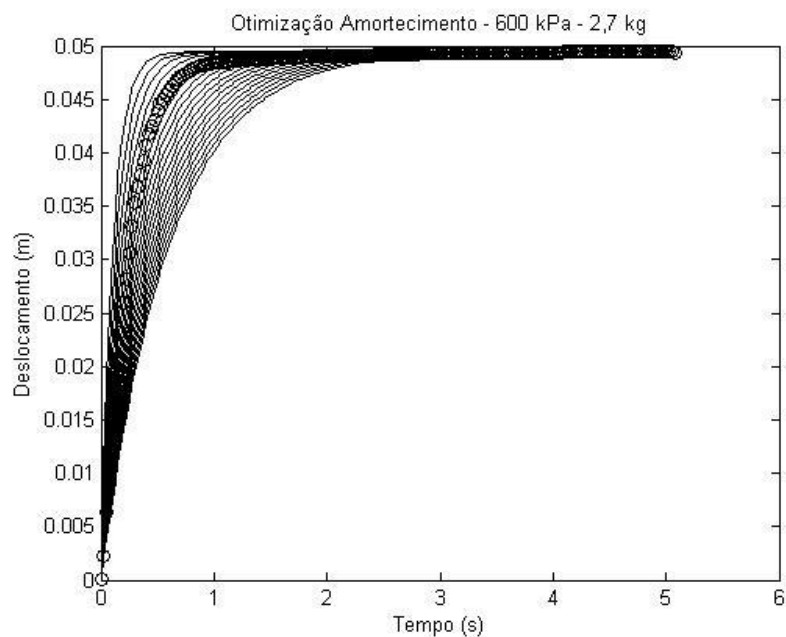


FIG. 4.5.4.1 – Amortecimento usando otimização Norma 2

Com estes valores otimizados, gerou-se a TAB. 4.5.4.1 abaixo com os valores de amortecimento para cada pressão e massa utilizando o amortecimento ótimo gerado em cada experimento:

TAB. 4.5.4.1 – Amortecimento ótimo

2,7 kg					
Pressão	K p/ 5s	Força	B	Soma erro	Erro médio
300	12300	386,52	5500	0,0087	
350	13000	480,36	5000	0,0111	
400	14200	574,20	5000	0,0104	5,13E-05
450	15300	668,04	5000	0,0111	5,44E-05
500	16400	761,88	5000	0,0118	5,85E-05
550	17900	855,72	5000	0,0102	4,99E-05
600	19200	949,56	5000	0,0069	4,68E-05
12,5 kg					
Pressão	K p/ 5s	Força	B	Soma erro	Erro médio
300	11400	290,09	4500	0,0061	3,04E-05
350	12700	383,93	4500	0,0072	3,62E-05
400	14000	477,77	4500	0,007	3,47E-05
450	15400	571,61	4500	0,0077	3,87E-05
500	16700	665,45	4500	0,0076	3,79E-05
550	18200	759,29	5000	0,0074	3,67E-05
600	19700	853,13	5000	0,0071	3,54E-05
20,6 kg					
Pressão	K p/ 5s	força	B	Soma erro	Erro médio
300	14600	211,10	5500	0,0043	2,18E-05
350	14900	304,94	5500	0,005	2,55E-05
400	15700	398,78	5000	0,0055	2,78E-05
450	16800	492,62	5000	0,0068	3,42E-05
500	18200	586,46	5000	0,006	3,03E-05
550	19200	680,30	5500	0,0077	3,50E-05
600	20600	774,14	5500	0,007	3,50E-05
28,6 kg					
Pressão	K p/ 5s	Força	B	Soma erro	Erro médio
300	16700	132,70	7000	0,0048	2,49E-05
350	16300	226,54	6000	0,0047	2,40E-05
400	16900	320,38	5500	0,0047	2,37E-05
450	18000	414,22	5500	0,0054	2,74E-05
500	19000	508,06	5500	0,0061	3,08E-05
550	20400	601,90	6000	0,0068	3,41E-05
600	21700	695,74	6000	0,0065	3,27E-05

36,7 kg					
Pressão	K p/ 5s	Força	B	Soma erro	Erro médio
300	16100	53,32	10000	0,0027	1,41E-05
350	15500	127,56	6500	0,0041	2,15E-05
400	16400	221,40	6500	0,0062	3,16E-05
450	17900	315,24	5500	0,0051	2,60E-05
500	19000	409,08	6000	0,0057	2,90E-05
550	20800	502,92	6000	0,0061	3,10E-05
600	21800	596,76	6000	0,0063	3,18E-05

Com os dados experimentais em mãos, foi possível gerar a superfície com estes valores, obtendo a FIG. 4.5.4.2. Com esta figura, pode-se acreditar que este é o amortecimento real que deve ser reproduzido pela lógica nebulosa.

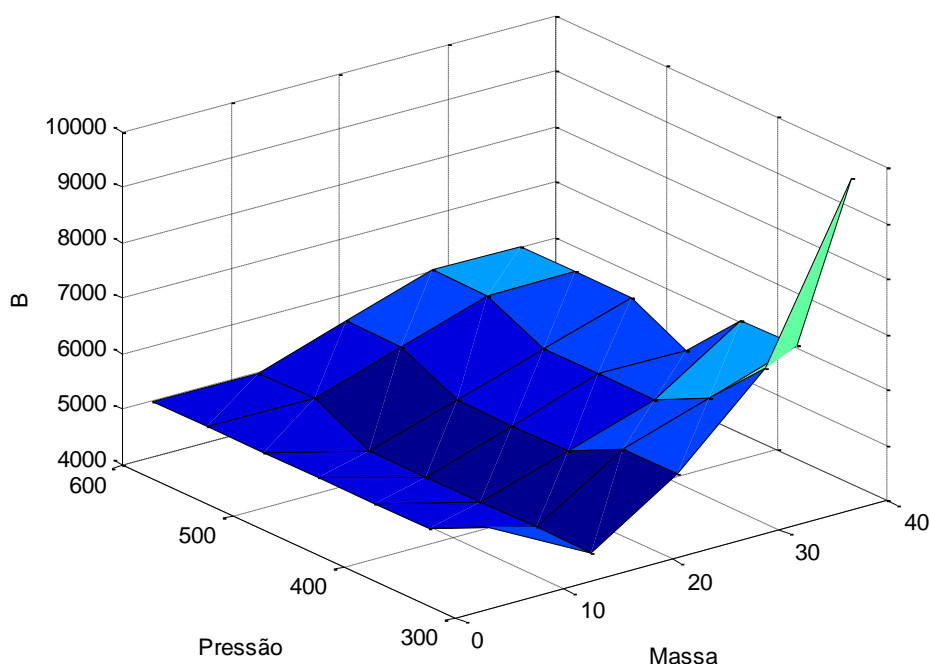


FIG. 4.5.4.2 – Amortecimento experimental

Da mesma forma que na rigidez nebulosa, o amortecimento possui duas entradas, uma para Pressão e outra para Massa e uma saída para o Amortecimento. Ambas as funções de pertinências utilizadas neste sistema nebuloso foram do tipo “trimf” e seguindo a rigidez nebulosa, o método de inferência nebulosa utilizado

também foi o Mandani. A superfície gerada pelo *toolbox* do programa MATLAB pode ser encontrado na FIG. 4.5.4.3:

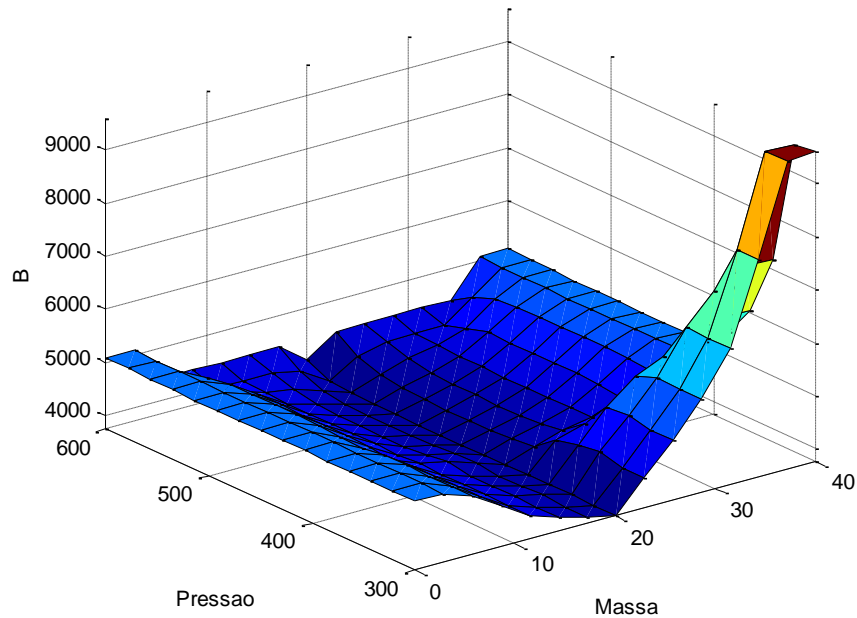


FIG. 4.5.4.3 – Amortecimento nebuloso

4.5.5 CÁLCULO DA FORÇA DE CONTRAÇÃO

Para o cálculo da Força de Contração exercida pelo músculo pneumático, fez-se necessário adicionar diversas cargas na extremidade livre do músculo e verificar quando este iria retornar para a posição anterior, ou seja, sem massa acoplada. Assim pode-se determinar uma razão entre a pressão necessária para que o músculo sustente uma determinada carga, encontrando então a Força de Contração deste músculo artificial. A FIG. 4.5.5.1 apresenta o resultado experimental encontrado. Em seguida utilizou-se uma regressão linear para formular a razão entre a Força de Contração e a Pressão exercida pelo músculo.

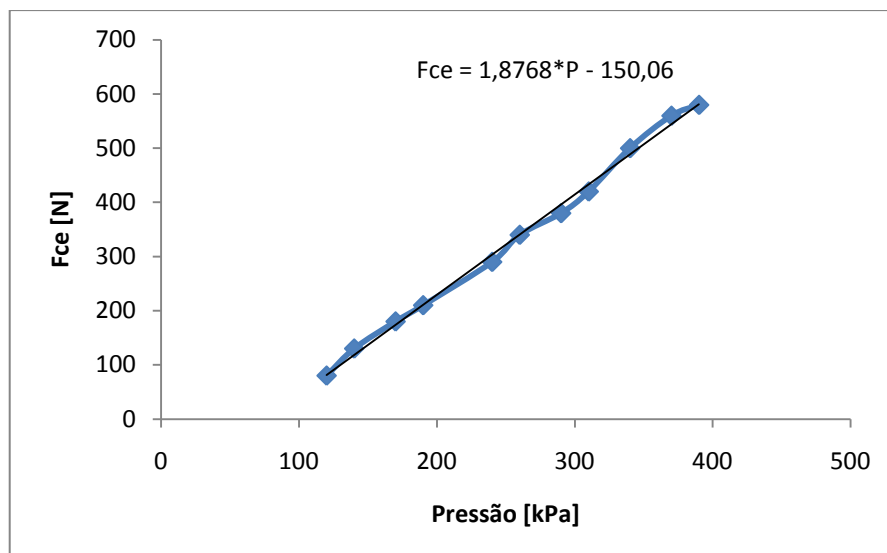


FIG. 4.5.5.1 – Regressão linear para Força de Contração

4.5.6 RESULTADOS:

Uma vez com os sistemas nebulosos de amortecimento e rigidez aptos e a força de contração obtida através de experimentos, pode-se dar início à simulação em ambiente MATLAB para diversos valores conhecidos e, então, verificar com o caso já experimentado para analisar o comportamento do modelo simulado. Nas figuras abaixo podem ser vistos os casos para pressões no extremo, ou seja, 300 kPa e 600 kPa.

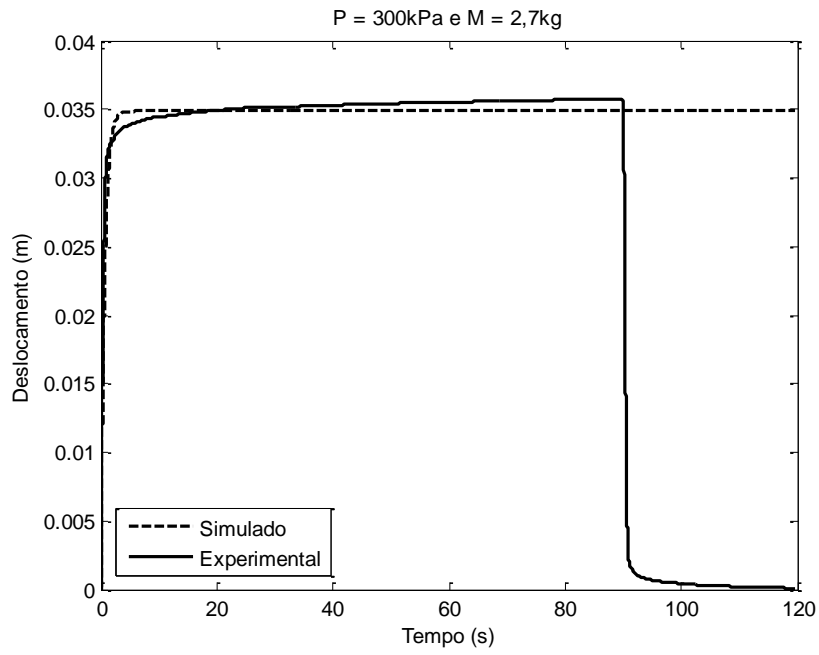


FIG. 4.5.6.1 – Gráfico para P=300kPa e M=2,7kg

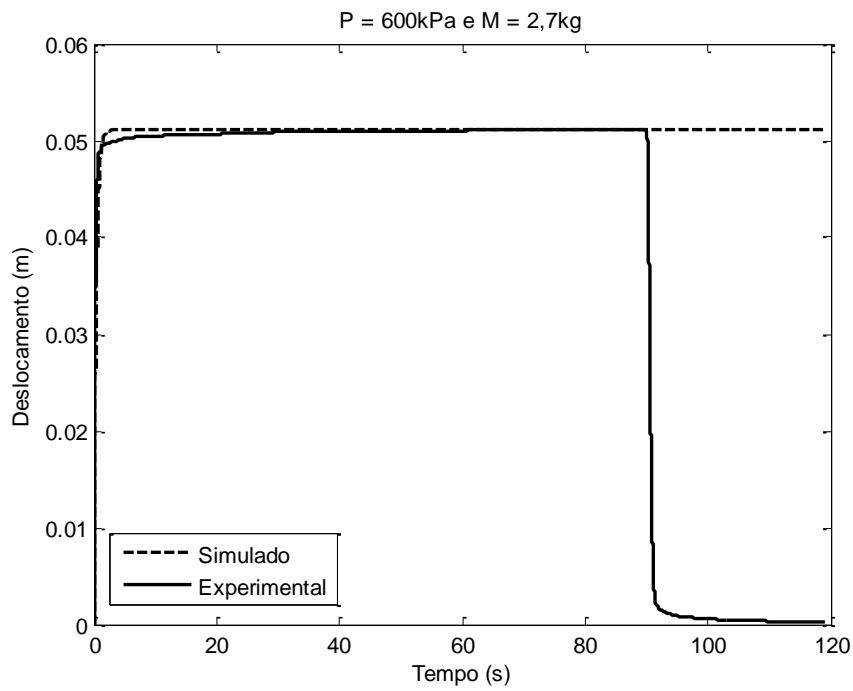


FIG. 4.5.6.2 - Gráfico para P=600kPa e M=2,7kg

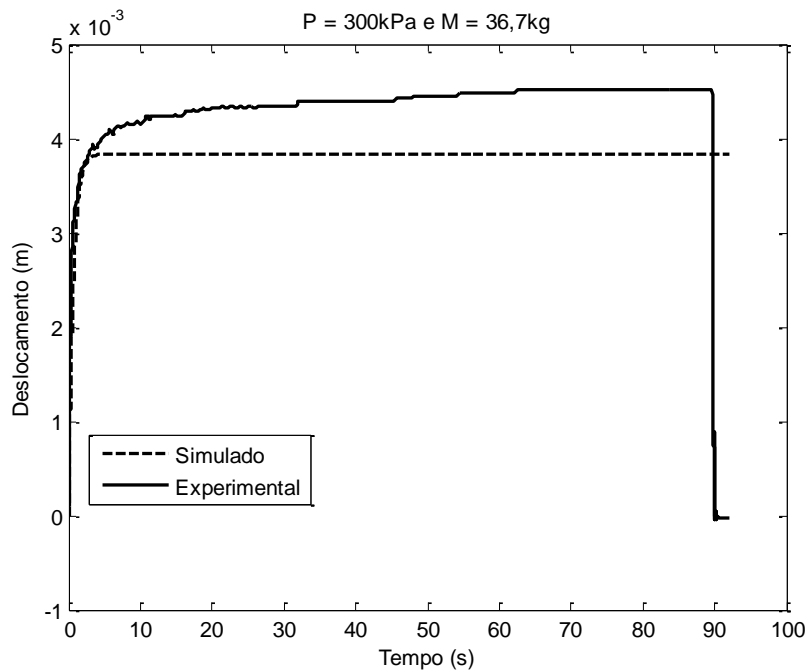


FIG. 4.5.6.3 - Gráfico para $P=300\text{kPa}$ e $M=36,7\text{kg}$

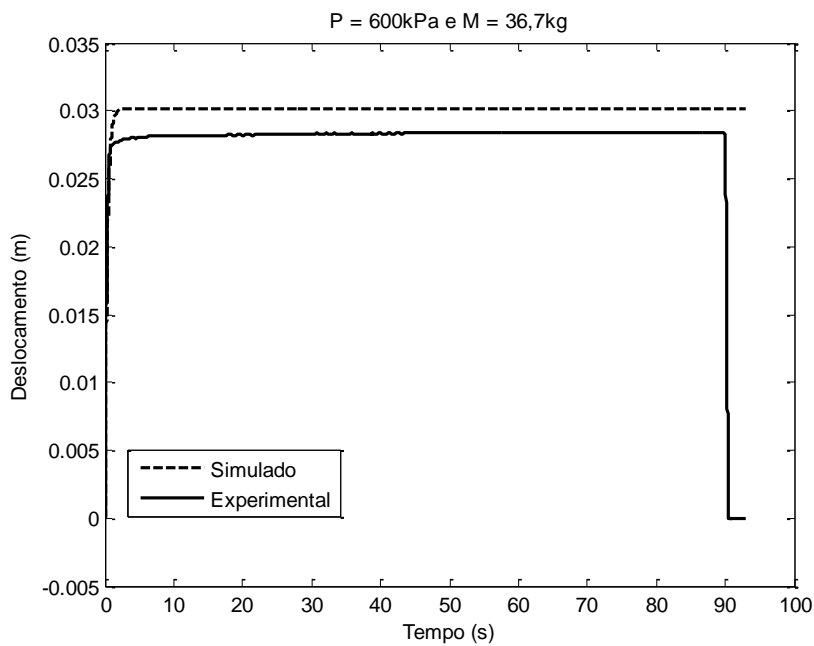


FIG. 4.5.6.4 - Gráfico para $P=600\text{kPa}$ e $M=36,7\text{kg}$

Analisando os gráficos acima, observa-se uma melhora considerável ao comparar tais dados com os adquiridos no início deste trabalho. Sendo assim, acredita-se poder passar para o controle utilizando o método aqui empregado.

5 CONTROLE

Neste Capítulo sobre o controle do músculo artificial pneumático, utilizou-se o modelo mola amortecedor apresentado anteriormente com algumas ressalvas introduzidas nos subtítulos que seguem.

5.1 CONTROLE BASEADO EM MODELO

Anteriormente, o sistema descrito recebia uma entrada de pressão de referência. Após, o modelo calculava o deslocamento que tal pressão de referência iria causar no músculo pneumático artificial que por sua vez atribuía ao sistema. Nota-se que não é do interesse saber o deslocamento a uma dada pressão e sim saber qual a pressão necessária para que o sistema atenda a certo deslocamento pretendido. Sendo assim, o modelo empregado neste controle deve ser o modelo ao empregado anteriormente. Para utilizar o modelo inverso, necessita-se modificar todas as fórmulas e sistemas que estejam em função da pressão, a começar pela força F resultante do sistema. Da EQ 4.1.3, tem-se:

$$F = \frac{X \times K}{1 - e^{-Kt/B}} \quad \text{EQ 5.1.1}$$

$$P = \frac{F + Mg + 150,06}{1,88} \quad \text{EQ 5.1.2}$$

Sabendo que:

$$F = F_{ce} - F_{ext}$$
$$F_{ce} = 1,88 \times P - 150,06 \quad \text{EQ 5.1.3}$$

Outra modificação feita é na lógica nebulosa. Anteriormente, a entrada do sistema nebuloso era a Massa e a Pressão, como no momento necessita-se justamente encontrar a Pressão necessária para atingir um deslocamento pretendido, faz-se necessário a modificação deste sistema nebuloso. O novo sistema precisa receber como entradas a massa e o deslocamento. Sendo assim as novas superfícies podem ser encontradas nas FIG. 5.1.1 e FIG. 5.1.2:

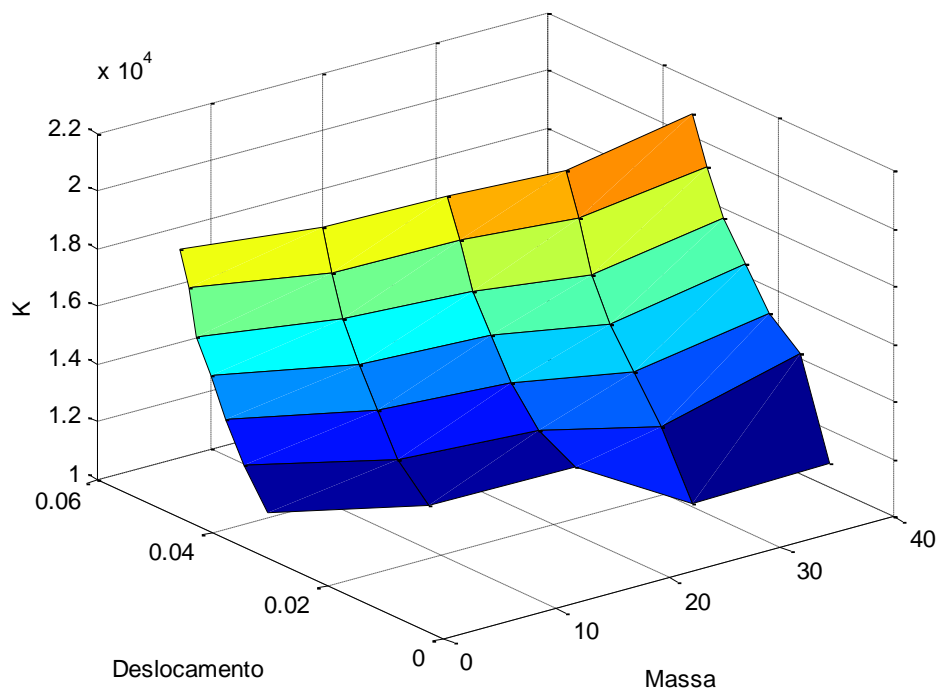


FIG. 5.1.1 – Superfície da Rigidez

Conforme pode ser analisada na FIG. 4.5.3.1, a principal diferença entre esta e a superfície gerada no caso da rigidez anterior, onde a entrada era a pressão e não o deslocamento é uma rotação no eixo Z, denominado de K . Sendo assim, o novo sistema nebuloso adotado necessita de um tratamento antes de entrar no *toolbox* do programa MATLAB para a lógica nebulosa. Para tal foi calculado o ângulo entre a figura e o eixo da Massa para que a matriz de rotação seja aplicada ao sistema, adequando os dados ao programa em questão. Por trigonometria, encontra-se o ângulo que a FIG. 5.1.1 está rotacionada em relação ao eixo da Massa, segundo a EQ 5.1.4.

$$\theta = \operatorname{atan}\left(\frac{0,0312}{34}\right) \quad \text{EQ 5.1.4}$$

$$Mr = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta \\ \operatorname{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{EQ 5.1.5}$$

Onde θ é o ângulo de rotação empregado neste caso e Mr a matriz de rotação plana utilizada para adequar a superfície ao toolbox de lógica nebulosa do MATLAB.

Para o caso do amortecimento, apenas um novo sistema é gerado sem a necessidade de fazer transformações, tendo como objetivo obter a resposta da FIG. 5.1.2:

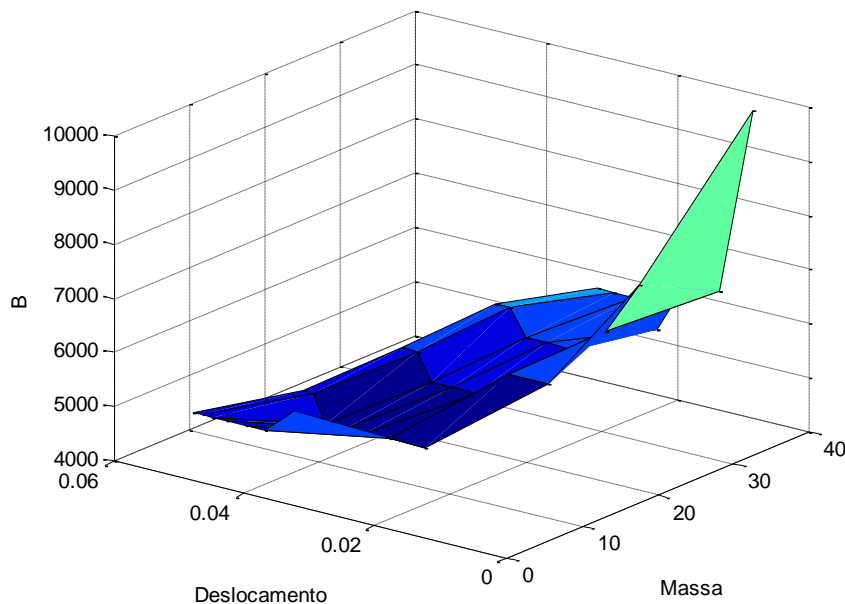


FIG. 5.1.2 – Superfície do Amortecimento

Observa-se na FIG. 5.1.2 acima a irregularidade na superfície para grandes deslocamentos e um pico acentuado para pequenos deslocamentos. Observando o comportamento do sistema, atenta-se que este não é tão sensível ao amortecimento. Já a rigidez impacta diretamente no valor em regime permanente, ou seja, diretamente na Pressão requerida. Tal fato impõe uma maior responsabilidade e atenção na implantação deste quesito.

Em posse das superfícies experimentais passa-se então para o sistema nebuloso da rigidez que pode ser visualizado na FIG. 5.1.3:

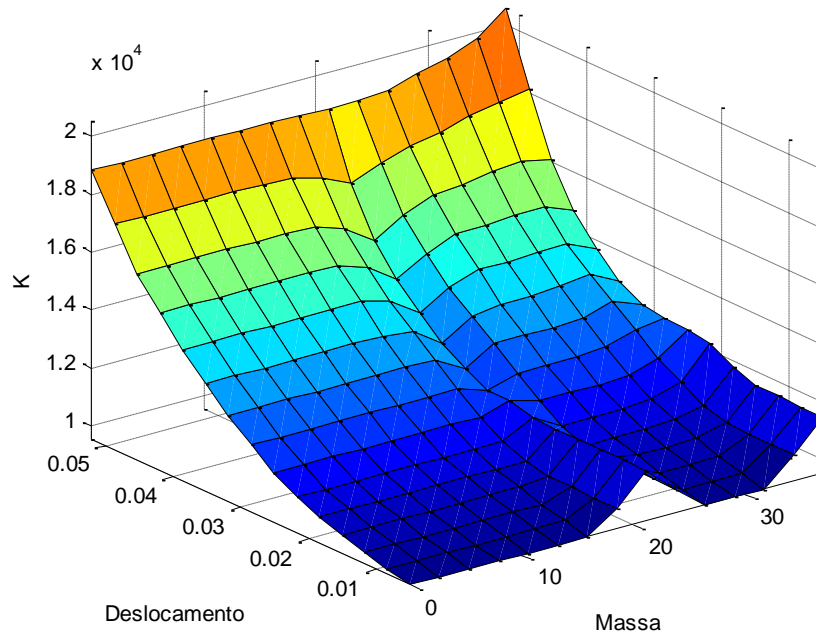


FIG. 5.1.3 – Rigidez nebulosa

Com os sistemas nebulosos montados pode-se então gerar os resultados e compará-los com os experimentais. No caso deseja-se encontrar a Pressão necessária para deslocar certa quantidade de massa.

5.1.1 RESULTADOS

A TAB. 5.1.1.1 abaixo apresenta os resultados da seguinte forma:

Para cada valor da Massa apresentado nas colunas da tabela, encontra-se um valor de Pressão correspondente em cada linha. Este valor de pressão é o experimental e o valor simulado deve ser o mais próximo possível deste.

TAB. 5.1.1.1 – Resultados Experimental VS Simulado

Pressão/Massa	2,70	12,54	20,60	28,60	36,70
300,00	359,97	347,75	306,48	325,21	304,44
350,00	415,19	412,65	366,78	378,38	351,33
400,00	461,93	469,90	428,57	445,23	416,47
450,00	512,90	531,33	501,31	502,32	481,56
500,00	568,06	566,57	540,08	534,83	521,82
550,00	591,60	585,13	560,06	558,87	554,06
600,00	606,42	601,50	584,01	585,82	576,75

Onde a unidade da Massa é kg e da Pressão kPa.

Exemplificando a TAB. 5.1.1.1, para uma massa de 36,7 kg, ao simular no programa MATLAB foi encontrado o valor de 554,06 kPa e de acordo com os resultados experimentais, este resultado deveria ser de 550kPa. Sendo assim, pode-se ter uma idéia mais clara do comparativo entre o simulado e o encontrado experimentalmente.

5.2 CONTROLE BASEADO EM LÓGICA NEBULOSA

Já neste caso o controle é baseado totalmente na teoria da lógica nebulosa. Diferenciando-se do primeiro tipo de controle empregado neste trabalho onde a mesma teoria era utilizada apenas para o cálculo da rigidez e amortecimento do sistema, agora a teoria de lógica nebulosa será empregada sem utilizar a modelagem matemática aplicada desde o início deste trabalho, ou seja, será empregada amplamente no caso em questão. Para tal, mais uma vez a superfície desejada será criada. A diferença para as superfícies de controle anteriores se dará somente no eixo Z, que neste caso serão atribuídos valores da pressão desejada conforme a FIG. 5.2.1.

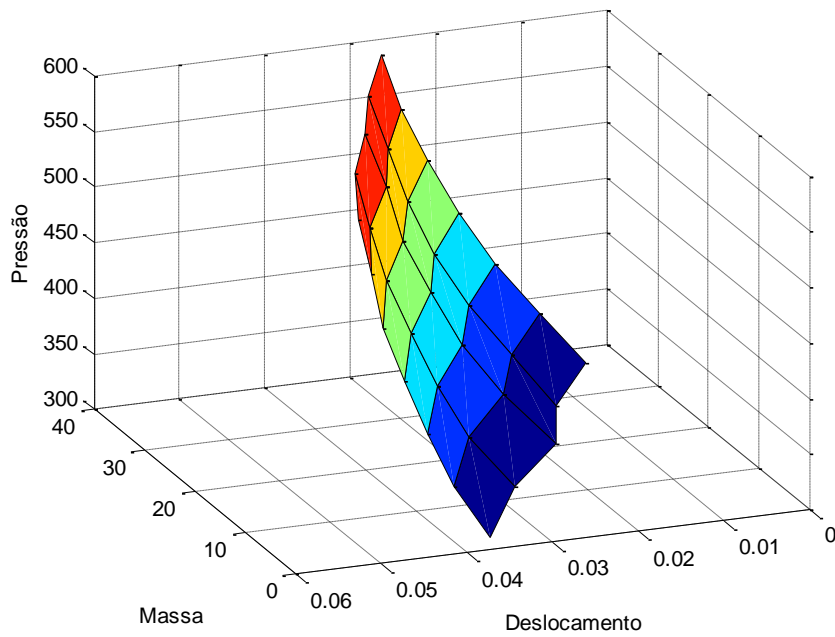


FIG. 5.2.1 – Superfície Experimental

A seguir encontra-se a mesma superfície, porém utilizando uma matriz de rotação no eixo da Pressão, para que esta superfície fique de acordo com a superfície a ser criada no MATLAB para o *toolbox* do sistema nebuloso, ou seja, paralela a um dos eixos a fim de facilitar a solução do problema. O mesmo modo de rotação empregado no capítulo anterior pode ser utilizado neste caso, apenas modificando o valor do ângulo de rotação, que neste caso é $\theta = 0,0526^\circ$, sendo tal valor pequeno devido a ordem de grandeza dos valores encontrados no eixo do Deslocamento.

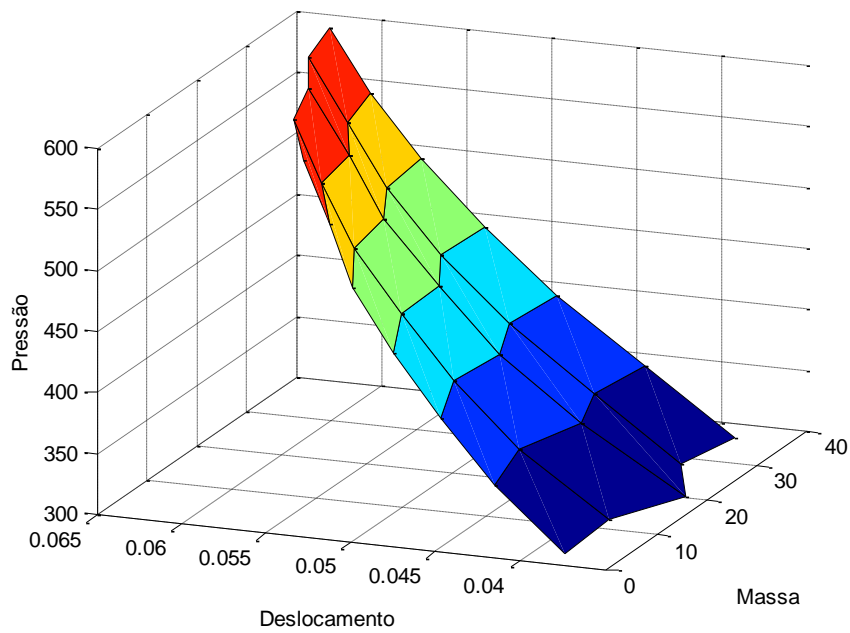


FIG. 5.2.2 – Superfície Experimental rotacionada

De acordo com a FIG. 5.2.2; criada de acordo com os dados de Massa, Deslocamento e Pressão obtidos experimentalmente, os quais podem ser encontrados nas matrizes da FIG. 5.2.3; foram criadas duas variáveis de entradas no sistema nebuloso do *toolbox* do programa MATLAB para a Massa e Deslocamento respectivamente. A variável de saída é a Pressão requerida para ser empregada no sistema. Nas variáveis de entrada, 4 funções de pertinência foram criadas para a Massa, 6 para o Deslocamento e 7 constantes de saída (Pressão) para o sistema, já que o sistema de inferência nebuloso escolhido foi o Sugeno.

```

M = [2.7 12.54 20.6 28.6 36.7];

X = [
0.0357 0.027 0.0174 0.0127 0.00451
0.0399 0.0323 0.0236 0.0179 0.00978
0.043 0.0361 0.0284 0.0229 0.015
0.0458 0.0392 0.032 0.0269 0.0193
0.0482 0.042 0.0353 0.0301 0.023
0.0496 0.0439 0.0373 0.0324 0.026
0.0511 0.0456 0.0397 0.0347 0.0284];

P = [
300 300 300 300 300
350 350 350 350 350
400 400 400 400 400
450 450 450 450 450
500 500 500 500 500
550 550 550 550 550
600 600 600 600 600];

```

FIG. 5.2.3 – Matrizes de massa, deslocamento e pressão

Onde M é a Massa [kg], X é o Deslocamento [m] e P é a Pressão [kPa].

Assim sendo, encontrou-se a seguinte superfície após a simulação executada no *toolbox* de lógica nebulosa do MATLAB:

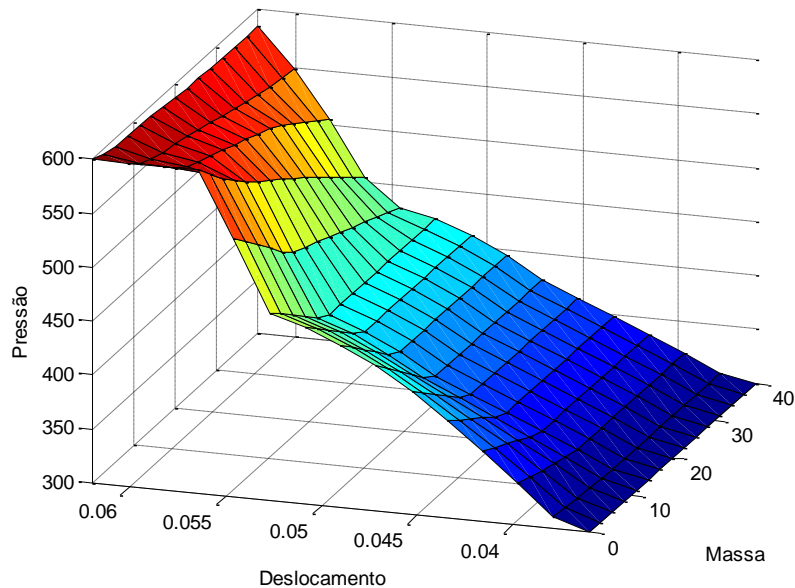


FIG. 5.2.4 – Superfície nebulosa

5.2.1 RESULTADOS

Ao gerar o código programado no *toolbox* do MATLAB específico para a lógica nebulosa, têm-se os dados exportados para o MATLAB e então uma tabela é gerada com os dados da Pressão resultante para todos os casos já conhecidos a fim de comparar tais dados simulados com os dados reais. A TAB. 5.2.1.1 abaixo apresenta o resultado encontrado para cada Massa simulada, sabendo que a unidade de massa utilizada na tabela é kg e a unidade de pressão é kPa. Esta tabela é semelhante a TAB. 5.1.1.1.

TAB. 5.2.1.1 – Resultado Experimental VS Simulado

Pressão/Massa	2,70	12,54	20,60	28,60	36,70
300,00	314,92	312,14	300,00	315,10	309,05
350,00	369,41	354,18	342,20	353,99	349,14
400,00	406,31	384,94	378,33	396,42	392,15
450,00	433,62	412,73	411,13	425,76	424,64
500,00	451,93	432,55	454,44	492,95	473,17
550,00	461,03	518,74	515,68	546,18	543,42
600,00	474,10	554,32	559,73	565,18	587,30

Apresenta-se a tabela dos erros em porcentagem encontrados, sendo calculados através da diferença entre o resultado encontrado na simulação versus o valor encontrado experimentalmente:

TAB. 5.2.1.2 – Erro dos valores simulados [%]

Pressão/Massa	2,70	12,54	20,60	28,60	36,70
300,00	4,97	4,05	0,00	5,03	3,02
350,00	5,55	1,19	-2,23	1,14	-0,25
400,00	1,58	-3,77	-5,42	-0,89	-1,96
450,00	-3,64	-8,28	-8,64	-5,39	-5,63
500,00	-9,61	-13,49	-9,11	-1,41	-5,37
550,00	-16,18	-5,68	-6,24	-0,70	-1,20
600,00	-20,98	-7,61	-6,71	-5,80	-2,12

Ao analisar a TAB. 5.2.1.1 com os dados encontrados, verifica-se a mesma dificuldade encontrada no capítulo anterior, onde os casos críticos são bastante

difíceis de serem modelados e simulados. Quanto menor a pressão e menor a massa empregada, maior é o erro encontrado. O sinal negativo apresentado na TAB. 5.2.1.2 apenas demonstra se o valor encontrado na simulação foi menor do que o valor experimental, acarretando em um erro com sinal negativo.

6 CONCLUSÃO

Conforme apresentado diversas vezes neste texto, conclui-se que para baixas pressões é um ponto crítico e é neste que se apresentam os maiores erros. Somando a este fator a pouca massa aplicada na plataforma experimental, aumenta-se ainda mais a diferença encontrada entre o experimental e o simulado. No outro extremo, para altas pressões, o resultado encontrado é satisfatório. Observou-se que, em ambos os tipos de controle apresentam erros aceitáveis (abaixo de 10% e salvo os pontos críticos), sobressaindo o controle baseado totalmente em lógica nebulosa. No próximo subtítulo, alguns problemas encontrados ou de grande interesse serão apresentados e são parte da conclusão.

6.1 SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS

Após verificar a dificuldade em modelar e conseqüentemente simular o comportamento do músculo pneumático artificial e tendo em vista a revisão bibliográfica, onde para baixas pressões o músculo não é estudado e pouco se sabe deste caso específico, entende-se a dificuldade neste quesito. Com isso um estudo pode ser aberto para atender esta necessidade.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a melhoria na plataforma experimental, de forma que esta possa trabalhar com cargas maiores, ou seja, superiores a 36,7 kg (carga máxima utilizada neste trabalho por limitação na plataforma experimental), levando o músculo até sua carga máxima, que neste caso é de 60 kg (carga suspensa livremente) ou 120 kg (carga apoiada). Acredita-se que, para este caso em especial, este trabalho pode ser continuado em quase sua totalidade, pois conforme visualizado, ao aumentar a carga, o modelo se comporta de forma mais semelhante ao caso real estudado.

Outra área de interesse seria o estudo mais aprofundado da questão levantada em relação à diferença encontrada neste trabalho com relação ao fabricante do

músculo, a Festo. Basicamente o estudo aprofundado da não conformidade dos dados aqui apresentados com o fabricante.

Estudar o comportamento do músculo pneumático artificial por meio da frequência, a fim de se entender e controlar o comportamento deste músculo ao utilizar movimentos repetidos, antevendo a utilização deste em tarefas cotidianas. Além disto, aprofundar o estudo da influência da carga aplicada na extremidade livre do músculo artificial pneumático em relação a resposta do sistema (deslocamento).

Por fim, uma implementação deste tipo de atuador seria bastante desafiador e interessante, por este possuir pouca divulgação no meio acadêmico caso comparado com outros meios de atuação pneumática ou hidráulica. Como exemplo de implementação têm-se os braços ou mãos robóticos, simulando músculos humanos ou próteses; exoesqueletos empregados no meio industrial para auxílio de força extra ou até mesmo no meio militar, equipando um militar em campo de batalha.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIZONA State University. Biodesign Institute [online], Arizona, nov. 2009. Disponível: <http://www.biodesign.asu.edu> [capturado em 12 nov. 2009].

CALDWELL, D., G., RAZAK, A., GOODWIN, M., J., **Control of Pneumatic Muscles**, em IEEE Xplorer, 1995.

CHOI, T.-Y., LEE, J.-Y., LEE, J.-J., **Control of Artificial Pneumatic Muscle for Robot Application**, em International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.

CHOU, C.-P., HANNAFORD, B., **Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles**, em IEEE Xplore, 1994.

DAERDEN, F., LEFEBER, D., **Pneumatic Artificial Muscles: actuators for Robotics and Automation**, em Pleinlaan 2, B-1050 Brussels, Vrije Universiteit Brussel, Department of Mechanical Engineering.

FESTO. AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. Catálogo [online]. 2009. Disponível : <http://www.festo.com.br> [capturado em 5 out. 2009].

REYNOLD, D., B., REPPERGER, D., W., PHILLIPS, C., A., BANDRY, G., **Modeling the Dynamic Characteristics of Pneumatic Muscle**, em Annals of Biomedical Engineering, Vol. 31, pp. 310–317, 2003.

SANTANA, A. B., Jr., FERREIRA, D., F., JESUS, L., T., **Desenvolvimento do Mecanismo de Controle para Músculos Pneumáticos**, Instituto Militar de Engenharia, 2009.

SCHULTE, H., F., Jr., **The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle**, em The Application of External Power in Prosthetics and Orfhotics. Washington, DC: Nat. Acad. Sci.-Nat. Res. Council, 1961.

SERRES, J., L., **Dynamic Characterization of a Pneumatic Muscle Actuator and its Application to a Resistive Training Device**, Wright State University, 2008.

SUGISAKA, M., ZHAO, H., **The characteristics of McKibben muscle based on the pneumatic experiment system**, em Artif Life Robotics, 2007.

TONDU, B., LOPEZ, P., **Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators** em IEEE Control Systems Magazine, abril 2000.

TSAGARAKIS, N., CALDWELL, D., G., **Improved Modeling and Assessment of Pneumatic Muscle Actuators**, em IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, 2000.

WICKRAMATUNGE, K., C., LEEPHAKPREEDA, T., **Empirical Modeling of Pneumatic Artificial Muscle** em Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists Vol II, 2009.

8 ANEXO

8.1 ANEXO 1

Laplace Simplificado:

Da equação de governo para o sistema, tem-se:

$$M\ddot{X} + B\dot{X} + KX = F$$

$$F = F_{ce} - F_{ext}$$

Excluindo-se a inércia do sistema, tem-se:

$$B\dot{X} + KX = F$$

$$L[B\dot{X} + KX = F]$$

$$X(S) = \frac{F}{S(BS + K)}$$

Aplicando o Inverso de Laplace, tem-se:

$$\frac{F}{S(BS + K)} = \frac{a}{S} + \frac{b}{S + K/B}$$

$$a = \frac{F}{K} \quad \therefore \quad b = -\frac{F}{K}$$

$$X(t) = \frac{F}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{B}t} \right)$$