

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

PATRÍCIA SENATORE RIBEIRO

CONTROLE DE MÚSCULO PNEUMÁTICO ACIONADO POR VÁLVULAS ON-OFF

**Rio de Janeiro
2017**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

PATRÍCIA SENATORE RIBEIRO

**CONTROLE DE MÚSCULO PNEUMÁTICO ACIONADO POR
VÁLVULAS ON-OFF**

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. Jorge Audrin Morgado de Gois, Drlng.

Rio de Janeiro

2017

c2017

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.

É permitida 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(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

620.1 Ribeiro, Patrícia Senatore

R484c Controle de músculo pneumático acionado por válvulas on-off /
Patrícia Senatore Ribeiro; orientada por Jorge Audrin Morgado de
Gois – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2017.

108p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de
Janeiro, 2017.

1. Curso de Engenharia Mecânica – teses e dissertações. 2. Lógica
nebulosa. 2. Músculo pneumático. I. Gois, Jorge Audrin Morgado
de. II. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

PATRICIA SENATORE RIBEIRO

**CONTROLE DE MÚSCULO PNEUMÁTICO ACIONADO POR
VÁLVULAS ON-OFF**

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. Jorge Audrin Morgado de Gois – Dr-Ing.

Aprovada em 01 de dezembro de 2017 pela seguinte Banca Examinadora:

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

Prof. André Luiz Tenório Rezende – D.Sc. do IME

Prof. Ricardo Teixeira da Costa Neto – D.Sc. do IME

Cel R/1 André Louzada Moreira – D.Sc. da Escola Naval

Rio de Janeiro

2017

À minha família, amigos e noivo que sempre me apoiaram e acreditaram que era possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me permitir chegar até aqui, à família que sempre me deu força e apoio, em especial meus pais que se sacrificaram sempre para que eu pudesse realizar meus sonhos.

Agradeço ao Marcelo Augusto, meu noivo, que sempre me deu força e não me deixou desanimar, mesmo quando eu mesma já não acreditava que daria certo.

Às minhas amigas do IME que trilharam esse árduo caminho ao meu lado dividindo todos os momentos bons e principalmente os ruins, procurando sempre manter o bom humor e não nos deixar desanimar, Anna Rafaela e Josiane. Não posso deixar de agradecer também à minha amiga Carol, que apesar de não estar no curso sempre esteve presente, ouvindo os meus desabafos e torcendo para que tudo desse certo.

Agradeço também ao meu orientador Jorge Audrin por todos os ensinamentos, por acreditar em mim e pela paciência durante essa jornada. Ao sempre prestativo Sargento Cristiano Souza, por me ajudar e me ensinar a conduzir os experimentos no laboratório. A todos os integrantes do IME que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse chegar até aqui, em especial, aos professores Aldélio Bueno, Ricardo Teixeira e André Luiz Tenório Rezende, que também foram essenciais nesta caminhada, sempre com algo a ensinar, palavras de encorajamento e prontos a ajudar.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

THEODORE ROOSEVELT

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	16
LISTA DE SIGLAS.....	18
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 O Problema	25
1.2 Revisão Bibliográfica.....	27
1.2.1 Pneumática.....	27
1.2.2 Exoesqueletos	30
1.2.3 Controle	36
1.3 Objetivos.....	43
1.4 Organização do Trabalho	44
2 SISTEMAS PNEUMÁTICOS	45
2.1 Válvulas Direcionais On-Off.....	48
2.2 Atuadores Pneumáticos.....	52
3 SISTEMAS DE CONTROLE	54
3.1 Lógica Nebulosa Aplicada à Controle.....	57
3.1.1 Funções de Pertinência.....	58
3.1.2 Sistemas de Inferência	62
3.1.3 Modelo de Sugeno (TSK)	63
3.1.4 Sistemas de Controle Nebuloso	68
3.2 Modelo Muscular de Hill.....	69

4	DESENVOLVIMENTO	73
4.1	Válvulas Eletropneumáticas On-Off 3/2 Vias.....	73
4.2	Músculo Pneumático	76
4.3	Modelagem de Válvulas On-Off.....	77
4.4	Modelagem do Músculo Pneumático.....	78
4.5	Sistemas Implementados	79
4.5.1	Sistema de Controle Nebuloso	80
4.5.2	Sistema de Controle com MMR.....	86
4.6	Experimentos Realizados	88
5	RESULTADOS E ANÁLISES	92
5.1	Controle Nebuloso	92
5.2	Controle com MMR.....	98
6	CONCLUSÃO	102
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1	Campos de Aplicação da Hidráulica e Pneumática (De Negri, 2001)....	22
FIG. 1.2	Garra Pneumática (Lucas, 2003).....	27
FIG. 1.3	Sistema Servopneumático (Locateli, 2011)	30
FIG. 1.4	BLEEX (Berkley Robotics, 2017).....	31
FIG. 1.5	eLEGS (Fast Company, 2017)	32
FIG. 1.6	Exoesqueleto HAL (Sankai, 2007).....	32
FIG. 1.7	ExoHand (portifólio ExoHand, 2017)	33
FIG. 1.8	Modelo de Exoesqueleto para Membros Superiores acionado por Cilindros Pneumáticos Compactos (Garcés, 2013).....	33
FIG. 1.9	Modelo de Exoesqueleto para Membros Superiores Acionado por PAM (Ramos, 2013).....	34
FIG. 1.10	Modelo Genérico para Exoesqueleto de Membros Inferiores (Souza, 2014)	35
FIG. 1.11	Manipulador não condutor (Lopes, 2014)	35
FIG. 1.12	Modelo de Exoesqueleto para Membros Inferiores com dois graus de liberdade (Pedrosa, 2015)	36
FIG. 1.13	Linearização por Realimentação (Suzuki, 2010)	37

FIG. 1.14	Correspondência das Atividades Mentais na Ativação de um Manipulador Robótico (Barbosa, 2010).....	38
FIG. 1.15	Modelo em Malha Aberta para Exoesqueleto de Membro Superior (Garcés, 2013)	39
FIG. 1.16	Malha de Controle para um Modelo de Exoesqueleto para Membros Superiores acionado por Músculos Pneumáticos (Ramos, 2013)	40
FIG. 1.17	Arquitetura de Modelo Híbrido para Exoesqueleto Inferior (Batista, 2013)	41
FIG. 1.18	Arquitetura de Controle para Exoesqueleto Inferior de 2 GDL (Pedrosa, 2015)	42
FIG. 2.1	Sistema de Atuação Pneumático Genérico (De Negri, 2001)	46
FIG. 2.2	Sistema de Acionamento Pneumático (Silva, 2002)	46
FIG. 2.3	Sistema Pneumático Proposto.....	47
FIG. 2.4	Simbologia para Válvulas com Acionamento por Solenoide de uma Bobina (adaptado de Fialho, 2004).....	49
FIG. 2.5	Simbologia para Válvulas de Retorno por mola (adaptado de Fialho, 2004)	49
FIG. 2.6	Representação de uma Válvula 3 vias e 3 posições (adaptado de Fialho, 2004)	50
FIG. 2.7	Esquemas de um Dispositivo Relé (Fialho, 2004)	51
FIG. 2.8	Músculos Pneumáticos (catálogo FESTO, 2017)	52

FIG. 2.9	Comportamento como Mola de um PAM (catálogo FESTO, 2017)	53
FIG. 3.1	Representação de um Sistema Automático (De Negri, 2001)	54
FIG. 3.2	Diagrama para Sistema de Controle em Malha Fechada (Bavaresco, 2007)	55
FIG. 3.3	Diagrama de um Sistema de Controle em Malha Aberta (Bavaresco, 2007)	55
FIG. 3.4	Esquema do Controle Nebuloso	56
FIG. 3.5	Esquema do Controle com Modelo de Músculo Real	56
FIG. 3.6	Representação dos Conjuntos para Altura de uma Pessoa pela: (a) Lógica Clássica, (b) Lógica Nebulosa (Marro et. al., 2010).....	57
FIG. 3.7	Função de Pertinência Trapezoidal	59
FIG. 3.8	Exemplo para Funções de Pertinência Trapezoidais.....	60
FIG. 3.9	Função de Pertinência Triangular.....	61
FIG. 3.10	Exemplo para Funções de Pertinência Triangulares	61
FIG. 3.11	Função de Pertinência Gaussiana.....	62
FIG. 3.12	Sistema de Inferência Nebuloso TSK (adaptado de Jang et. al., 1997)	64
FIG. 3.13	Funções de Pertinência para Espessura, para Exemplo	65
FIG. 3.14	Funções de Pertinência para Altura, para Exemplo.....	66

FIG. 3.15	Modelo TSK Aplicado a um Exemplo	66
FIG. 3.16	Estrutura Básica de um Controlador Nebuloso (Netto, 2005).....	69
FIG. 3.17	Modelo de Três Elementos de Hill (Ramos, 2013)	70
FIG. 4.1	Válvula Eletropneumática 3/2 vias (catálogo Metal Work, 2017).....	73
FIG. 4.2	Esquema Representativo de Válvulas on-off 3/2 Acionadas por Solenoide e com Retorno por Mola (catálogo Metal Work, 2017)	74
FIG. 4.3	Gráfico de Vazão da Válvula on-off 3/2 (catálogo Metal Work, 2017)	75
FIG. 4.4	Músculo Pneumático, modelo MAS-20-200 (catálogo FESTO, 2017) ...	76
FIG. 4.5	Faixa de Operação do Músculo Pneumático MAS-20-200 (adaptado de catálogo FESTO, 2017).....	76
FIG. 4.6	Fluxograma de Implementação do Sistema	79
FIG. 4.7	Funções de Pertinência para Massa	81
FIG. 4.8	Funções de Pertinência para Pressão.....	81
FIG. 4.9	Gráficos Pressão do PAM x Tempo.....	82
FIG. 4.10	Superfícies das Saídas (Tempo) do Controlador Nebuloso.....	84
FIG. 4.11	Gráficos das Saídas (Tempo) do Controlador Nebuloso para Pressão de 6 bar	85
FIG. 4.12	Gráfico do Sinal Eletromiográfico Representativo	86

FIG. 4.13	Deslocamento Angular Representativo	87
FIG. 4.14	Gráfico da Força Muscular	88
FIG. 4.15	Micro controlador Arduino UNO (logicamecatronica.com)	89
FIG. 4.16	Sensor de Pressão Manométrica MPX5700 (labdegaragem.com)	89
FIG. 4.17	Potenciômetro Deslizantes 10 K Ω (usinainfo.com).....	90
FIG. 4.18	Bancada de Testes.....	90
FIG. 5.1	Gráfico Deslocamento do PAM x Tempo, com Carga de 5 kg e TR de 3 segundos, com atraso experimental.....	92
FIG. 5.2	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 3 seg, Carga = 5 kg	93
FIG. 5.3	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 3 seg, Carga = 10 kg	94
FIG. 5.4	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 3 seg, Carga = 15 kg	94
FIG. 5.5	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 4 seg, Carga = 5 kg	95
FIG. 5.6	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 4 seg, Carga = 10 kg	96
FIG. 5.7	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 4 seg, Carga = 15 kg	96

FIG. 5.8	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 5 seg, Carga = 5 kg	97
FIG. 5.9	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 5 seg, Carga = 10 kg	97
FIG. 5.10	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 5 seg, Carga = 15kg	98
FIG. 5.11	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle com MMR, Carga = 5 kg.....	99
FIG. 5.12	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle com MMR, Carga = 10 kg.....	100
FIG. 5.13	Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle com MMR, Carga = 15 kg.....	100

LISTA DE TABELAS

TAB. 3.1 Sistema de Inferência Nebuloso.....	63
TAB. 3.2 Exemplo de Sistema de Inferência TSK	65
TAB. 4.1 Sistema de Inferência para Inflar o PAM	83
TAB. 4.2 Sistema de Inferência para Descarregar o PAM	83
TAB. 4.3 Coeficientes da Estimativa MQR para inflar o PAM.....	84
TAB. 4.4 Coeficientes da Estimativa MQR para Descarregar o PAM.....	84
TAB. 4.5 Parâmetros para o Modelo de Hill	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ms	- Milissegundo
A	- matriz de projeto
a(t)	- função de ativação neural
A _R	- área do orifício de saída
B	- constante de amortecimento do atuador
b _v	- razão de pressões crítica
CE	- elemento de contração ativo
C _v	- coeficiente de descarga
F	- força exercida pelo atuador
F _{(PE, CE, SE)max}	- força máxima que o elemento suporta
F _{ce}	- força de contração do PAM
F _{ext}	- força externa aplicada na extremidade livre do PAM
f _l (t)	- relação força comprimento do músculo
F _M	- <i>força muscular (do músculo real)</i>
f _n	- função conhecida da entrada u
F _{PE, CE, SE}	- força do elemento
f _v (t)	- relação força velocidade do músculo
k	- constante elástica do atuador
K ohms	- quilo ohms, unidade de medida para resistência
Kpa	- quilo Pascal, unidade de medida para pressão
L _{CEo}	- comprimento de fibra ótimo
L _{max}	- contração máxima
L _{PE, CE, SE}	- deslocamento do elemento
M	- massa imposta ao sistema
\dot{m}	- vazão volumétrica
P	- pressão no atuador em bar
P ₁	- pressão na entrada da válvula

P_2	- pressão na saída da válvula
PE	- elemento passivo em paralelo
R	- constante universal dos gases
SE	- elemento passivo em série
$S_{PE, CE, SE}$	- parâmetro relacionado com a rigidez muscular do elemento
u	- entrada do modelo linear
u(t)	- sinal EMG amplificado
V_{CE}	- velocidade de contração
V_{CEmax}	- velocidade de contração máxima
V_{CEo}	- velocidade de contração ótima dependente do nível de ativação neural
w	- Valor de ativação da regra fuzzy
X	- deslocamento do atuador
X	- deslocamento do atuador
y	- saída de um modelo linear

SÍMBOLOS

L_{pulsos}	- comprimento dos pulsos
$\Delta L_{SE, PE, CE}$	- contração atual do elemento
φ_m e φ_v	- parâmetros da modelagem gaussiana da relação entre força e velocidade
μ	- grau de pertinência de um elemento nebuloso
$\mu(x)$	- função de pertinência
$\mu_{gauss}(x)$	- função de pertinência gaussiana
$\mu_{trap}(x)$	- função de pertinência trapezoidal
$\mu_{tri}(x)$	- função de pertinência triangular
$T_{controlador}$	- Tempo obtido pelo controlador nebuloso
θ	- vetor de parâmetros a serem estimados
θ_n	- parâmetro n a ser estimado
$T_{referência}$	- Tempo de referência para executar o movimento

LISTA DE SIGLAS

AVE	Acidente Vascular Encefálico
BLEEX	Berkeley Lower Extremity Exoskeleton
BMI	Brain Machine Interface
EMG	Eletromiografia
MQR	Estimativa de Mínimos Quadrados Recursiva
eLEGS	Exoskeleton Lower Extremity Gait System
GDL	Grau de Liberdade
HAL	Hybrid Assistive Limb
IME	Instituto Militar de Engenharia
LPM	Laboratório de Projetos Mecânicos
MMR	Modelo de Músculo Real
TSK	Modelo de Takagi, Sugeno e Kang
PAM	Músculo Artificial Pneumático
PRRT	Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo
PID	Proporcional Integrador Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
TR	Tempo de Referência

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade a realização de um estudo geral sobre o comportamento do músculo pneumático acionado por válvulas eletropneumáticas *on-off* 3/2 vias (3 vias e 2 posições) quando imposto a diferentes valores de carga.

Foram desenvolvidos, implementados e testados dois modelos de controladores que utilizam pulsos emitidos pelas válvulas que bloqueiam o fluxo de ar comprimido, com o objetivo de avaliar a pressão e deslocamento do músculo pneumático (PAM) ao ser inflado e descarregado com três valores diferentes de carga, 5, 10 e 15 kg. A implementação foi realizada por meio de simulações feitas no software MATLAB®, e foram realizados testes em bancada no Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) do IME, para comparação dos resultados.

O primeiro modelo é baseado em Lógica Nebulosa, onde é calculado o tempo necessário para inflar e descarregar o PAM dada a pressão de trabalho e a carga imposta ao sistema. Em seguida é calculado o comprimento dos pulsos a serem emitidos. O segundo modelo utiliza o Modelo Muscular de Hill para calcular a força exercida pelo músculo fisiológico humano durante o movimento. Assim, o PAM é acionado quando a força muscular é maior que 30 N e se mantém em uma posição fixa quando for menor que este valor.

Os experimentos mostraram um tempo de resposta do sistema bastante elevado causando pequenos atrasos nos resultados experimentais quando comparados aos da simulação. Para isso o tempo de resposta do sistema foi incorporado na simulação o que resultou em uma melhor aproximação dos resultados.

Ambos os modelos de controle apresentaram resultados satisfatórios, com execução dos movimentos do atuador conforme pretendido em cada um. Assim, o projeto mostra-se viável e de fácil implementação. Contudo é aconselhável a utilização de equipamentos com menor tempo de resposta.

ABSTRACT

This work has the purpose of conducting a general study on the behavior of the muscle pneumatic-driven valves eletropneumatics *on-off*, 3/2 way (3-way and 2-position) when imposed at different values of load.

Have been developed, implemented and tested two models of controllers that use pulse issued by the valves that block the flow of compressed air, with the aim of evaluating the pressure and displacement of the muscle pneumatic (PAM) to be inflated and unloaded with three different values of load, 5, 10 and 15 kg. The implementation was carried out by means of simulations made in the MATLAB® software, and tests were conducted on the bench top in the Laboratory of Mechanical Projects (LPM) IME, for the comparison of the results.

The first model is based on the Logic of the Nebula, where it is calculated the time required to inflate and unload the PAM given the working pressure and the load imposed on the system. Then is calculated the length of the pulses to be issued. The second model uses the Model of Muscle Hill to calculate the force exerted by the muscle physiological human during the movement. Thus, the PAM is fired when the muscle strength is greater than 30 N and remains in a fixed position when it is less than this value.

Both models of control have generated satisfactory results, with execution of the movements of the actuator as desired in each. Thus, the project shows to be feasible and easy to implement, however it is advisable to use equipment with the lowest response time.

1 INTRODUÇÃO

É crescente o interesse em desenvolver estudos e pesquisas sobre dispositivos robóticos capazes de desempenhar a função de um ou mais membros do corpo humano de forma parcial ou total.

Estes dispositivos, também chamados de exoesqueletos, possuem aplicações em diversas áreas tais como militar e industrial, onde podem ser utilizados para elevar a eficiência e força de soldados ou operadores, por exemplo, que podem executar esforços excessivos, repetitivos ou de longa duração. Na área médica, para a reabilitação de pacientes que possuem dificuldades ou ausência de movimento em algum membro. No setor nuclear, onde existe a necessidade de intervenção mecânica para a manipulação de determinados objetos devido à contaminação radiológica. E até mesmo utilizados para o entretenimento, como acessórios para jogos virtuais.

Um dispositivo robótico pode ser também visto como um sistema de controle e automação projetado com diferentes finalidades.

De Negri (2004) aponta a definição de sistema, apresentada por Hubka e Heder (1988), como a mais apropriada no contexto da área tecnológica, a qual estabelece que sistema é um conjunto finito de elementos agrupados como um todo sob regras bem definidas que regem as relações existentes entre os elementos e para com seu ambiente.

Sistema de controle é definido como um conjunto de componentes interconectados que possuem como função principal a realização de ações monitoradas ao longo do tempo, sendo estas ações decorrentes da aplicação de sinais de entrada. Define-se Sistema de Automação quando essas ações são realizadas de acordo com uma lógica pré-determinada e em resposta à ocorrência de eventos (DE NEGRI, 2001).

Assim, um sistema de controle e automação é composto por elementos mecânicos ou eletrônicos utilizados para substituir o trabalho humano, de forma parcial ou total, com a função de realizar uma ou mais ações a partir de sinais de entrada enviados, seguindo regras lógicas previamente definidas de acordo com sua finalidade e a ocorrência de eventos.

Sistemas hidráulicos e pneumáticos são amplamente utilizados, principalmente em indústrias, por serem de baixo custo, terem um peso reduzido e serem de fácil implantação, além de apresentarem uma boa relação entre a força aplicada e seu peso. Essas características tornam esses tipos de sistemas bastante atraentes para aplicações em diferentes áreas, algumas destas são mostradas na FIG. 1.1.

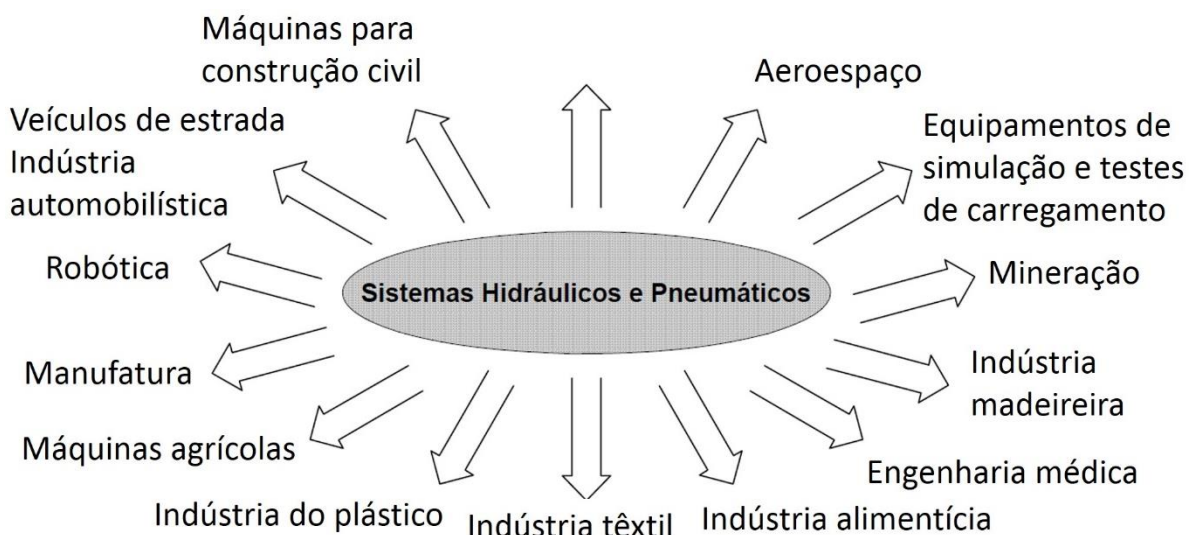


FIG. 1.1 Campos de Aplicação da Hidráulica e Pneumática (De Negri, 2001)

Sistemas pneumáticos utilizam-se de ar ou gases neutros para acionamento de algum dispositivo. Em geral esses sistemas são comandados por válvulas eletropneumáticas, possibilitando uma interface com sinais elétricos emitidos por botões, micro controladores, chaves, entre outros.

Esses sinais são emitidos a partir da ocorrência de eventos ou de acordo com regras lógicas pré-determinadas. Geralmente essas regras ou eventos representam estados lógicos binários, no entanto, nem sempre eles são bem definidos. Nesses casos, uma alternativa é a utilização da Lógica Fuzzy (ou Lógica Nebulosa) que é capaz de representar sistemas com características vagas ou incertas a partir de regras que incorporam o conhecimento humano.

O termo “*fuzzy*” é originado da língua inglesa e pode ter vários significados de acordo com o contexto desejado. Portanto, como sua tradução para o português não é precisamente definida, os termos mais comumente utilizados são “nebuloso” e “difuso”. A Lógica Nebulosa reflete a maneira de pensar das pessoas, tentando modelar a tomada de decisões ou senso comum. Ela busca o desenvolvimento de sistemas inteligentes mais humanos e adequados à realidade (MARRO ET.AL., 2010).

Em diversos estudos encontrados na literatura são apresentados modelos de próteses biomecânicas, ou exoesqueletos, acionadas por músculos pneumáticos.

O músculo pneumático (PAM) é um dispositivo elástico acionado por variação de pressão, e foi escolhido como atuador por representar de forma eficiente a ação de um músculo humano.

Grande parte dos atuadores pneumáticos é formada por cilindros ocos com êmbolos em seu interior que se deslocam com a variação da pressão interna. O PAM se difere desses atuadores pela sua estrutura, que funciona como um sistema de membrana. Assim, quando sob pressão todo o tubo se contrai. Este tipo de atuador, quando distendido, é capaz de desenvolver até dez vezes mais força do que um cilindro pneumático tradicional (FESTO, 2016).

Independente da tecnologia escolhida para compor o sistema, o objetivo é sempre fazer com que seus componentes realizem ações mecânicas por meio do controle de alguma variável, como por exemplo, força, torque, velocidade e posição, entre outros.

O presente trabalho realiza um estudo geral do comportamento de um músculo pneumático acionado por válvulas eletropneumáticas *on-off* 3/2 vias (3 vias e 2 posições), quando submetido a diferentes cargas. É analisado o comportamento do atuador observando-se a pressão em seu interior e seu deslocamento linear ao longo do tempo, ou seja, a contração do PAM quando inflado ou descarregado.

Morgado Junior (2011) realiza um estudo que tem como objetivo modelar e controlar o músculo pneumático, apresentando diversas comparações entre diferentes tipos de modelagem e controles baseados em Lógica Nebulosa. Basicamente o autor apresenta a modelagem geométrica e física do atuador, utilizando o controle baseado em modelo de PAM e outro baseado em Lógica Nebulosa. Em ambos, deseja-se controlar o atuador de forma a calcular a pressão necessária para se obter um deslocamento pretendido com diferentes cargas a serem manipuladas.

O autor realiza a implementação do sistema no software MATLAB® e testes em bancada, a fim de comparar os resultados obtidos. Na bancada de testes o músculo pneumático é fixado em uma de suas extremidades na posição horizontal e na outra é fixada uma célula de carga de forma a ser erguida quando inflado o atuador. Para isso é utilizada uma válvula solenoide 3/2 vias (3 vias e 2 posições) controlada por um micro controlador Arduino UNO.

No presente trabalho é utilizada uma abordagem semelhante à de Morgado Junior (2011), onde a modelagem do PAM escolhida foi a modelagem física com as simplificações propostas pelo autor, que retiram a inércia do sistema, além da bancada de testes ser montada de forma semelhante com uma plataforma de carga acoplada à extremidade livre do atuador.

No entanto, vale ressaltar as principais diferenças entre os dois estudos. No trabalho de Morgado Junior (2011) a pressão no interior do atuador é obtida pelo controlador, aqui é utilizada a modelagem da válvula solenoide que obtém a pressão na saída da válvula a partir de sua vazão mássica e da pressão de entrada. Como a tubulação que liga a válvula ao PAM é consideravelmente pequena e sem ramificações pode-se considerar a pressão na saída da válvula igual à pressão no interior do PAM.

Neste trabalho o sistema é comandado por duas válvulas eletropneumáticas dispostas em série que permitem a entrada, saída e a interrupção do fluxo de ar comprimido em ambos os sentidos, aprisionando o ar no interior do PAM. Assim o atuador pode ser inflado, descarregado e mantido em uma posição fixa, respectivamente. Isso permite o controle do comportamento do atuador emitindo pulsos de ar comprimido através das válvulas.

São desenvolvidos, implementados e testados dois modelos de controladores: o primeiro utiliza um controlador baseado em Lógica Nebulosa, que tem como saída o tempo necessário para que o atuador seja inflado ou descarregado com a pressão máxima de trabalho (6 bar), dada a carga a ser sustentada. Com isso é possível calcular o comprimento dos pulsos a serem emitidos pelas válvulas para que o PAM se contraia e distenda com o tempo desejado, chamado tempo de referência (TR).

O segundo sistema de controle utiliza um modelo de músculo real (MMR), o Modelo Muscular de Hill, que calcula a força exercida pelo músculo fisiológico durante o movimento. Quando a força do músculo real atinge um valor predeterminado (estabelecido em 30N), o músculo pneumático é acionado emitindo pulsos de ar comprimido até que a força do músculo real seja novamente menor que esse valor.

Após o desenvolvimento dos controladores são feitas suas implementações por meio de uma simulação usando o software MATLAB® e como última etapa sua experimentação com testes em bancada montada no Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) do IME.

O músculo pneumático utilizado é do modelo MAS-20-200 fabricado pela FESTO®, e as válvulas utilizadas em seu acionamento são válvulas eletropneumáticas servo assistidas acionadas por solenoides *on-off* 3/2 vias (3 vias e 2 posições) do modelo SOV 23 SOS NC, série 70, fabricadas pela Metal Work®, devido sua disponibilidade no LPM.

Uma possível aplicação deste controlador é utilizá-lo, por exemplo, em uma prótese biomecânica projetada para um exoesqueleto para membros superiores ou até mesmo para membros inferiores, diminuindo a força muscular dispendida pelo usuário durante o movimento.

1.1 O PROBLEMA

O corpo humano é capaz de realizar todo tipo de movimento com diferentes velocidades e forças, no entanto, dificilmente se conseguiria repetir um movimento exatamente como foi executado anteriormente, como no caso de movimentos repetitivos ou de longa duração em que a fadiga do músculo faz com que o movimento seja executado com velocidade cada vez menor ou com menor amplitude.

Robôs ou exoesqueletos, no entanto não têm esse problema, são capazes de reproduzir movimentos exatamente iguais pelo período de tempo que for necessário, independente do peso ao qual é submetido. Por isso o interesse em desenvolver controladores capazes de prescrever as posições, velocidades e as forças que são dispendidas no movimento.

Existem diversos estudos sobre controladores de músculos pneumáticos com acionamento por meio de válvulas proporcionais. No entanto, muitos autores, como por exemplo, Souza (2014), relatam ter problemas com a implementação destas devido a necessidade de um alinhamento preciso das válvulas com os servo-motores utilizados em seu acionamento.

Por este motivo, o presente trabalho propõe a utilização de válvulas eletropneumáticas *on-off* 3/2 vias no acionamento do músculo pneumático. Essas válvulas são de mais fácil implementação, possuem menor custo e são mais leves, quando comparadas às válvulas proporcionais.

Contudo, este tipo de válvula permite apenas a passagem ou não de ar comprimido, não sendo possível regular a vazão. Dessa forma o atuador é inflado e descarregado muito rapidamente, acontecendo em uma fração de segundo, cerca de 0,5 segundo dependendo da pressão de entrada. Uma movimentação tão rápida e brusca assim não é viável para aplicação em um exoesqueleto, principalmente em termos de segurança e comodidade para o usuário.

Por este motivo é desejável que o movimento do PAM seja mais lento. Para isso são emitidos pulsos de ar comprimido pelas válvulas, intercalados por outros pulsos onde o fluxo de ar é interrompido fazendo com que o ar já existente no interior do atuador fique aprisionado, não permitindo nenhuma movimentação, ou seja, o atuador permanece em uma posição fixa. Emitindo vários pulsos intermitentes é possível fazer com que o atuador seja inflado e descarregado mais lentamente. Quanto mais pulsos emitidos e menor o comprimento destes, mais suave se torna o movimento.

Neste trabalho são desenvolvidos dois modelos de controle: o Controle com Lógica Nebulosa e o Controle com Modelo de Músculo Real.

No primeiro modelo deseja-se fazer com que o atuador realize o movimento em um tempo pré-determinado, tratado aqui como tempo de referência (TR). Para isso é feito o cálculo do comprimento dos pulsos a serem emitidos, dada a quantidade de pulsos desejada e o tempo necessário para inflar e descarregar o PAM com determinada carga, sendo este tempo fornecido por um controlador nebuloso.

O comprimento dos pulsos calculado é dado em função do tempo em que o PAM é inflado ou descarregado até a emissão de um outro pulso em que o fluxo de ar comprimido é interrompido, mantendo uma posição fixa do atuador.

No segundo modelo deseja-se que o PAM complemente a força muscular exercida pelo usuário durante a manipulação de uma carga qualquer. Assim, o atuador é acionado, emitindo pulsos de ar comprimido, sempre que a força muscular ultrapassar um valor máximo, pré-estabelecido em 30 N. Quando a força muscular é menor que este valor, o atuador se mantém em uma posição fixa.

Para calcular a força muscular exercida pelo usuário tem como entradas o sinal eletromiográfico e a posição angular do membro analisado. Assim, o atuador é acionado quando a força muscular exceder 30 N de forma que ele é inflado quando o deslocamento angular estiver aumentando, e descarregado quando estiver diminuindo.

1.2 REVISÃO BIBLOGRÁFICA

Neste tópico, são apresentados alguns temas que apresentam a aplicação de atuadores pneumáticos com diferentes tipos de controladores, em alguns casos sendo empregados em projetos de exoesqueletos.

1.2.1 PNEUMÁTICA

Pneumática é a tecnologia associada com a produção, controle e transmissão de potência empregando fluidos pressurizados. Ela vem ampliando cada vez mais sua presença na indústria devido à capacidade de realizar ações rápidas e de forma segura, principalmente quando se trata de servir como atuação mecânica em equipamentos com ciclos operacionais complexos (DE NEGRI, 2001).

Na literatura encontram-se modelos para diferentes componentes de um sistema pneumático que representam a realidade de forma satisfatória, apesar de sua não linearidade dificultar seu desenvolvimento e controle. Em geral, esses sistemas são comandados por válvulas de diversos tipos, como válvulas proporcionais, direcionais, de bloqueio, reguladoras de fluxo, entre outras, sempre visando o acionamento e controle de algum dispositivo como cilindros e músculos pneumáticos, por exemplo.

Lucas (2003) montou em laboratório um protótipo de uma garra robótica acionada por um músculo pneumático construído por ele FIG. 1.2.

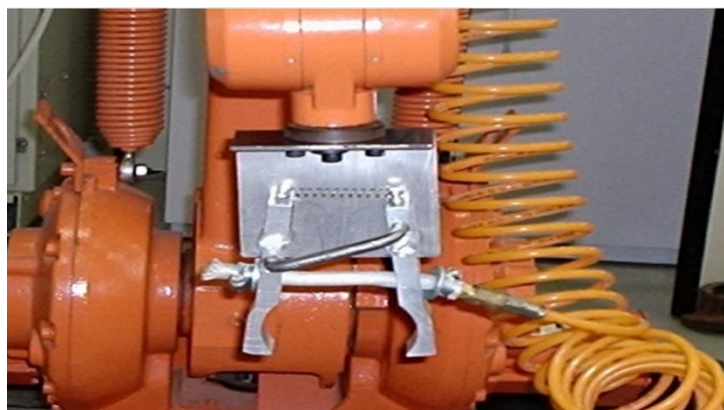


FIG. 1.2 Garra Pneumática (Lucas, 2003)

Para levantar as propriedades do atuador construído o autor utiliza a modelagem física e estática do músculo McKibben, e o modelo teórico considerando a geometria da camisa, uma síntese do modelo proposto por Klute e Hannaford (2000), que usa a conservação de energia e assume que o atuador mantém a razão entre as derivadas da velocidade e da pressão igual a zero. Testes em laboratório são realizados obtendo o comportamento de força versus deformação do músculo pneumático, onde os resultados obtidos se mostram compatíveis com a literatura.

Szepe (2005) desenvolve um modelo que descreve a correlação entre força, pressão e contração de um músculo pneumático usando uma função de transferência exponencial com o mínimo de parâmetros possíveis. Também são utilizadas equações de restrição para que se possa representar de forma mais realista a faixa de operação permitida. Os parâmetros desse modelo podem ser estimados para qualquer modelo de PAM utilizado, dadas suas características e faixas de operação.

Bavaresco (2007) realiza uma pesquisa de diferentes tipos de modelagem para atuadores pneumáticos, onde cita os modelos de 3ª ordem de Virvalo (1995), o de 4ª ordem por Bobrow (1998), o de 5ª ordem de Karpenko e Sepehri (2004) e o de 5ª ordem de Perondi (2002). Contudo, o autor propõe um modelo matemático para atuadores pneumáticos adaptado de um modelo não linear de 3ª ordem, inicialmente desenvolvido para representar o comportamento dinâmico de atuadores hidráulicos. Essa adaptação é proposta com a finalidade de facilitar o entendimento e a implementação da estratégia de controle adotada.

Bissochi e Passos (2008) apresentam um modelo matemático para músculos pneumáticos considerando sua geometria, de forma a relacionar a força, o comprimento e a pressão do atuador. Para desenvolvimento do modelo o autor baseou-se na dissertação de mestrado de Colbrunn (2000), que por sua vez se guiou pelo trabalho de Klute e Hannaford (1999). São comparadas as relações entre a força e as dimensões de vários tipos de músculos, entre elas a comparação entre músculos pneumáticos e humanos. Com isso o autor conclui que a variação da força com o comprimento do músculo pneumático é próxima à do músculo humano, evidenciando a possibilidade de aplicação desse tipo de atuador em construções de robôs humanoides ou em próteses de membros.

Jouppila et. al. (2010) desenvolve um modelo analítico de um sistema pneumático capaz de incluir sua não-linearidade e transformar as descontinuidades em formas

contínuas. São desenvolvidos um modelo analítico e não-analítico de uma válvula solenoide 3/2 vias (3 vias e 2 posições) validados pela comparação dos resultados da simulação com a implementação experimental do sistema.

Ritter (2010) faz a modelagem matemática das principais características não lineares de atuadores pneumáticos. A autora desenvolve um modelo não linear de 5ª ordem, reescrito em forma de variáveis de estado, com a finalidade de determinar quais características físicas dos atuadores contribuem para um melhor comportamento dinâmico do sistema. Para isso é feito um estudo comparativo da influência do tamanho do cilindro no comportamento dinâmico do modelo não linear, onde foi observado que o diâmetro possui grande influência no comportamento do sistema.

Morgado Junior (2011) realiza testes em bancada onde o PAM é fixado em uma de suas extremidades e na outra é fixada uma plataforma onde são colocadas diferentes cargas. Com uma pressão constante o PAM é inflado, acionado por uma válvula solenoide *on-off* 3/2 vias. O autor realiza a implementação de dois modelos de músculo pneumático: a modelagem geométrica com um modelo analítico simplificado proposto por Chou e Hannaford (1994), e a modelagem física proposta por Fung (1993) e citada por Serres (2008) sem os elementos elásticos em série, consistindo apenas em um modelo mola amortecedor em paralelo.

Locateli (2011) realiza um estudo teórico-experimental e a modelagem de um sistema servopneumático de controle de posição com acionamento de um cilindro simétrico de dupla ação por meio de uma válvula direcional *on-off* 3/2 vias de rápida comutação. O autor tem como objetivo estudar o comportamento desse tipo de sistema, aprimorar a modelagem matemática e produzir soluções no âmbito de controle visando à aplicação para um sistema de regulação de velocidade para pequenas centrais hidroelétricas. A modelagem matemática consiste em equacionar os principais componentes como a válvula direcional *on/off*, a válvula reguladora de vazão, a tubulação que une as duas válvulas e o atuador pneumático.

O sistema é composto por duas válvulas direcionais de rápida comutação *on-off* 3/2 vias (1V1 e 1V2), um cilindro simétrico de dupla ação (1A1), um transdutor de posição (1S3), uma fonte de ar comprimido (1Z1), um reservatório de ar comprimido (1Z3), uma válvula reguladora de pressão (1Z2), filtro (1Z4), dois transdutores de pressão (1S1 e 1S2) e duas válvulas reguladoras de vazão (1V3 e 1V4).

A FIG. 1.3 mostra a configuração básica do sistema.

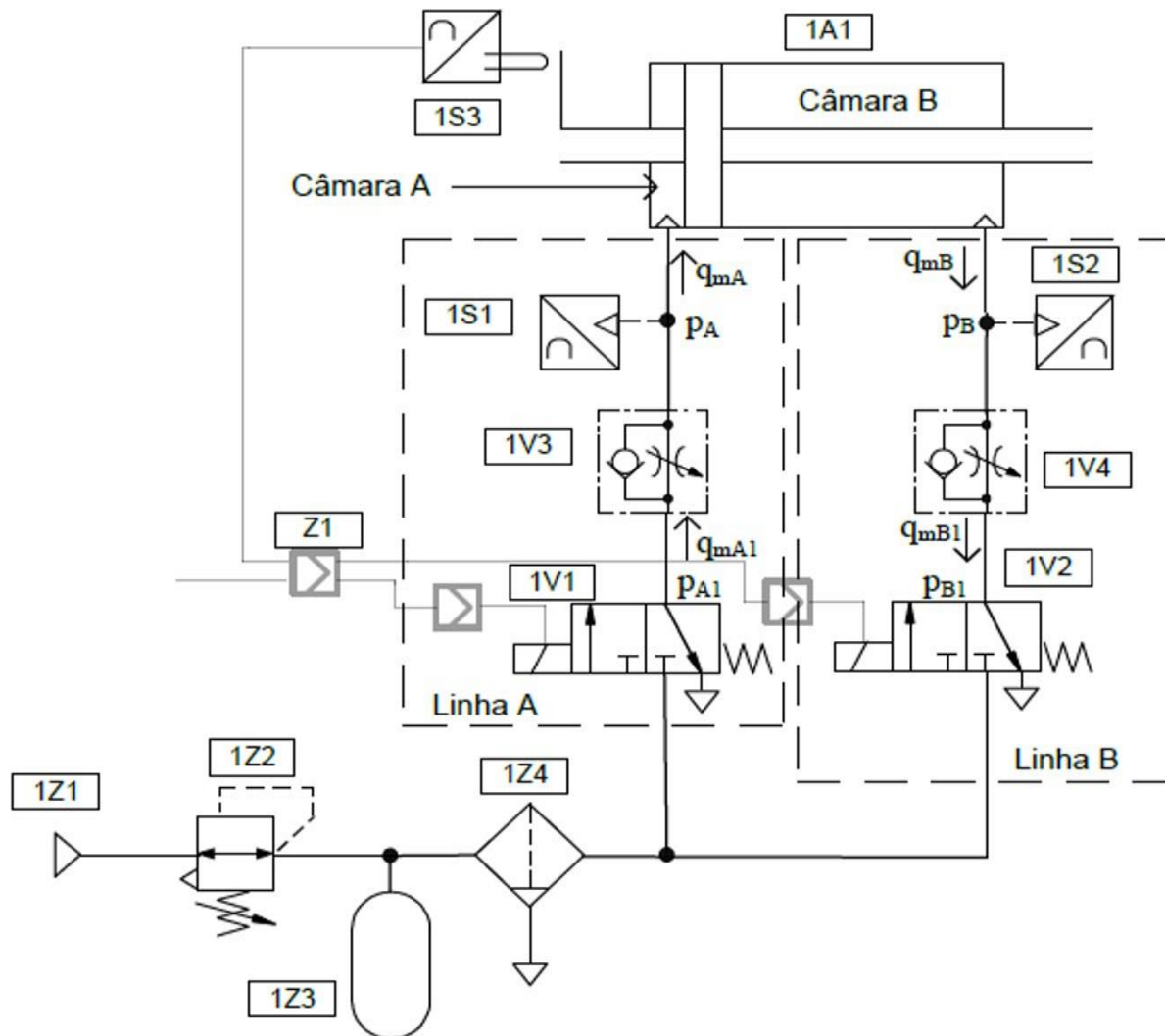


FIG. 1.3 Sistema Servopneumático (Locateli, 2011)

Onde q_{mA} e q_{mB} representam a vazão mássica de cada câmara e as indicam o sentido do fluxo.

1.2.2 EXOESQUELETOS

Neste tópico são apresentados alguns dos principais modelos de exoesqueletos desenvolvidos no mercado e bem como alguns projetos acadêmicos sobre diferentes projetos de exoesqueletos com diversas aplicações.

Exoesqueletos são dispositivos mecânicos utilizados na parte externa do membro humano para auxiliar ou aumentar a eficiência do movimento. Esses dispositivos são geralmente utilizados para reabilitação de pacientes, diminuir esforços exercidos pelos músculos humanos, elevar a eficiência ou força aplicada e até mesmo para substituir a interação humana, como no caso de manipulação de elementos radioativos.

A indústria Berkley Bionics desenvolveu o BLEEX (FIG. 1.4), um exoesqueleto com atuadores hidráulicos e lineares nas articulações dos joelhos, tornozelos e coxas, que tem como objetivo aumentar a capacidade humana para andar em terrenos diversos por mais tempo e com menor esforço físico, inicialmente desenvolvido para uso militar (RAMOS, 2013).



FIG. 1.4 BLEEX (Berkley Robotics, 2017)

Posteriormente, é desenvolvido pela mesma indústria o eLEGS (FIG. 1.5), um dispositivo artificial que utiliza uma interface gestual para permitir que paraplégicos possam andar. É movido por atuadores elétricos e alimentado por baterias que podem durar até 6 horas. Possui um desing de mochila presa por velcros de forma a facilitar que uma pessoa sentada em uma cadeira possa colocar em si mesma. O dispositivo é feito de fibra de carbono e de aço, pesando 45 kg (FAST COMPANY, 2017).



FIG. 1.5 eLEGS (Fast Company, 2017)

Uma conhecida tecnologia para auxílio de movimentos é o dispositivo HAL (FIG. 1.6), desenvolvido pela indústria japonesa Cyberdine. Ele tem o objetivo de auxiliar o usuário em tarefas diárias comuns e suportar pesos de até 70 kg. O equipamento é acionado por motores elétricos conectados às juntas, é abastecido por baterias acopladas a uma mochila e tem autonomia de até 2 horas e 40 min (SANKAI, 2007).

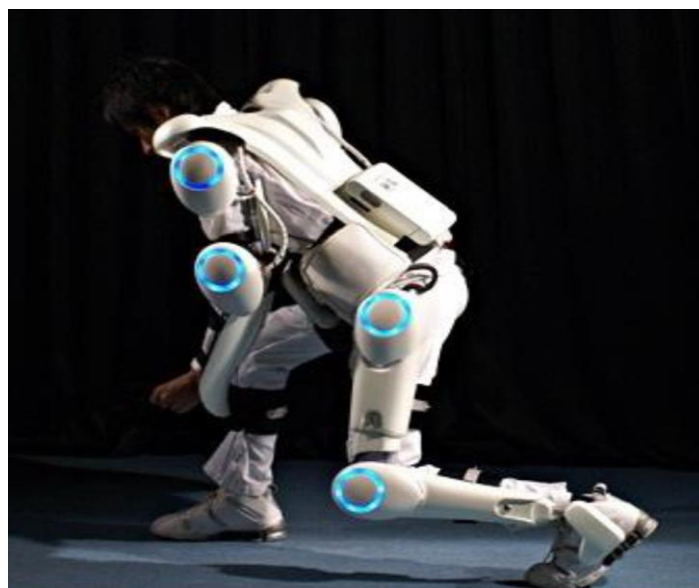


FIG. 1.6 Exoesqueleto HAL (Sankai, 2007)

Em 2012, a FESTO desenvolve a ExoHand (FIG. 1.7), um exoesqueleto que pode ser usado como uma luva, acionado por músculos pneumáticos por meio de válvulas proporcionais. Os movimentos das mãos do operador são registrados e transmitidos para a mão robótica em tempo real. Foi desenvolvida com o objetivo de aumentar a força e resistência da mão humana permitindo executar movimentos com alta precisão (portifólio ExoHand, 2017).

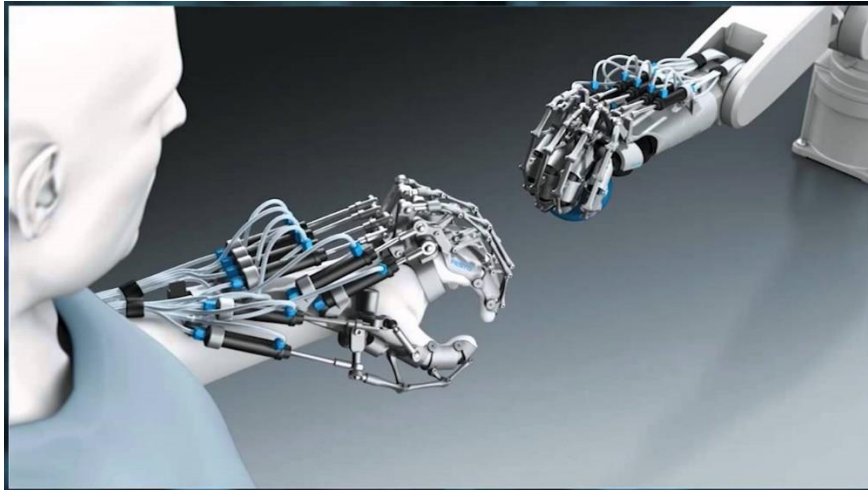


FIG. 1.7 ExoHand (portifólio ExoHand, 2017)

Garcés (2013) desenvolve um exoesqueleto para membros superiores (FIG. 1.8) que tem a finalidade de possibilitar pessoas a carregar pesos de até 10 kg de forma contínua no tempo, realizando movimentos suaves e com velocidade moderada. O equipamento é acionado por cilindros pneumáticos compactos por meio de válvulas direcionais proporcionais 5/3 vias (5 vias e 3 posições).

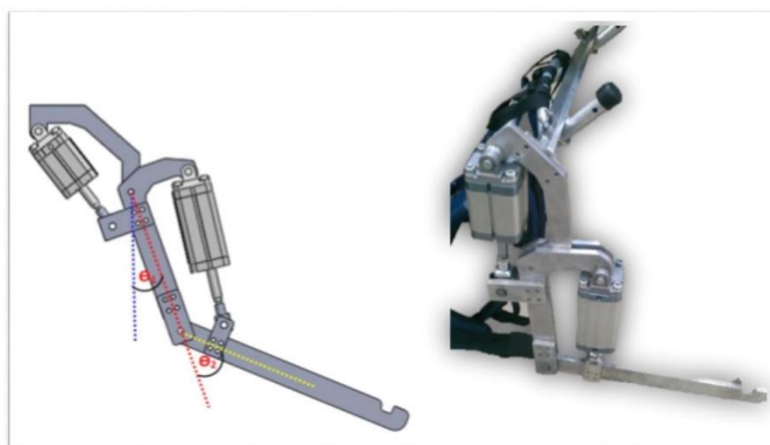


FIG. 1.8 Modelo de Exoesqueleto para Membros Superiores acionado por Cilindros Pneumáticos Compactos (Garcés, 2013)

Gonçalves (2013) faz um estudo para avaliar a adequação técnica e ergonômica de uma Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo (PRRT), com a finalidade de realizar ajustes necessários para que o equipamento possa ser utilizado em pacientes que necessitam de reabilitação de tornozelo decorrentes de um acidente vascular encefálico (AVE). Este equipamento é utilizado apenas para tratamento do paciente realizando movimentos repetitivos necessários para sua reabilitação.

Ponte (2013) desenvolve o projeto de um exoesqueleto para auxiliar a marcha humana, com o objetivo de reduzir os esforços do ser humano. O equipamento é composto por quatro músculos pneumáticos que são acionados em paralelo aos músculos humanos que desenvolvem maior esforço durante a marcha.

O autor analisa os esforços dos membros inferiores durante a marcha utilizando modelos bidimensionais e tridimensionais formulados pelas f da dinâmica clássica de Newton. Em seguida, aplica os resultados obtidos para dimensionar os esforços necessários para acionar os atuadores do exoesqueleto.

Ramos (2013) desenvolve um modelo de exoesqueleto para membros superiores (FIG. 1.9), acionado por músculos pneumáticos através de válvulas *on-off* 3/2 vias (3 vias e 2 posições).

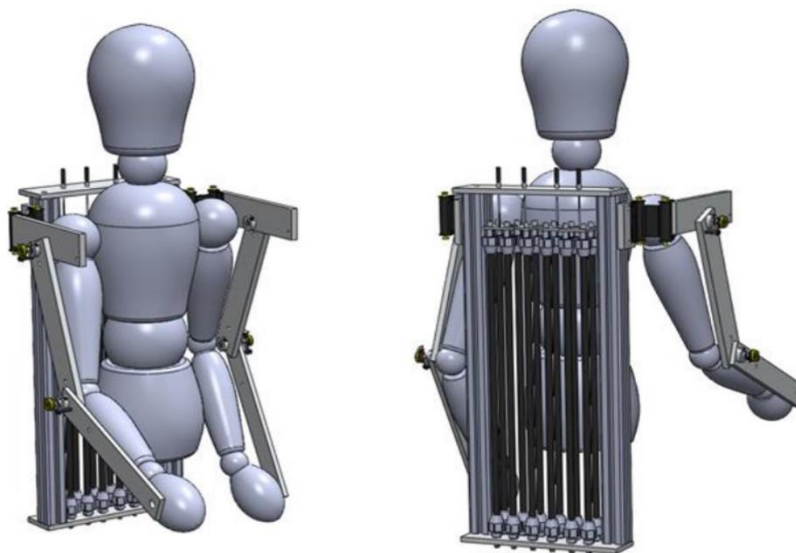


FIG. 1.9 Modelo de Exoesqueleto para Membros Superiores Acionado por PAM (Ramos, 2013)

Souza (2014) realiza um estudo sobre instrumentação e controle de músculos pneumáticos, e desenvolve um modelo genérico proposto para um exoesqueleto destinado para o melhoramento da força humana, conforme ilustrado na FIG. 1.10.

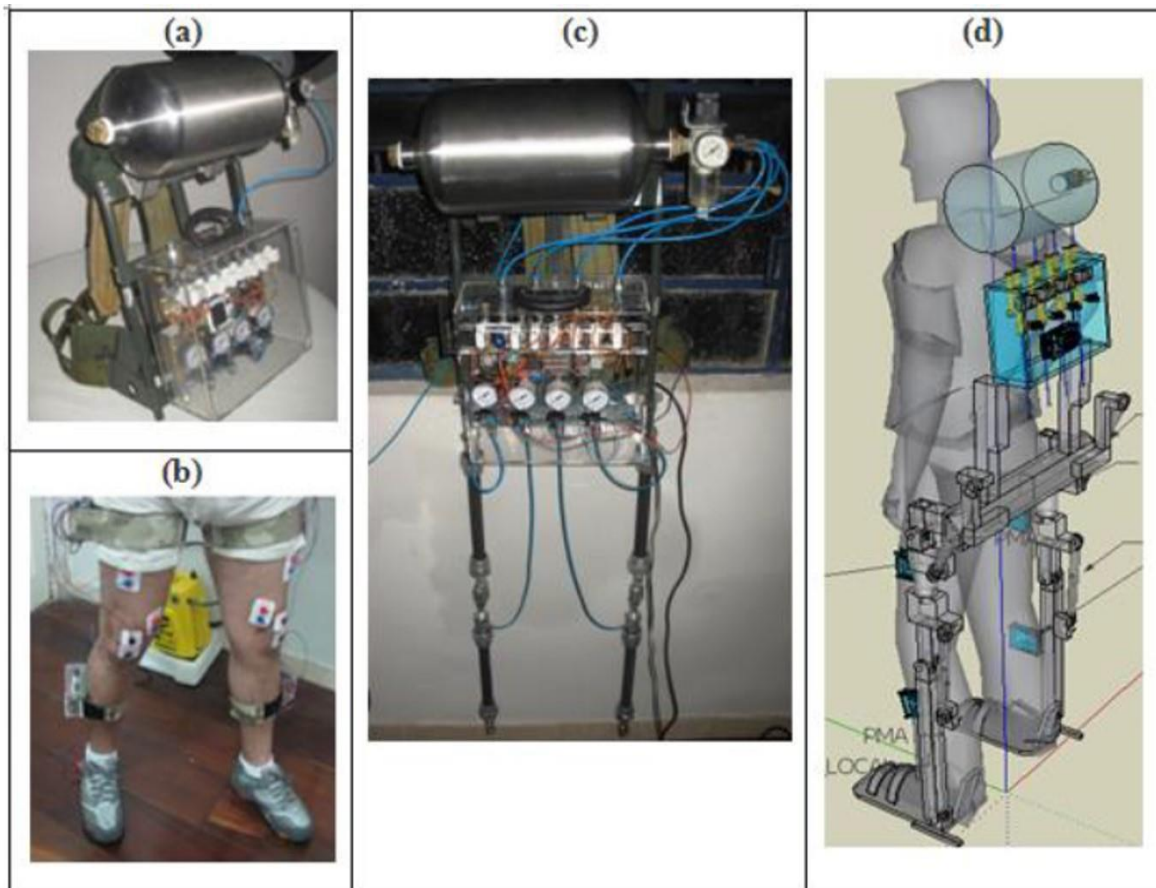


FIG. 1.10 Modelo Genérico para Exoesqueleto de Membros Inferiores (Souza, 2014)

Lopes (2014) desenvolve um músculo pneumático livre de partes metálicas com a finalidade de construir um manipulador inerte a campos elétricos e magnéticos, conforme ilustrado na FIG. 1.11. Para acionamento do atuador desenvolvido são utilizadas válvulas *on-off* 3/2 vias (3 vias e 2 posições).

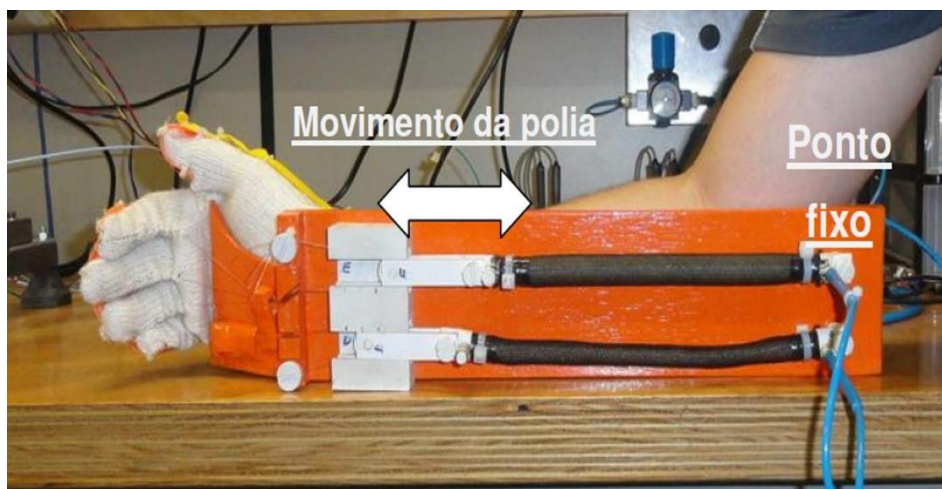


FIG. 1.11 Manipulador não condutor (Lopes, 2014)

Pedrosa (2015) propõe um modelo de exoesqueleto para membros inferiores com dois graus de liberdade (FIG. 1.12) acionado por músculos pneumáticos através de válvulas proporcionais.

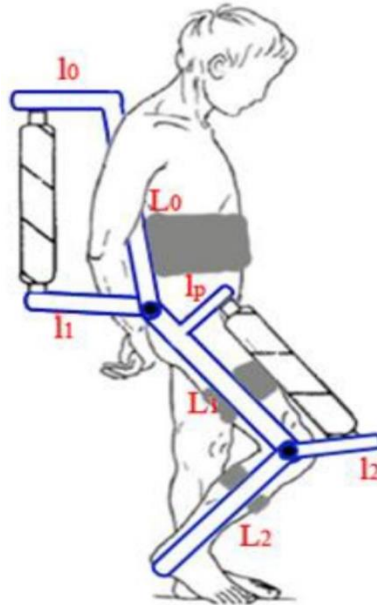


FIG. 1.12 Modelo de Exoesqueleto para Membros Inferiores com dois graus de liberdade (Pedrosa, 2015)

O autor utiliza a dinâmica direta atrelada ao método Newton-Raphson para estimar os parâmetros ótimos para o modelo proposto.

1.2.3 CONTROLE

Neste tópico são apresentados sistemas de controle, alguns dos quais são aplicados em modelos de exoesqueletos já apresentados no tópico anterior.

Valdiero (2005) utiliza a estratégia de controle de cascata em um robô acionado hidráulicamente, permitindo a divisão em dois subsistemas: o subsistema hidráulico e o mecânico. O autor propõe uma metodologia para identificação e compensação da zona morta em válvulas direcionais proporcionais a partir da observação das pressões em seus orifícios. Assim é desenvolvido um modelo não linear de 5ª ordem para o robô incluindo a dinâmica do atrito baseada na microdeformação das rugosidades da superfície de contato.

O autor utiliza a estratégia em cascata como uma resultante de combinação de leis de controle em malha fechada para cada subsistema, onde o objetivo é projetar uma lei de controle tal que o vetor de posições das juntas siga a trajetória desejada. Essa estratégia é desenvolvida a partir da metodologia de redução de ordem com desacoplamento de sistemas proposta por Utkin (1987).

Bavaresco (2007) estuda um sistema mecânico que apresenta uma dinâmica com características não-lineares, o que dificulta a implementação de técnicas de controle linear clássico. Para superar essas dificuldades o autor utiliza a metodologia de controle proposta por Rafikov e Balthazar (2005), onde o objetivo é projetar uma lei de controle que permita ao sistema atuador pneumático seguir o regime de trajetórias de estado desejada, tanto em testes de posicionamento quanto em seguimento de trajetórias. A não-linearidade da zona morta da servo válvula é compensada por meio da inversa de seu modelo parametrizado, evitando prejudicar o desempenho do controlador.

Suzuki (2010) realiza um estudo da aplicação do método de linearização por realimentação. Essa estratégia utiliza as estimativas das não-linearidades do modelo pneumático para linearizar o comportamento do servoposicionador pneumático e permitir o uso tanto de controladores lineares como não-lineares. Para isso essa estratégia é aliada ao método de controle por realimentação de estados e projeto por alocação de pólos. A linearização por realimentação é feita basicamente conforme mostrado na FIG. 1.13.

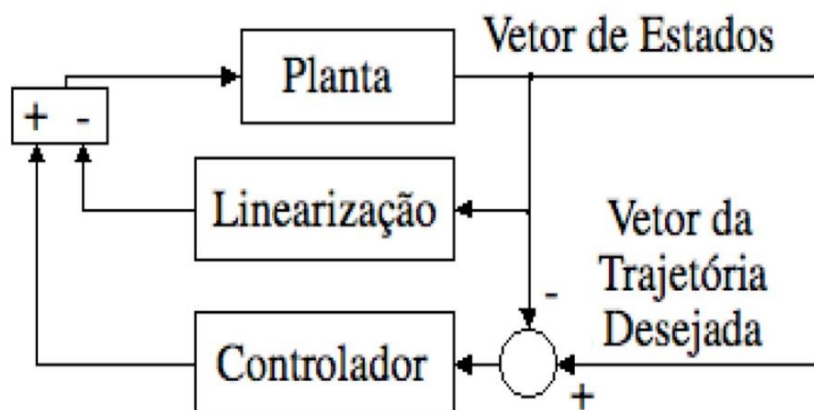


FIG. 1.13 Linearização por Realimentação (Suzuki, 2010)

Barbosa (2010) apresenta o desenvolvimento de uma interface cérebro-máquina (BMI) como um meio alternativo de comunicação para uso na robótica. Essa interface

é utilizada para comandar os movimentos de um manipulador robótico MA2000, associando quatro atividades mentais distintas a quatro movimentos do manipulador. Baseia-se na análise de sinais eletroencefalográficos, de onde são extraídas características que podem ser classificadas como uma atividade mental específica conforme ilustrado na FIG. 1.14.

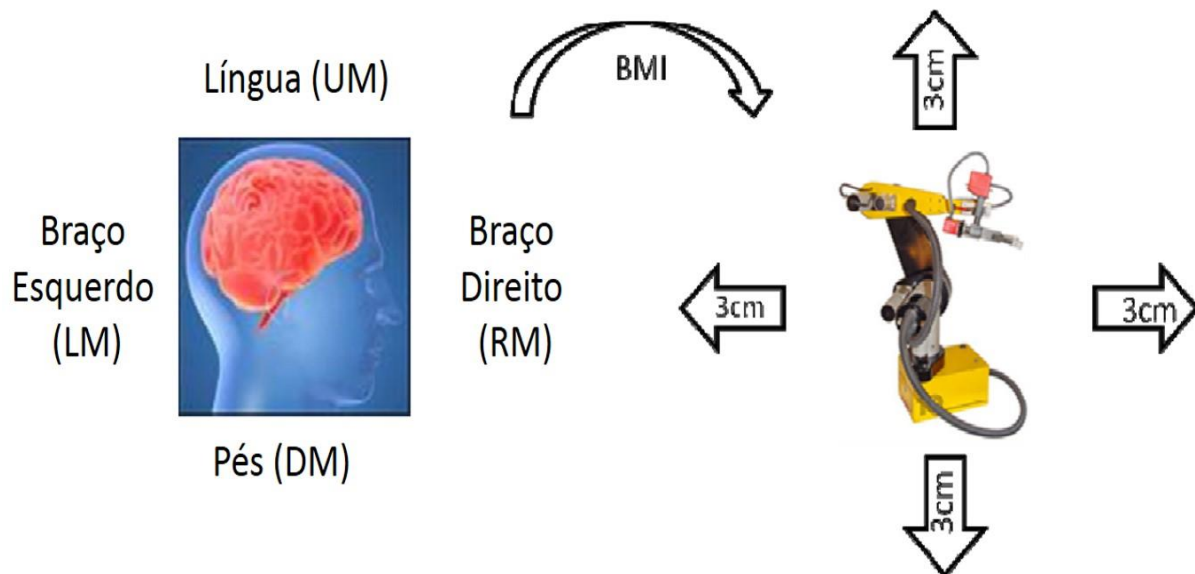


FIG. 1.14 Correspondência das Atividades Mentais na Ativação de um Manipulador Robótico (Barbosa, 2010)

O manipulador se movimenta em 3 centímetros na direção escolhida. No caso de um comando ser classificado como confuso o manipulador se mantém parado.

Morgado Junior (2011) implementa dois tipos de controladores para um músculo pneumático acionado por uma válvula on/off 3/2 vias (3 vias e 2 posições). O primeiro baseado em modelo inverso, onde é utilizado o modelo que descreve o PAM de forma inversa, para que seja calculada a pressão no atuador para um dado deslocamento. O segundo baseado em lógica nebulosa, que tem como entradas o deslocamento e a massa, obtendo a pressão que deve ser imposta ao atuador. Em seguida o autor avalia os resultados obtidos com a simulação e os experimentais para validar do sistema de controle.

Locateli (2011) utiliza duas metodologias de controle para o sistema servopneumático esquematizado na FIG. 1.3. A primeira é um controlador PID associado à técnica de modulação por largura de pulso PWM, onde é realizada uma compensação da zona de saturação da válvula. A segunda é o controle por estrutura

variável por modos deslizantes, ferramenta de controle utilizada para plantas com dinâmica complexa.

O autor obtém como resultados o comportamento dinâmico da válvula direcional on/off e do método de controle por modos deslizantes, um comparativo entre diferentes frequências de PWM para a resposta ao degrau e seguimento da trajetória senoidal, bem como um comparativo entre resultados teóricos com os experimentais, validando seus métodos de controle.

Para controle do exoesqueleto para membros superiores, mostrado na FIG. 1.8, Garcés (2013) aplica um controle de modos deslizantes com superfície deslizante PID de alto ajuste dos parâmetros, sendo observadas como variáveis de entrada do sistema a velocidade de atuação do controle quando o usuário deseja movimentar o braço, e a posição final que o braço deve permanecer para carregar o objeto. O modelo em malha aberta é representado na FIG. 1.15.

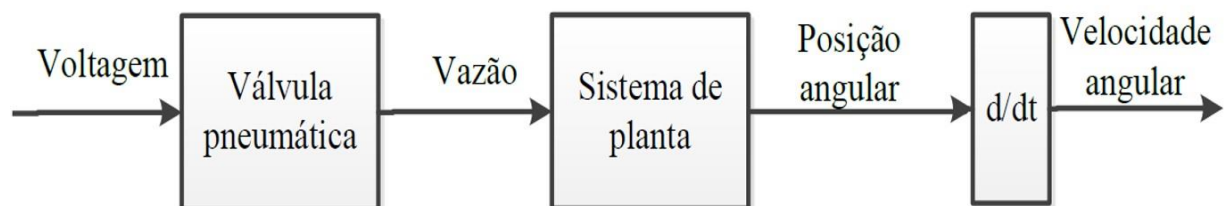


FIG. 1.15 Modelo em Malha Aberta para Exoesqueleto de Membro Superior (Garcés, 2013)

A autora explica que o sistema de planta é composto pelo conjunto de cilindros pneumáticos e dos elos do braço e antebraço. Dependendo da posição angular, o potenciômetro fornece diferentes valores de voltagem. Este valor é convertido ao valor correspondente de posição angular por meio de um algoritmo matemático simples, e a velocidade angular é encontrada derivando-se o sinal de posição angular.

Ramos (2013) aplica uma metodologia de controle ao exoesqueleto para membros superiores, ilustrado na FIG. 1.9, onde utiliza algoritmos genéticos para aproximar os parâmetros do modelo matemático do atuador e o modelo fisiológico do músculo.

O autor usa a leitura dos sinais eletromiográficos (EMG), posição e velocidade do braço, para estimar a força do músculo monitorado e o torque na articulação do exoesqueleto usando o modelo muscular de Hill, e com um modelo inverso de PAM é estimada a pressão que deve ser imposta ao atuador.

É então utilizado um controlador proporcional para fazer o controle da pressão regulando a frequência e comprimento dos pulsos de ar comprimido das válvulas *on-off* proporcionalmente à diferença de pressão desejada. A malha de controle descrita é apresentada na FIG. 1.16.

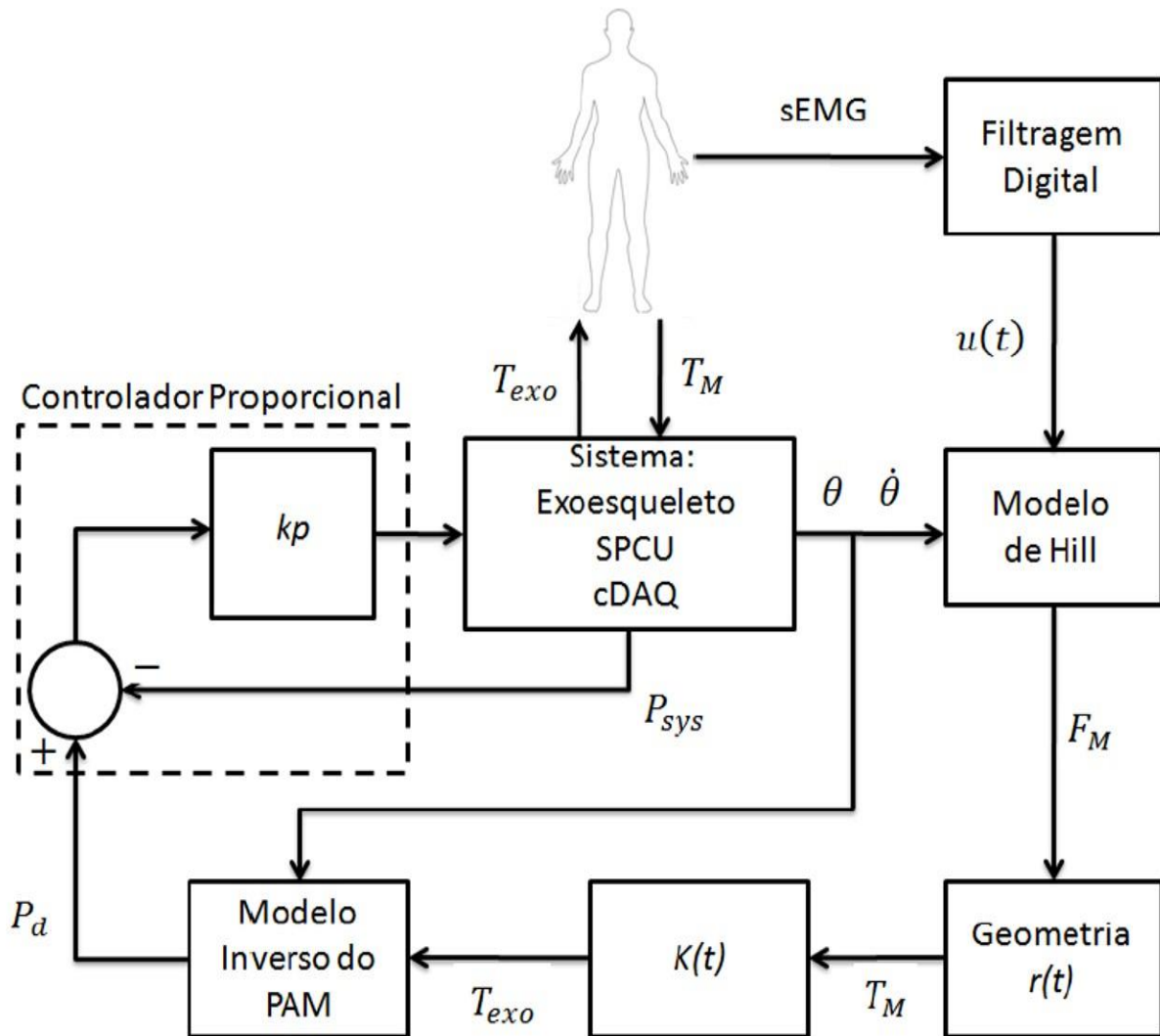


FIG. 1.16 Malha de Controle para um Modelo de Exoesqueleto para Membros Superiores acionado por Músculos Pneumáticos (Ramos, 2013)

Batista (2013) faz a modelagem dos membros inferiores do corpo considerando duas fases: a fase de apoio e de balanço. Sendo a primeira modelada como um pêndulo duplo e a segunda como um pêndulo invertido. Essa transição gera uma descontinuidade no sistema uma vez que inicialmente a variável de interesse a ser controlada é a trajetória do pé, e em seguida passa a ser o centro de massa do corpo para equilibrá-lo.

Nesse sentido, a autora trata o sistema como um sistema híbrido, onde essa transição entre os dois modelos dinâmicos contínuos é marcada por um sistema de eventos discretos. A cadeia cinemática adota duas posturas distintas marcadas pela ocorrência de eventos específicos e cíclicos, eventos que caracterizam um sistema discreto, que pode ser modelado por eventos discretos, porém cada um desses eventos é caracterizado por um comportamento dinâmico contínuo que pode ser modelado por equações diferenciais.

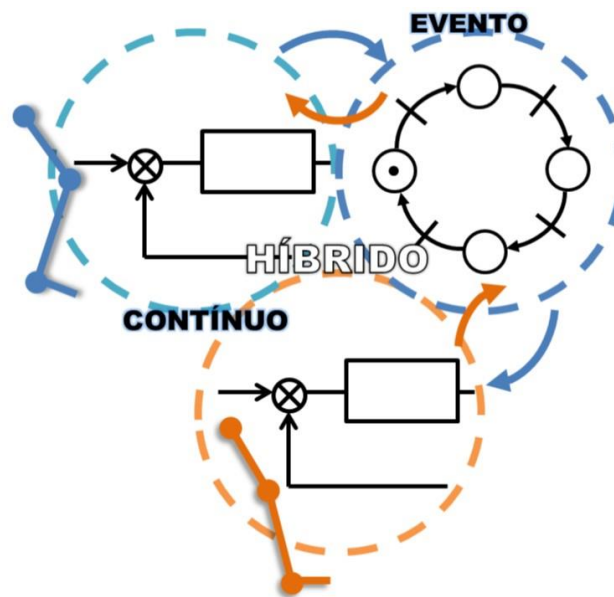


FIG. 1.17 Arquitetura de Modelo Híbrido para Exoesqueleto Inferior (Batista, 2013)

A FIG. 1.17 apresenta o esquema do sistema de controle proposto pela autora. Nela pode-se observar os dois modelos mecânicos utilizados para modelar o membro inferior e a ilustração de como o sistema de eventos discretos controla a alternância entre ambos os modelos, por meio de monitoramento de transições que são sinalizadas como flechas (BATISTA, 2013).

Lopes (2014) utiliza duas técnicas de controle, aplicadas ao modelo de exoesqueleto desenvolvido e construído por ele sem partes metálicas, apresentado anteriormente na FIG. 1.11.

Uma das técnicas aplicadas pelo autor é o controle por PWM, que consiste em modular a largura dos pulsos de ar comprimido das válvulas para controlar a pressão no atuador, utilizando apenas uma válvula. A outra foi o controle *on-off* com *setpoint* na pressão, que utiliza uma válvula para permitir apenas a entrada de ar comprimido no atuador e outra apenas a saída.

Souza (2014) desenvolve um modelo genérico proposto para um exoesqueleto de membros inferiores conforme mostrado na FIG. 1.10. O modelo é acionado por músculos pneumáticos e controlado por válvulas proporcionais usando uma técnica de controle nebuloso embarcado, com filtros digitais embarcados, para integração e controle do exoesqueleto.

O autor aplica lógica nebulosa na implementação de uma válvula proporcional, utilizando como entradas o sinal EMG e a pressão na entrada no PAM obtendo como saída o ângulo (de 0 à 90°) de abertura ou fechamento da válvula.

Pedrosa (2015) propõe o modelo de exoesqueleto para membros inferiores mostrado na FIG. 1.12.

O autor desenvolve uma arquitetura de controle, esquematizada na FIG. 1.18, onde observa como entradas a posição e velocidade das articulações do exoesqueleto. Utiliza a dinâmica inversa do membro inferior para obter os torques no quadril e no joelho. Em seguida, com a dinâmica direta do modelo de exoesqueleto, obtém a força necessária no atuador. Com o modelo de músculo pneumático de Szepe (2005) é calculada a pressão requerida no atuador e então é utilizado um controlador Fuzzy PID para obter o ângulo de abertura ou fechamento da válvula (de 0 à 90°).

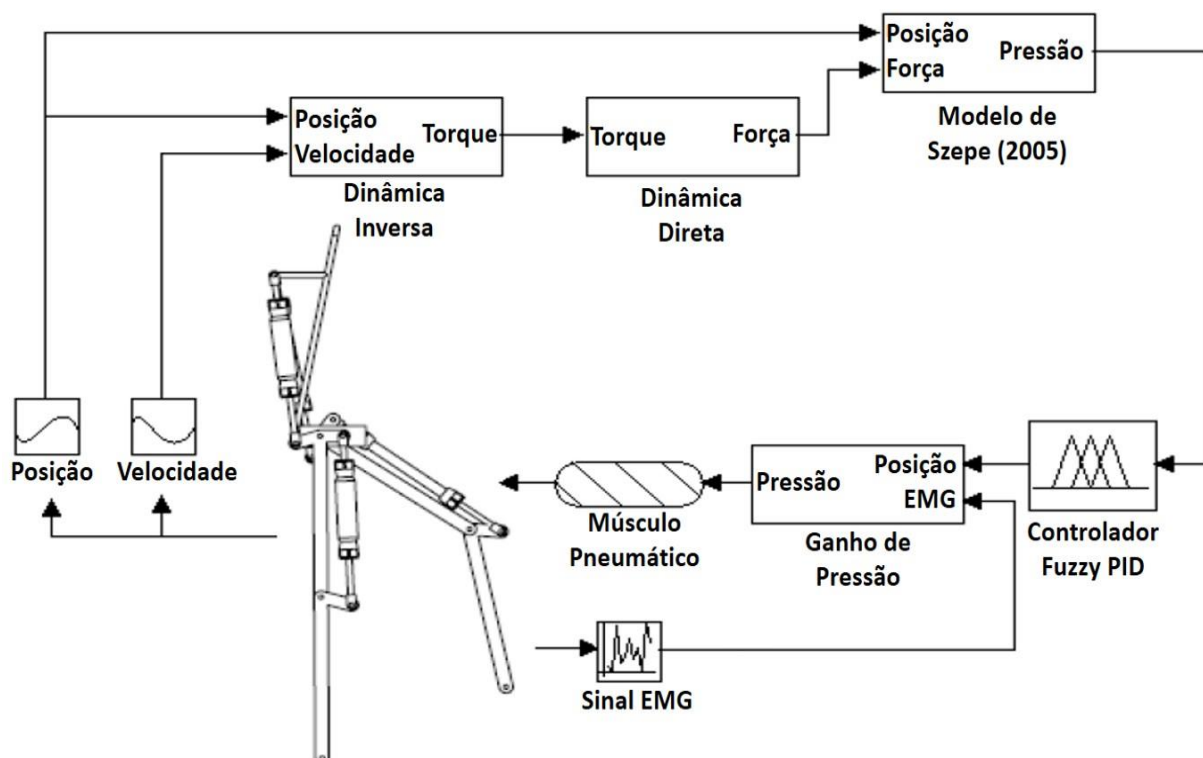


FIG. 1.18 Arquitetura de Controle para Exoesqueleto Inferior de 2 GDL (Pedrosa, 2015)

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal realizar o controle para duas válvulas eletropneumáticas *on-off* 3/2 vias (3 vias e 2 posições) utilizadas no acionamento de um músculo pneumático imposto a diferentes cargas.

As duas válvulas são dispostas em série, de forma a possibilitar a interrupção do fluxo de ar em todos os sentidos. Assim é possível aprisionar o ar comprimido no interior do atuador mantendo-o em uma posição fixa.

Para isso são desenvolvidos dois modelos de controle, o controle com Lógica Nebulosa e o controle com Modelo de Músculo Real, visando analisar o comportamento do PAM, a partir de gráficos da pressão e deslocamento do atuador ao longo do tempo.

No primeiro modelo pretende-se que o atuador seja inflado e descarregado com um tempo predeterminado, chamado tempo de referência (estabelecidos em 3, 4 e 5 segundos). Para isso faz-se com que as válvulas emitam pulsos intermitentes aprisionando o ar no interior do PAM.

É desenvolvido um controlador que utiliza Lógica Nebulosa para obter como saída o tempo necessário para que o PAM seja inflado até atingir a pressão máxima de trabalho (6 bar, segundo recomendações do fabricante) e totalmente descarregado. Em seguida é calculado o comprimento dos pulsos a serem emitidos pelas válvulas, considerando a quantidade de pulsos desejados, para que o atuador complete o movimento com o tempo de referência.

O segundo controlador utiliza um modelo de músculo real, o Modelo Muscular de Hill, que é capaz de estimar a força exercida pelo músculo fisiológico de uma pessoa ao executar um movimento de contração e/ou distensão.

Neste modelo de controle o PAM é acionado, emitindo pulsos de ar comprimido, sempre que a força do músculo real for maior que um valor predeterminado (estabelecido em 30 N), caso contrário o atuador se mantém na posição em que se encontra.

Ambos os modelos são implementados e testados com três valores de carga diferentes, 5, 10 e 15 kg. São feitos uma simulação no software MATLAB® e testes em bancada para comparação dos resultados.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos, acrescidos da conclusão, conforme apresentado:

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução sobre o tema em estudo, o problema a ser tratado, é feita uma revisão bibliográfica mostrando diversos trabalhos realizados que contém alguma relevância neste estudo e são apresentados os objetivos propostos.

O Capítulo 2 apresenta conceitos detalhados sobre sistemas pneumáticos e o funcionamento de seus principais componentes, as válvulas direcionais *on-off* e o atuador pneumático, especificamente o músculo pneumático.

O Capítulo 3 contém um estudo sobre sistemas de controle em geral, apresenta fluxogramas que descrevem o processo dos dois sistemas de controle propostos e realiza um estudo dos conceitos utilizados para desenvolvê-los.

O Capítulo 4 descreve todo o desenvolvimento deste trabalho, como são realizadas as implementações dos sistemas de controle, como foram desenvolvidos, são detalhados os componentes utilizados nos experimentos, os modelos físicos utilizados na implementação, e são descritos como foram feitos os testes em bancada.

O Capítulo 5 apresenta todos os resultados obtidos com as simulações e experimentos, também é feita uma análise destes. Os resultados foram divididos em seções para separá-los de acordo com o sistema de controle em atuação.

Por último o Capítulo 6 apresenta a conclusão do estudo, onde são realizadas análises conclusivas sobre o estudo, bem como dos resultados obtidos.

2 SISTEMAS PNEUMÁTICOS

A pneumática trata-se da utilização de ar comprimido em tecnologias de acionamento e comando de sistemas. Existem diversas aplicações no meio industrial e no nosso cotidiano, por exemplo, prensas pneumáticas, freios de caminhão, sistemas automatizados para alimentação de peças, acionamento de portas de ônibus urbanos ou dos metrô, entre outros (SILVA, 2002).

Guenther et. al. (2006) aponta como principais vantagens ser uma tecnologia limpa, de baixo custo, fácil manutenção e por apresentar uma boa relação entre a força aplicada e seu peso. Entretanto, a compressibilidade do ar, a relação não linear da vazão nos orifícios de controle e o atrito nos atuadores causam muitas dificuldades no controle clássico linear de atuadores pneumáticos.

Morgado Junior (2011) aponta ainda como vantagens a rapidez de resposta, tanto no movimento de um sistema pneumático como no aumento do ritmo de trabalho, a robustez do sistema, apresentando pouca ou nenhuma interferência por vibrações, umidade, poeira ou corrosão, e a facilidade de manutenção.

Circuitos pneumáticos são alimentados por uma fonte de ar comprimido com pressão constante e com capacidade de fornecer a vazão consumida por seus componentes. Tem como objetivo converter, de forma controlada, a energia pneumática em energia mecânica de translação ou rotação. São compostos por válvulas e/ou cilindros interligados por tubulações. Esses circuitos são parte integrante de um sistema pneumático, que engloba também sensores, controladores, circuitos elétricos e demais componentes que viabilizam a automação e/ou controle de um processo (DE NEGRI, 2001).

Ainda segundo considerações do autor, no contexto do projeto de sistemas de automação e controle, um sistema de atuação corresponde ao conjunto de elementos capaz de receber uma informação proveniente de um circuito elétrico, hidráulico ou pneumático. Ele controla a energia fornecida por esses circuitos em uma ou mais portas de saída.

A FIG. 2.1 apresenta um sistema de atuação pneumático genérico que recebe ar comprimido a uma pressão constante, a partir de um sinal de controle, e fornece

energia mecânica manifestada por meio de variáveis como força, velocidade, deslocamento (posição).

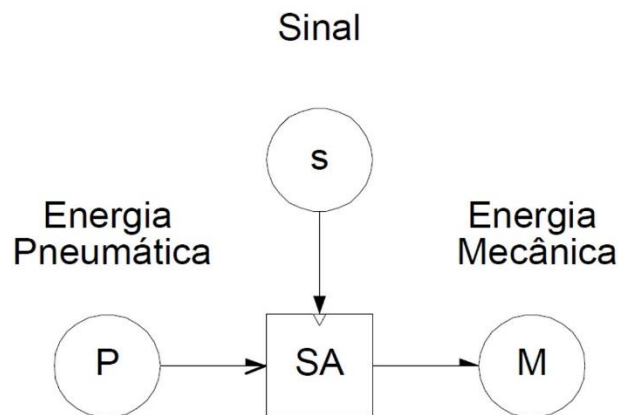


FIG. 2.1 Sistema de Atuação Pneumático Genérico (De Negri, 2001)

Os sistemas de acionamento pneumáticos são constituídos basicamente pelos elementos mostrados na FIG. 2.2.

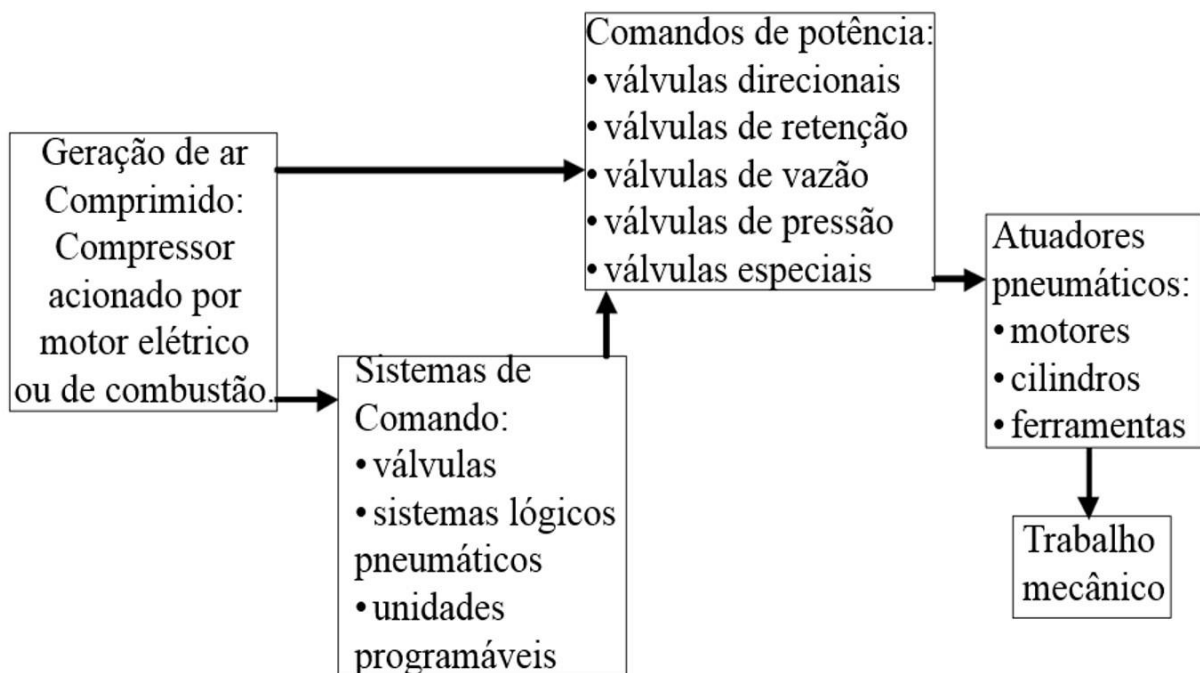


FIG. 2.2 Sistema de Acionamento Pneumático (Silva, 2002)

Os sistemas de comando são responsáveis pelo controle do atuador pneumático mediante sinais de comando, geralmente obtidos por sensores. Os comandos de potência fazem a conversão dos sinais recebidos do sistema de comando em sinais de níveis de energia necessários para o acionamento do atuador pneumático.

Neste trabalho o sistema de comando é desenvolvido a partir de uma unidade programável, conforme mostrada na FIG. 2.3, utilizando o software MATLAB®. O comando de potência é realizado por válvulas eletropneumáticas *on-off* 3/2 vias, e o atuador utilizado é um músculo pneumático.

O sistema de comando envia sinais binários (0 ou 1) que representam a abertura ou fechamento das válvulas *on-off*. Esses sinais são convertidos em sinais elétricos por um micro controlador, responsável por fazer a comunicação entre os sinais obtidos por sensores e o software de programação.

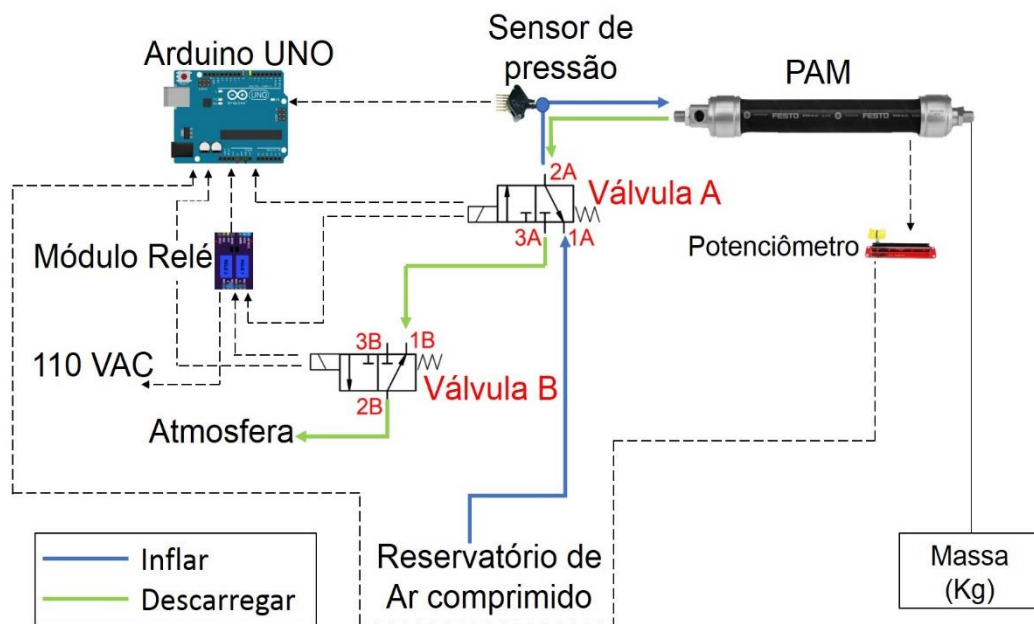


FIG. 2.3 Sistema Pneumático Proposto

Na FIG. 2.3, os números 1, 2 e 3 são as vias da respectiva válvula, A ou B. As setas de cor azul representam o caminho do ar comprimido para inflar o atuador (Reservatório de ar comprimido – 1A – 2A - PAM), e as setas de cor verde o caminho para descarregá-lo (PAM – 2A – 3A – 1B – 2B - Atmosfera).

Dessa forma, para inflar o PAM deve-se acionar apenas a válvula A, fazendo com que a via 1A seja liberada permitindo a passagem de ar comprimido para seu interior, e para descarregá-lo deve-se acionar apenas a válvula B, liberando a via 1B, permitindo a passagem de ar comprimido direto para a atmosfera. Para manter o PAM em uma posição fixa é necessário interromper a passagem do ar comprimido nos dois sentidos, para isso as duas válvulas devem ser mantidas desligadas de forma que as vias 1A e 1B são bloqueadas aprisionando o ar em seu interior.

As válvulas utilizadas são acionadas por solenoides de 110 V, por este motivo é utilizado o módulo relé, que suporta cargas de até 10 A (amperes), conectado ao micro controlador Arduino UNO para fazer o controle das mesmas. São utilizados um sensor de pressão e um potenciômetro deslizante para a aquisição dos dados do sistema, obtendo a pressão e o deslocamento longitudinal no atuador ao longo do tempo.

O sistema é alimentado por meio de um reservatório de ar comprimido calibrado para fornecer uma pressão máxima de 6 bar. O músculo pneumático é disposto na posição horizontal sendo fixado em uma extremidade e na outra é acoplada uma plataforma de carga onde são inseridos pesos para realização dos experimentos.

2.1 VÁLVULAS DIRECIONAIS ON-OFF

Válvulas de comando englobam todas as válvulas que ao receberem um impulso pneumático, mecânico ou elétrico, permitem que haja fluxo, controlado ou não, de ar comprimido para alimentar determinados elementos do automatismo (FIALHO, 2004).

Com uma válvula proporcional é possível regular a vazão ou a pressão do fluido, pois possuem o orifício de saída com área variável, de forma que sua abertura seja proporcional à vazão ou pressão pretendida. No caso das válvulas direcionais *on-off* o orifício de saída pode ficar totalmente aberto ou totalmente fechado, não havendo posições intermediárias.

Existem diversos tipos de válvulas com várias formas de acionamento e mecanismos de comando. No entanto, no presente trabalho é de interesse apenas o estudo de válvulas direcionais com acionamento por solenoides e retorno por molas.

Válvulas de controle direcional possuem dois tipos de construção, com carretel deslizante (translação) e de centro rotativo. Contudo a pneumática utiliza apenas o primeiro (FIALHO, 2004).

Ainda sob considerações do autor, a convenção para representação esquemática das válvulas direcionais segue a norma de simbologia da pneumática DIN/ISO 1929:

- São representadas por um retângulo composto por quadrados, em que o número de quadrados representa o número de posições da válvula;
- Os orifícios são representados por traços colocados fora dos quadrados;

- As vias são indicadas por setas, que ligam os orifícios;
- Os fechamentos são indicados por um traço curto transversal, formando um T, colocado no interior do retângulo;
- Reconhecemos as demais posições deslocando, além da posição normal, deslocando os quadrados para que os orifícios fiquem sobre o quadrado apropriado;
- O conduto de ar comprimido é representado por um pequeno círculo marcado internamente por outro menor e cheio;
- O conduto para a atmosfera tem um pequeno triângulo, representando a via de exaustão.

As vias podem ser indicadas por letras ou números. Onde a letra P indica a via de pressão, R a de exaustão e demais letras as vias de trabalho. Já os números, em geral, o número 1 indica a via de alimentação ou pressão, 2 e 4 são vias de trabalho, 3 e 5 vias de exaustão ou escape.

Cada forma de acionamento e mecanismo de comando possui uma forma representativa diferente, as FIG. 2.4 e FIG. 2.5 mostram a simbologia utilizada para acionamento por solenoide com uma bobina e mecanismo de retorno por mola, respectivamente.

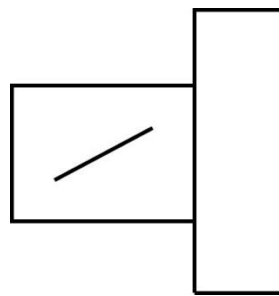


FIG. 2.4 Simbologia para Válvulas com Acionamento por Solenoide de uma Bobina (adaptado de Fialho, 2004)

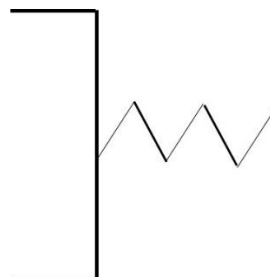


FIG. 2.5 Simbologia para Válvulas com Retorno por mola (adaptado de Fialho, 2004)

Para maiores detalhes e conhecimento de mais símbolos utilizados na representação de válvulas, seus tipos de acionamento e mecanismos de comando recomenda-se a leitura do apêndice A no livro intitulado “*Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos*” por Fialho (2004).

Para ilustrar os conceitos descritos, a FIG. 2.6 ilustra um exemplo da representação de uma válvula de 3 vias e 3 posições, normalmente fechada (NF), acionada por solenoide de uma bobina e com retorno por mola.

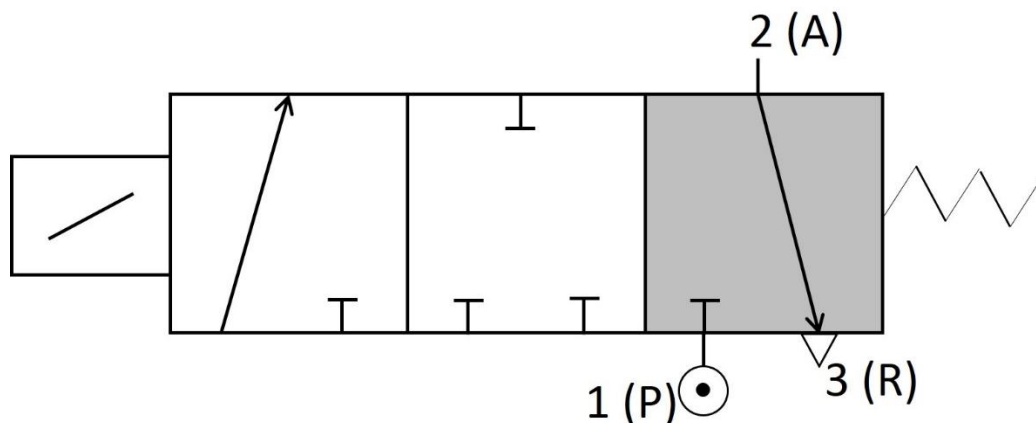


FIG. 2.6 Representação de uma Válvula 3 vias e 3 posições (adaptado de Fialho, 2004)

É possível identificar que a válvula é normalmente fechada pois a via de alimentação representada por 1 ou P, possui um símbolo de fechamento (T). Cada quadrado representa uma posição da válvula, assim sobrepondo cada um deles àquele onde estão representadas as vias, o quadrado mais escuro, é pode-se definir seu funcionamento em cada posição.

Assim, em sua posição normal as vias 2 e 3 (ou A e R) estão livres, na segunda posição todas as vias permanecem bloqueadas impedindo o fluxo de ar comprimido, e na terceira o fluxo de ar comprimido é liberado seguindo da via 1 para a 2 (ou de P para A) com o fechamento da via 3 (ou R).

Atualmente, não é muito utilizado o símbolo com formato de um alvo representando o conduto de ar comprimido, em geral a via de alimentação é reconhecida apenas pela representação do número 1 ou a letra P.

Em válvulas convencionais o acionamento se dá, normalmente, por ação mecânica, manual ou pneumática. Já em válvulas de comando elétrico, sua comutação é feita por meio de impulso elétrico originado por uma bobina CC ou CA

(corrente contínua ou corrente alternada). A bobina é fixada pelo seu centro ao corpo da válvula por meio de um núcleo solidário a esta (FIALHO, 2004).

Uma corrente elétrica passa pela bobina, ou solenoide, produzindo uma força que faz com que o êmbolo seja acionado, criando assim o sistema de abertura e fechamento da válvula.

Válvulas com retorno por mola tem como vantagem não necessitar de um novo sinal para voltar à posição inicial, bastando apenas cessar o sinal de acionamento existente (DE NEGRI, 2001).

As bobinas magnéticas, ou solenoides, em geral operam com tensões de 12 a 240 V, conforme especificação e necessidade. Normalmente com tensões de 12 a 24 V em corrente contínua e de 24, 110 ou 220 V em corrente alternada (FIALHO, 2004).

Micro controladores trabalham com tensões menores, em geral fornecendo apenas 5 V, impossibilitando uma ligação direta com a válvula. Uma alternativa é a utilização de um relé ou módulo relé, um dispositivo acionado por campo magnético.

Esse dispositivo é formado basicamente por uma bobina e por seu conjunto de contatos (FIG. 2.7). Ao ser energizada a bobina K, é feita a conexão do terminal C com os outros contatos NA. Enquanto a bobina permanecer energizada os contatos permanecem nessa posição.

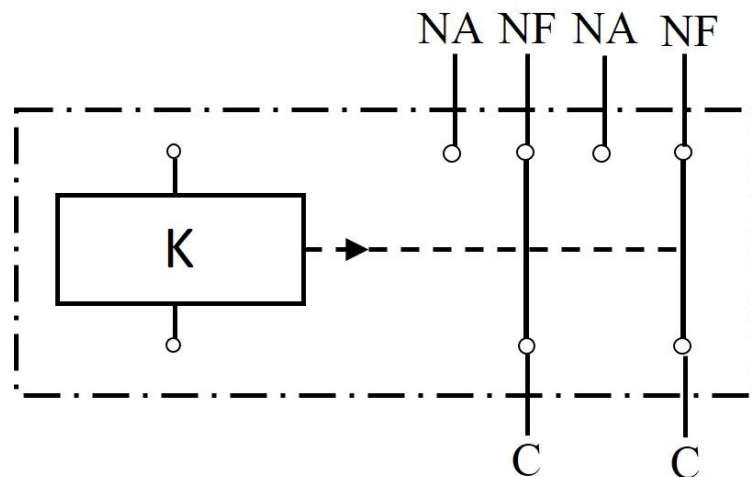


FIG. 2.7 Esquemas de um Dispositivo Relé (Fialho, 2004)

A pressão de um fluido, ao deslocar-se através de uma tubulação, sofre queda gradual (também chamada de perda de carga) ao longo do comprimento, em função dos atritos internos e dos possíveis estrangulamentos (curvas, registros, Tees, etc), que existam ao longo dela (FIALHO, 2004).

Dessa forma, a pressão que sai do reservatório de ar comprimido sofre alterações ao passar pela tubulação e válvulas, até chegar ao atuador pneumático. Por esse motivo existem diversos modelos que buscam representar o escoamento de um fluido através de diferentes tipos de válvulas. Neste trabalho é de interesse apresentar apenas a modelagem para uma válvula direcional, que é mostrado mais adiante.

2.2 ATUADORES PNEUMÁTICOS

Atuadores pneumáticos são elementos mecânicos que por meio de movimentos lineares ou rotativos transformam a energia cinética do ar pressurizado e em expansão, em energia mecânica, produzindo trabalho (FIALHO, 2004).

Existem diversos tipos de atuadores pneumáticos, os mais comumente utilizados são o cilindro e o músculo pneumático. Sendo estudado aqui apenas o segundo.

Músculos pneumáticos (FIG. 2.8) são atuadores elásticos de movimento linear operados por diferença de pressão, que imitam o movimento natural de um músculo humano.



FIG. 2.8 Músculos Pneumáticos (catálogo FESTO, 2017)

Consistem de um tubo contrátil composto por um diafragma de borracha com uma fibra não frisada, feito de fios de aramida em seu interior. Os fios servem como reforço para transmitir força. Quando a pressão interna é aplicada, o diafragma se estende por toda a circunferência. Isso produz uma força de tração e um movimento de contração na direção longitudinal. A força de tração utilizável está no seu máximo no início da contração e decresce com o tempo (FESTO, 2017).

Ainda de acordo com informações da FESTO, em uma aplicação simples, o PAM se comporta como uma mola quando há mudança na força externa, conforme mostrado na FIG. 2.9 podendo ser operado com pressão e volume constantes. Ou pode funcionar como um atuador, caso uma carga seja aplicada diretamente sob uma de suas extremidades. Isto produz características que permitem que o efeito de mola coincida perfeitamente com sua aplicação.

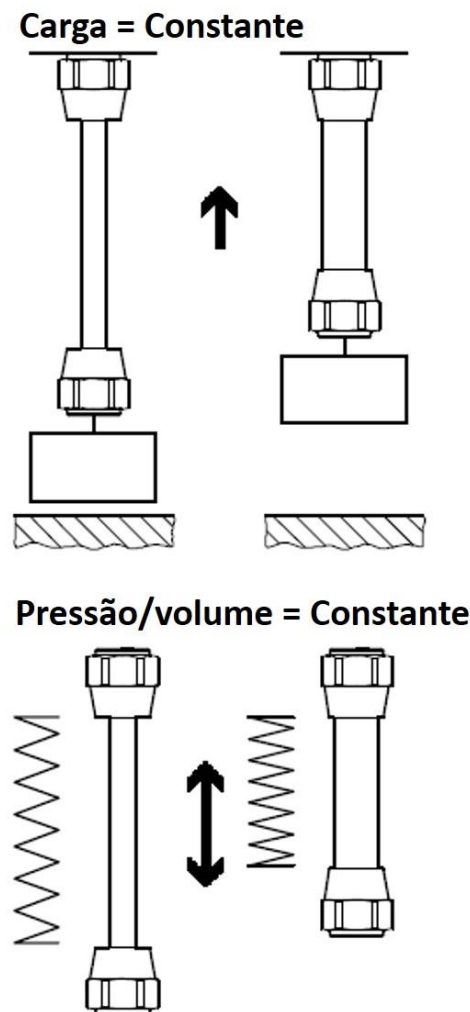


FIG. 2.9 Comportamento como Mola de um PAM (catálogo FESTO, 2017)

Quando sob pressão, o músculo contrai-se desenvolvendo força máxima com ótimas características dinâmicas e mínimo consumo de ar.

A força de tração é máxima no início da sua contração e decresce com o tempo. Cada modelo de músculo pneumático possui uma faixa de operação específica, correspondentes ao seu comprimento e diâmetro, geralmente relacionando a pressão de trabalho com a força exercida pelo PAM.

3 SISTEMAS DE CONTROLE

O sistema de controle tem como finalidade fazer com que todo o sistema alcance um determinado estado, podendo utilizar sensores para obter informações sobre o comportamento do sistema controlado (HEINEN, 2002).

De Negri (2001) define sistema de controle como o conjunto de componentes interligados com a função de realizar uma ou mais ações observadas ao longo do tempo e que se modificam a partir de sinais de entrada.

O termo automação possui uma abrangência maior que controle, pois algumas ações lógicas quando observadas mais detalhadamente, incluem tarefas de controle. Assim, define-se sistema de automação como o conjunto de componentes relacionados entre si com a função de realizar uma ou mais ações segundo uma lógica pré-determinada ou em resposta à ocorrência de eventos.

De Negri (2001) discorre ainda sobre a utilização do termo sistemas automáticos para designar uma aplicação que envolva automação e/ou controle. Possibilitando a integração entre uma visualização do sistema como um todo de forma lógica e aprofundada ao longo do tempo, considerando também sinais de entrada e a ocorrência de eventos.

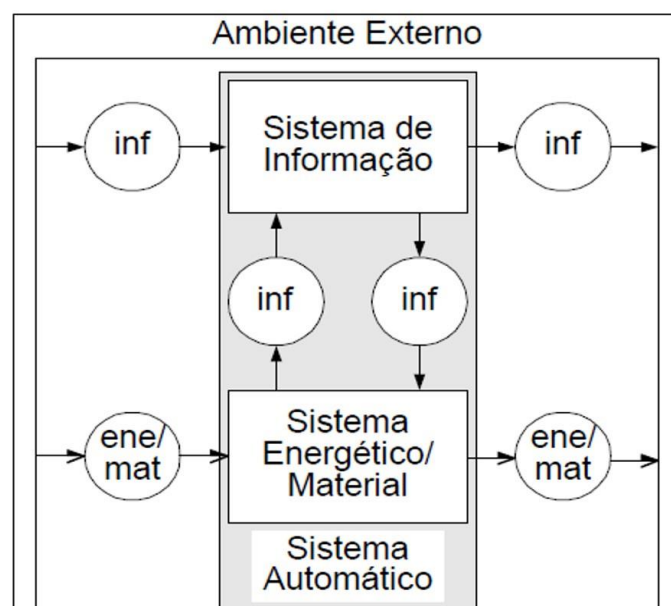


FIG. 3.1 Representação de um Sistema Automático (De Negri, 2001)

Ainda segundo De Negri (2001), um sistema automático pode ser decomposto em dois subsistemas, o de informação e o energético/material (FIG. 3.1). O primeiro engloba os equipamentos que processam sinais e dados, enquanto o segundo comporta as máquinas e equipamentos que transformam ou processam energia e/ou matéria.

O sistema de informação deve ser capaz de processar informações extraídas do sistema energético/material para posteriormente controlar seu funcionamento. Há também o recebimento e fornecimento de energia (ene), matéria (mat) e informação (inf) em relação ao meio externo, conforme ilustrado na FIG. 3.1.

Na engenharia existem diferentes estratégias de controle desenvolvidas com base em controle de malha fechada e de malha aberta.

No controle em malha fechada, o sinal de controle é determinado a partir de uma comparação entre o sinal de saída do sistema e o valor de referência preestabelecido, com o objetivo de corrigir os desvios ou erros existentes (BAVARESCO, 2007). A FIG. 3.2 apresenta um diagrama básico de controle em malha fechada.

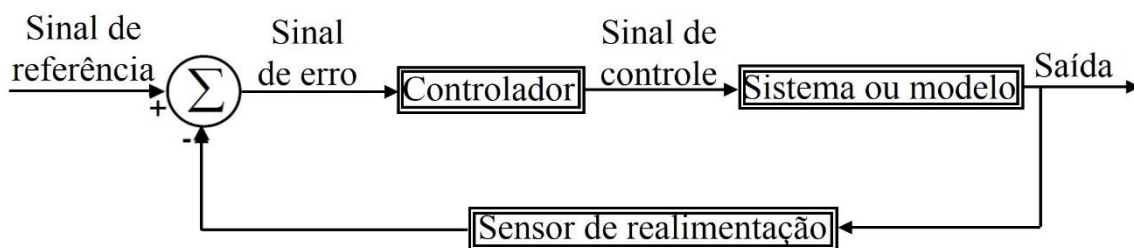


FIG. 3.2 Diagrama para um Sistema de Controle em Malha Fechada (Bavaresco, 2007)

No controle em malha aberta, o sinal de controle é pré-determinado e aplicado ao sistema esperando que a variável atinja o estado ou comportamento desejado. Esse tipo de controle não utiliza informações sobre a evolução do processo, de forma que a saída do sistema não exerce influência sob o sinal de controle (BAVARESCO, 2007). A FIG. 3.3 apresenta um diagrama básico do controle em malha aberta.

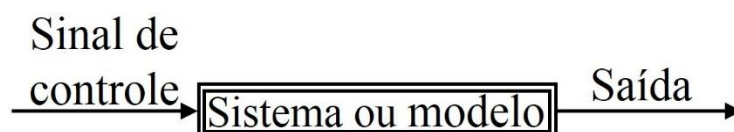


FIG. 3.3 Diagrama de um Sistema de Controle em Malha Aberta (Bavaresco, 2007)

Neste trabalho são desenvolvidos, implementados e testados dois modelos de sistemas de controle: o Controle Nebuloso e o Controle com Modelo de Músculo Real, ambos desenvolvidos com controle em malha aberta.

O primeiro, como o próprio nome sugere, é baseado em Lógica Nebulosa. É desenvolvido um controlador nebuloso que tem como entradas a carga imposta ao sistema e a pressão de trabalho em que o PAM deve atuar; como saída o controlador fornece o tempo necessário para que o atuador seja inflado e descarregado. Em seguida é feito o cálculo do comprimento dos pulsos a serem emitidos pelas válvulas, para que o atuador seja inflado e descarregado com o tempo desejado, e então enviado o sinal de controle para o sistema pneumático, tal como esquematizado na FIG. 3.4.

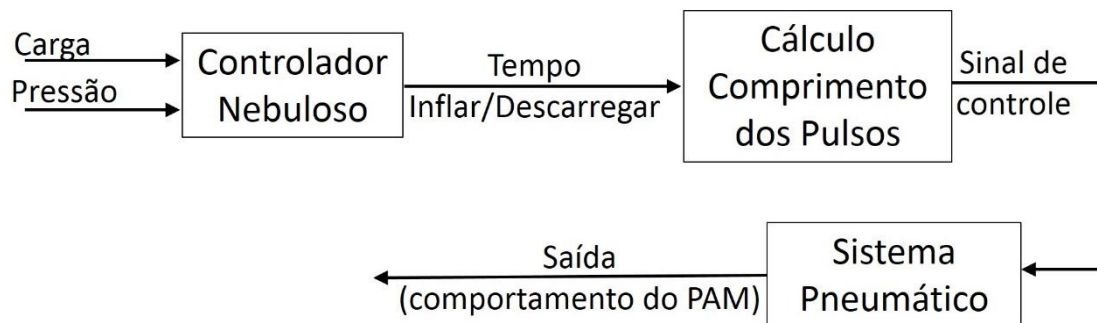


FIG. 3.4 Esquema do Controle Nebuloso

O Controle com Modelo de Músculo Real (MMR), utiliza o Modelo Muscular de Hill para estimar a força do músculo fisiológico de uma pessoa, a partir do sinal EMG e da posição angular do membro monitorado. Dessa forma quando a força muscular for maior que um valor (estabelecido em 30 N) o atuador é acionado, caso contrário se mantém em uma posição fixa, conforme o esquema da FIG. 3.5.

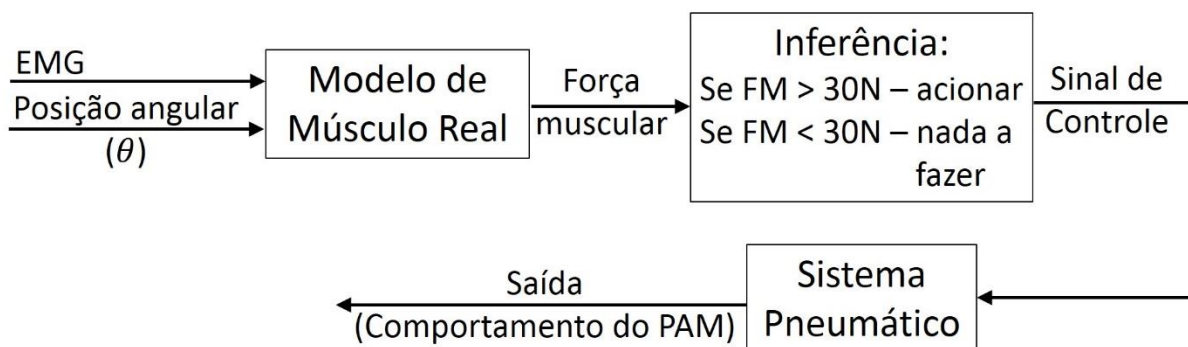


FIG. 3.5 Esquema do Controle com Modelo de Músculo Real

Para maior compreensão dos modelos de controle demonstrados nas FIG. 3.4 e FIG. 3.5, são apresentados a seguir os conceitos utilizados para desenvolvimento dos mesmos, tais como Lógica Nebulosa e o Modelo Muscular de Hill.

3.1 LÓGICA NEBULOSA APLICADA À CONTROLE

A teoria proposta pela Lógica Nebulosa é formular modelos capazes de capturar a funcionalidade de alguns sistemas a partir do conhecimento de especialistas a seu respeito (Netto, 2005).

É utilizada para representar sistemas com características vagas ou incertas. Possui sua base fundamentada na Teoria dos Conjuntos Nebulosos e é regida por Sistemas de Inferência.

Um conjunto clássico é um conjunto que possui limites claramente definidos, de forma que um elemento pertence ou não a um conjunto, exclusivamente. Um conjunto nebuloso não possui esses limites bem definidos, de forma que um elemento pode pertencer a mais de um conjunto, sendo associado a ele um grau de pertinência que pode assumir todos os possíveis valores entre 0 e 1 (JANG et. al., 1997).

Marro et. al. (2010) faz uma comparação muito interessante entre a Lógica Clássica e a Logica Nebulosa. De uma forma ilustrativa ele mostra a diferença da classificação da altura de uma pessoa na visão dos dois conceitos, considerando três conjuntos: baixo, médio e alto, conforme ilustrado na FIG. 3.6.

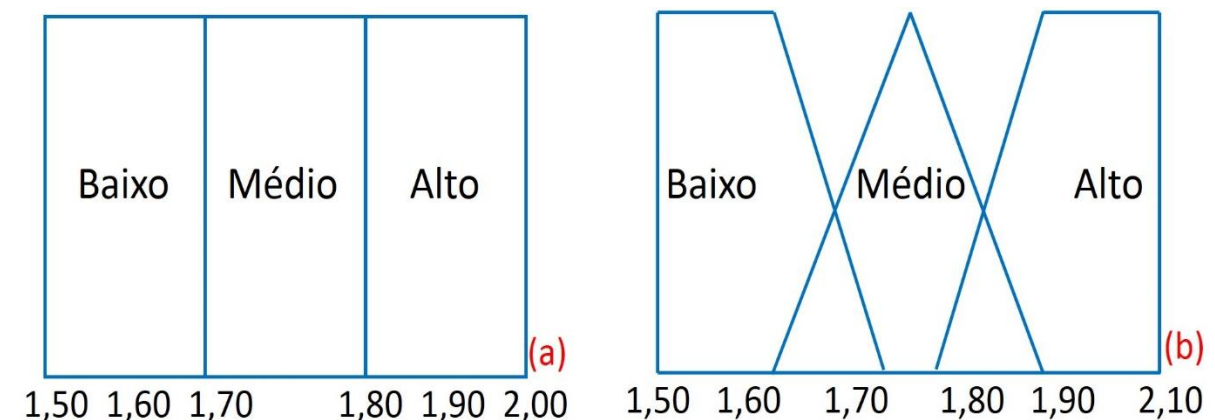


FIG. 3.6 Representação dos Conjuntos para Altura de uma Pessoa pela: (a) Lógica Clássica, (b) Lógica Nebulosa (Marro et. al., 2010)

Marro et. al. (2010) explica que, na Lógica Clássica um elemento x qualquer pertencerá unicamente a um dos conjuntos. Já a Lógica Nebulosa utiliza a ideia de que todas as coisas admitem graus de pertinência, de forma que um elemento pode pertencer a mais de um conjunto ao mesmo tempo. Dados dois elementos $x_1 = 1,69$ e $x_2 = 1,71$, na Lógica Clássica x_1 pertence ao conjunto baixo e x_2 ao conjunto médio. No entanto, na realidade não é muito coerente dizer que uma pessoa com altura igual a 1,69 m e outra com 1,71 pertencem a conjuntos diferentes. Assim, a Lógica Nebulosa é capaz de representar a forma de pensar das pessoas, em que x_1 e x_2 podem pertencer aos conjuntos baixo e médio ao mesmo tempo, cada qual com um grau de pertinência correspondente.

O grau de pertinência é associado a um valor de entrada do sistema através de funções de pertinência nebulosas. Essas funções são escolhidas baseadas na natureza do sistema, conhecimentos acumulados ou conhecimentos de um especialista do processo. Elas definem valores linguísticos associados ao sistema, isto é, definem características marcantes para classificação das variáveis de entrada.

3.1.1 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Segundo Shaw e Simões (1999) uma função de pertinência nebulosa é uma função numérica ou tabulada que atribui valores nebulosos às variáveis discretas, em seu universo de discurso. Sendo o universo de discurso o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável pode assumir.

Retomando ao exemplo dado anteriormente, ilustrado pela FIG. 3.6. A variável em questão é o elemento x que representa a idade de uma pessoa. O universo de discurso são todos os possíveis valores de x . E as funções de pertinência são caracterizadas pelos valores linguísticos baixo, médio e alto, agregando ao elemento x um valor nebuloso, ou grau de pertinência a cada conjunto. O grau de pertinência assume todos os possíveis valores entre 0 e 1, de forma que 0 indica que o elemento não pertence ao conjunto e 1 pertence totalmente à apenas aquele conjunto, qualquer outro valor indica que o elemento pertence a mais de um conjunto com diferentes graus de pertinência.

Uma forma fácil de entender o significado do grau de pertinência é pensar em percentual, é como se ele representasse a porcentagem em que um determinado elemento pertence a um conjunto. Assim, à medida que um elemento se aproxima do limite máximo de um conjunto seu grau de pertinência a este mesmo conjunto aumenta.

As funções de pertinências, representadas por $\mu(x)$, variam em forma e quantidade de acordo com a necessidade de representação dos conjuntos. As formas de representação mais comumente utilizadas são as funções trapezoidal, triangular e gaussiana.

As funções de pertinência trapezoidais são definidas por quatro parâmetros (a,b,c,d),

$$\mu_{trap}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{se } x \geq d \end{cases} \quad \text{EQ. 3.1}$$

Esses parâmetros determinam as coordenadas de x nos quatro cantos da função, ou seja, do trapézio formado, conforme ilustrado na FIG. 3.7.

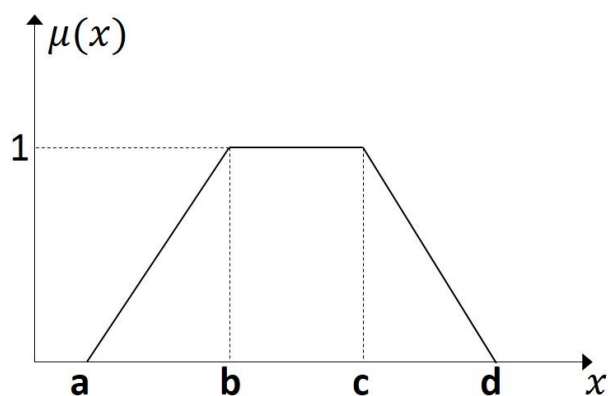


FIG. 3.7 Função de Pertinência Trapezoidal

A forma assumida pela função de pertinência é dependente de como são classificados os elementos de cada conjunto.

Por exemplo, para avaliar o peso de determinados elementos são criados três grupos de pesos leve, médio e pesado. Se classificarmos como:

- Pesos de até 5 kg apenas como leves;
- Pesos entre 10 e 15 kg apenas como médios;
- Pesos com mais de 20 kg apenas como pesados.

Pensando em conjuntos nebulosos podemos concluir que pesos entre 5 e 10 kg tem pertinência aos conjuntos leve e médio, e pesos entre 15 e 20 kg tem pertinência aos conjuntos médio e pesado.

Assim, é cabível utilizar funções de pertinência trapezoidais para representação dos conjuntos. Onde os parâmetros a, b, c e d de cada conjunto são substituídos por seus limites. Conforme ilustrado na FIG. 3.8.

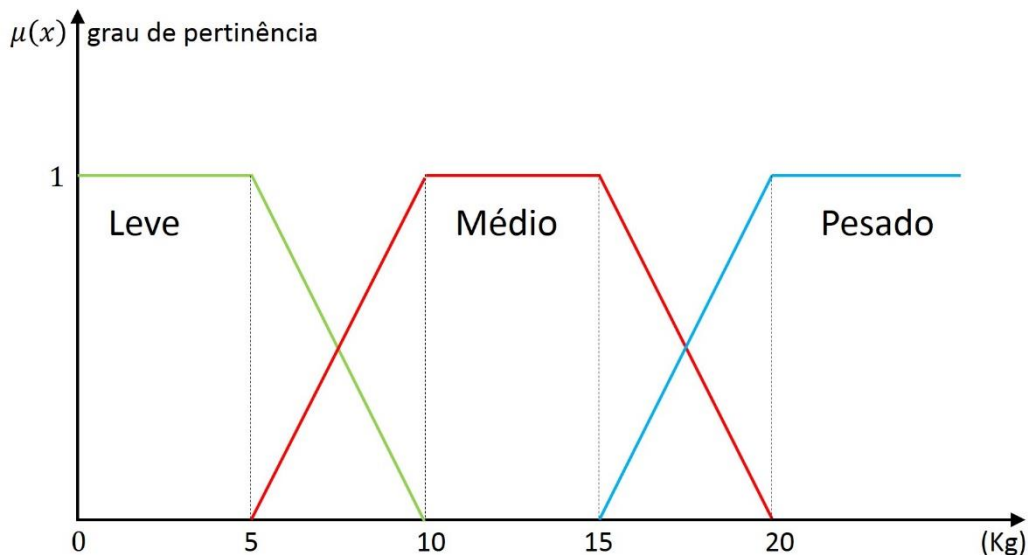


FIG. 3.8 Exemplo para Funções de Pertinência Trapezoidais

A função de pertinência triangular é definida por apenas três parâmetros (a,b,c),

$$\mu_{tri}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{se } x \geq c \end{cases} \quad \text{EQ. 3.2}$$

Onde esses parâmetros determinam as coordenadas de x nos três cantos do triângulo formado pela função (FIG. 3.9).

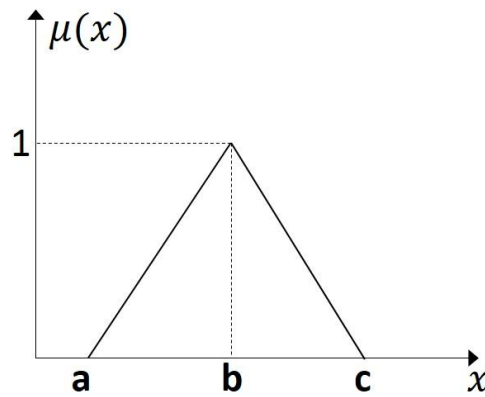


FIG. 3.9 Função de Pertinência Triangular

Para utilizar funções de pertinência triangulares, podemos utilizar o mesmo exemplo apresentado anteriormente, basta alterar apenas a forma como classificamos os pesos dos elementos. Considerando como:

- Pesos de 5 kg são leves;
- Pesos de 10 kg são médios;
- Pesos de 15 kg são pesados.

Se queremos utilizar funções de pertinência triangulares para todos os conjuntos devemos então limitar o universo de discurso, nesse caso limitaremos para pesos de até 20 kg. Conforme ilustrado na FIG. 3.10. Vale ressaltar que este exemplo é apenas ilustrativo, para identificar as formas de representação dos conjuntos.

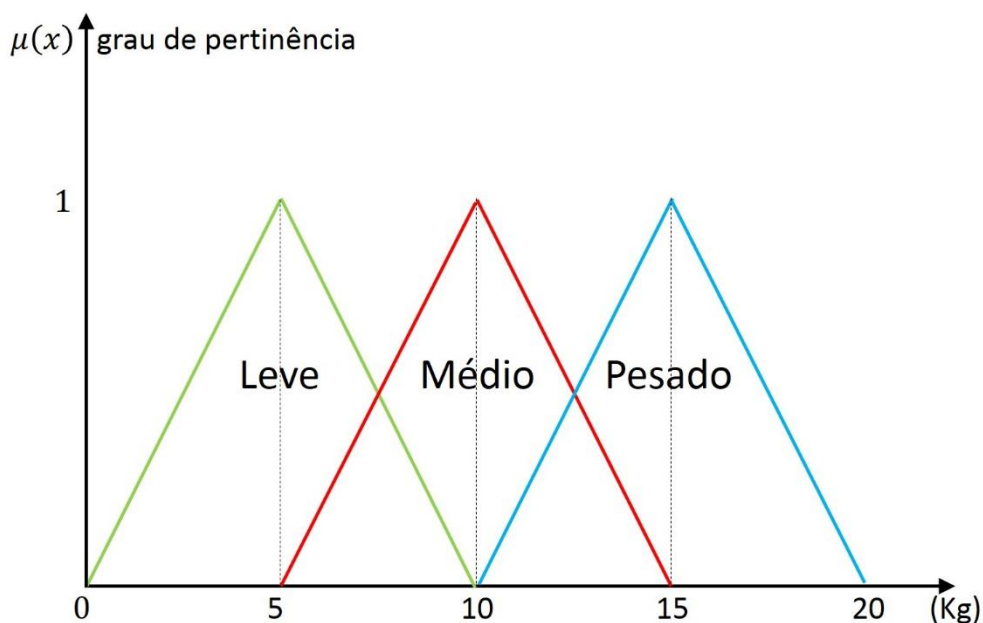


FIG. 3.10 Exemplo para Funções de Pertinência Triangulares

A função de pertinência gaussiana é especificada por dois parâmetros (c, σ),

$$\mu_{gauss}(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad \text{EQ. 3.3}$$

Onde c representa o centro da função e σ o desvio padrão, ou seja, a largura da curva em forma de sino, conforme a FIG. 3.11.

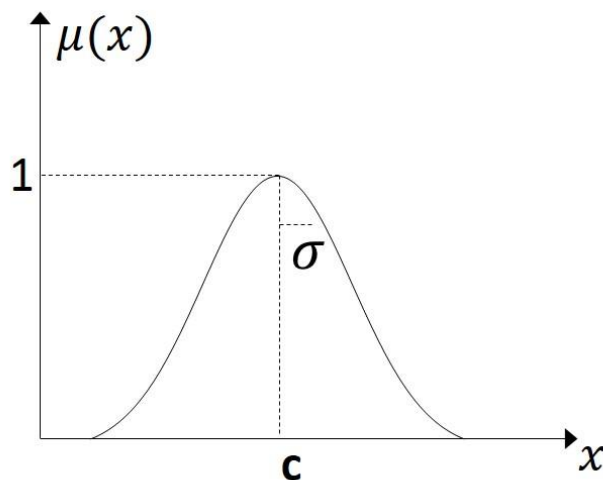


FIG. 3.11 Função de Pertinência Gaussiana

Esse tipo de função é mais utilizado quando deseja-se expressar o desvio, ou erro, existente em relação ao valor de referência, como em projetos de controle de qualidade, por exemplo.

3.1.2 SISTEMAS DE INFERÊNCIA

Os Sistemas de Inferência Nebulosos estabelecem a relação entre as variáveis de entrada e as saídas do sistema, usando uma base de regras lógicas predefinidas.

As regras “Se-Então” e o raciocínio nebuloso são a base de sistemas de inferência nebulosos, que são capazes de reproduzir um conhecimento adquirido mesmo com características incertas, a partir de fatos conhecidos. Uma regra nebulosa “Se-Então” possui a forma “Se x é A , então y é B ”, onde A e B são valores linguísticos

(características mensuráveis que definem o elemento) definidos por conjuntos nebulosos nos universos de discurso X e Y, (TAB. 3.1) respectivamente (JANG et. al, 1997).

TAB. 3.1 Sistema de Inferência Nebuloso

Premissa 1 (fato):	x é A
Premissa 2 (regra):	se x é A então y é B
Consequência (conclusão):	y é B

A inferência nebulosa é um processo de avaliação de entradas, realizado a partir de regras lógicas previamente definidas, com o objetivo de obter conclusões (ou saídas) utilizando a teoria de conjuntos nebulosos. Esse processo pode ser feito por meio de modelos de inferência, que devem ser escolhidos considerando as características do sistema e o tipo de problema que deve ser resolvido (MARRO et. al., 2010).

Os modelos de inferência mais utilizados são os modelos de Mamdani e o TSK. Neste trabalho é abordado apenas o segundo modelo mencionado. Foi escolhido por ter como saída valores reais, não necessitando realizar a defuzzyficação, ou desnebulização, que é o processo de transformar um valor nebuloso em valor real.

3.1.3 MODELO DE SUGENO (TSK)

O modelo de Sugeno, também conhecido como TSK foi proposto por Takagi, Sugeno e Kang, com a finalidade de gerar uma forma sistemática para criar regras para diferentes conjuntos de dados de entrada e saída (JANG et. al., 1997).

Esse modelo funciona como um bom aproximador para sistemas que podem ser representados apenas por meio de suas relações de entrada e saída. Vem sendo aplicados para aproximação de funções não lineares, pelas suas propriedades sintáticas, entre elas a utilização de funções paramétricas nos consequentes de suas regras e a facilidade de se ajustarem a partir de um conjunto de dados de entrada e saída (DURÃES, 2009).

Uma regra nebulosa típica deste modelo tem a forma:

Se x é A e y é B então $z = (x,y)$

Onde A e B são conjuntos nebulosos no antecedente, enquanto z é uma função real no conseqüente. Essas regras compõem o sistema de inferência utilizado no controle nebuloso.

Neste modelo cada regra possui uma saída real, isto é, a saída do modelo já é dada por um valor real que pode ser interpretado pelo sistema de controle, e a saída total é obtida pela média ponderada de todas as saídas, conforme ilustrado na FIG. 3.12.

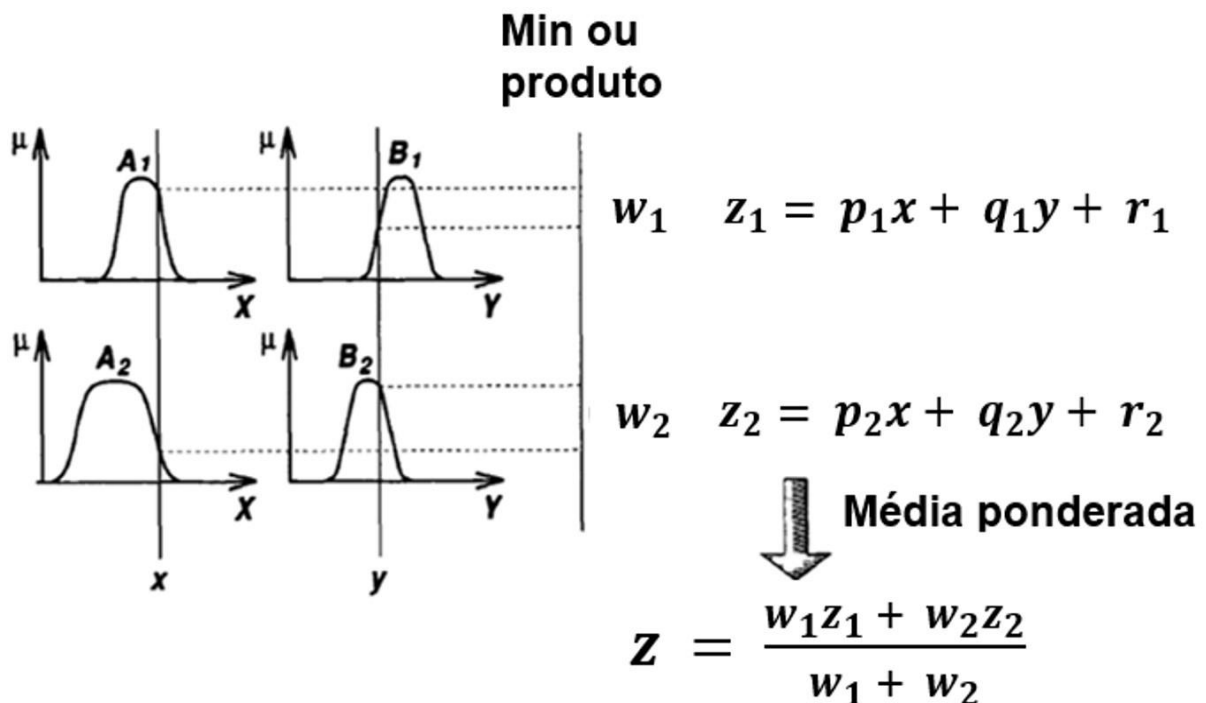


FIG. 3.12 Sistema de Inferência Nebuloso TSK (adaptado de Jang et. al., 1997)

Onde w é o valor de ativação da regra dado pelo mínimo ou pelo produto dos graus de pertinência do elemento nos conjuntos. Os parâmetros p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 e r_2 são constantes da função de saída, no entanto as saídas z_1 e z_2 também podem ser dadas por uma única constante. Na prática a operação da média ponderada é muitas vezes substituída pela operação da soma ponderada ($z = w_1 z_1 + w_2 z_2$).

As variáveis de entrada do sistema são representadas por x e y cada qual em seu universo de discurso X e Y , respectivamente. A_1 e A_2 são os conjuntos nebulosos a que a variável de entrada tem pertinência.

Para melhor entendimento do modelo, consideremos um exemplo de um sistema simples de inferência, que avalia a espessura e a altura de um objeto qualquer para definir a força que deve ser aplicada para fixá-lo. São utilizados então dois conjuntos nebulosos em cada categoria para classificá-los.

- Espessura: fino até 5 cm e grosso acima de 10 cm;
- Altura: baixo até 1 metro e alto acima de 2 metros.

As regras de inferência são dadas por:

- Regra 1: Se o objeto é baixo e fino, então a força é dada por Z_1 ;
- Regra 2: Se o objeto é baixo e grosso, então a força é dada por Z_2 ;
- Regra 3: Se o objeto é alto e fino, então a força é dada por Z_3 ;
- Regra 4: Se o objeto é alto e grosso, então a força é dada por Z_4 .

E podem ser apresentadas conforme a TAB. 3.2.

TAB. 3.2 Exemplo de Sistema de Inferência TSK

		Espessura	
		Fino	Grosso
Altura	Baixo	Z_1	Z_2
	Alto	Z_3	Z_4
		Força	

Onde Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4 são as saídas de força do sistema, podem representar uma função ou uma constante.

Utilizando funções de pertinência trapezoidais temos os conjuntos nebulosos para espessura e altura, mostrados nas FIG. 3.13 e FIG. 3.14, respectivamente.

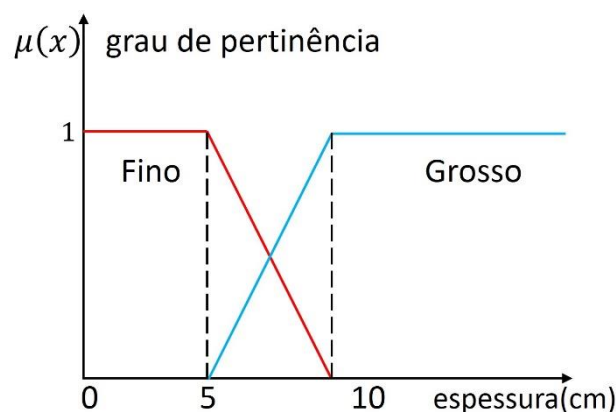


FIG. 3.13 Funções de Pertinência para Espessura, para Exemplo

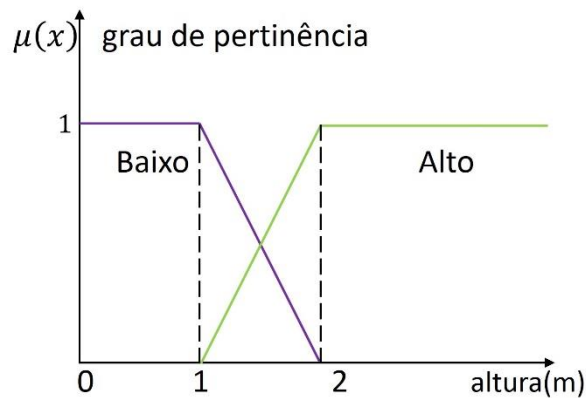


FIG. 3.14 Funções de Pertinência para Altura, para Exemplo

Agora, considerando como variável de entrada do sistema, um objeto com altura de 1,5 m e espessura de 3 cm, são ativadas apenas as regras 1 e 3. Então podemos definir o valor de ativação da regra e calcular a saída final do sistema, como ilustrado na FIG. 3.15.

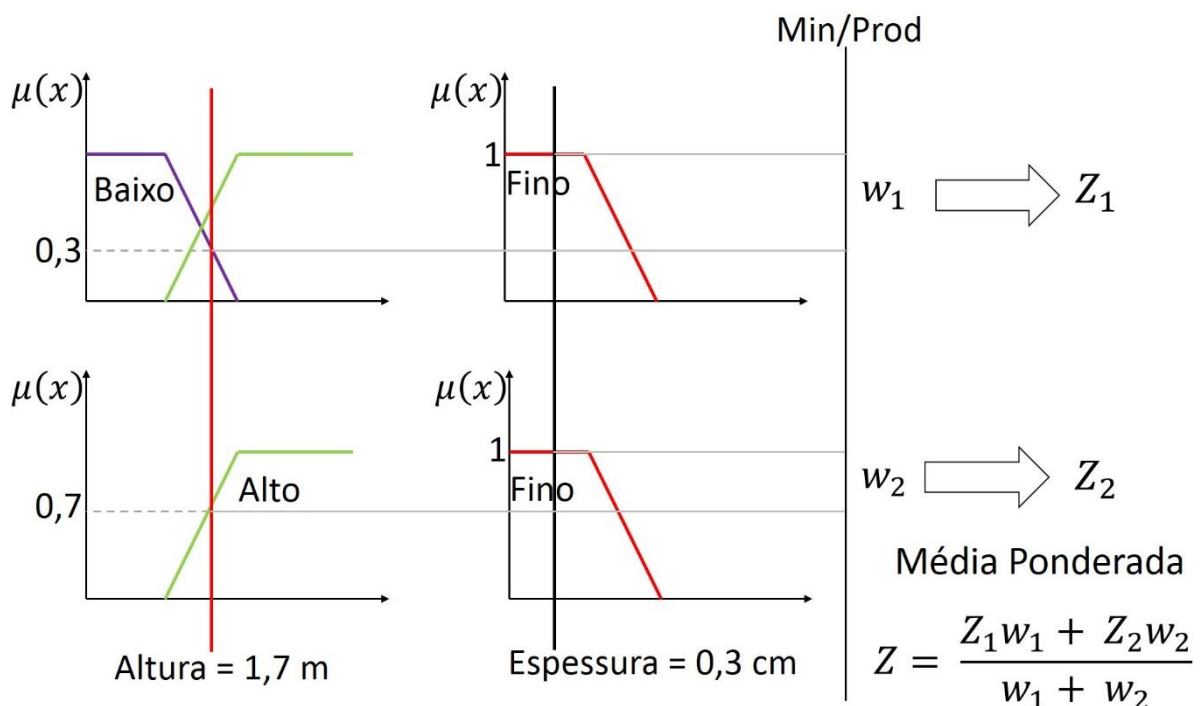


FIG. 3.15 Modelo TSK Aplicado a um Exemplo

Os graus de pertinência a cada conjunto são obtidos pela EQ. 3.1. Nesse caso, utilizar o mínimo ou o produto para encontrar os graus de ativação de cada regra não faz diferença já que o grau de pertinência ao conjunto fino é igual a 1.

Em casos onde a saída de cada regra é representada por uma função, os parâmetros desta devem ser devidamente estimados por meio de um alto grau de

conhecimento do sistema ou por algum método de estimativa de parâmetros. Aqui é abordada o método da Estimativa de Mínimos Quadrados Recursiva (MQR).

3.1.3.1 ESTIMATIVA DE MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVA

Segundo considerações de Jang et. al. (1997), em geral no problema dos mínimos quadrados, a saída de um modelo linear y é dada pela expressão linearmente parametrizada

$$y = \theta_1 f_1(u) + \theta_2 f_2(u) + \dots + \theta_n f_n(u) \quad \text{EQ. 3.4}$$

Onde u é o vetor da entrada do modelo, f_1, \dots, f_n , são funções conhecidas de u , sendo u a entrada do modelo, e $\theta_1, \dots, \theta_n$ são parâmetros desconhecidos a serem estimados.

Para estimar os parâmetros é necessário conhecer pares de dados de entrada e saída para a realizar o treinamento do sistema, de forma a obter um sistema de equações. Em notação de matriz esse sistema pode ser escrito por

$$A\theta = y \quad \text{EQ. 3.5}$$

Onde θ é o vetor de parâmetros desconhecidos $n \times 1$, y é o vetor de saídas $n \times 1$, e A é uma matriz $m \times n$ (chamada às vezes a matriz de projeto), sendo m a quantidade de pares de dados conhecidos e n o número de parâmetros desconhecidos.

$$A = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \dots & f_n(u_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(u_m) & \dots & f_n(u_m) \end{bmatrix} \quad \text{EQ. 3.6}$$

Dessa forma a estimativa de mínimos quadrados pode ser expressa por

$$\theta_k = (A^T A)^{-1} A^T y \quad \text{EQ. 3.7}$$

Para que se possa calcular os parâmetros desconhecidos de forma recursiva e utilizando todos os pares de dados conhecidos utiliza-se:

$$P_{k+1}P_k - \frac{P_k a_{k+1} a_{k+1}^T P_k}{1 + a_{k+1}^T P_k a_{k+1}} \quad \text{EQ. 3.8}$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + P_{k+1} a_{k+1} (y_{k+1} - a_{k+1}^T \theta_k) \quad \text{EQ. 3.9}$$

Onde a^T são os pares de dados, k varia de 0 a $(m - 1)$ e a estimativa total $\hat{\theta}$ é igual a θ_m , a estimativa usa todos os m pares de dados.

3.1.4 SISTEMAS DE CONTROLE NEBULOSO

A teoria de controle clássica apresenta certas limitações no tratamento de processos complexos, causados por suas não-linearidades e comportamento variante no tempo. Entretanto, operadores experientes conseguem controlar esses processos baseados em conhecimentos adquiridos sobre seu funcionamento. Essa estratégia de controle é baseada em informações imprecisas e/ou incertas e, geralmente, pode ser expressa em termos linguísticos, isto é, características existentes no processo. Os sistemas nebulosos baseiam-se na representação do conhecimento e inferência de novos conhecimentos, técnica similar à forma com que os seres humanos expressam seu conhecimento e raciocínio (COELHO ET. AL., 2007).

Netto (2005) apresenta uma possível estrutura para um sistema de controle nebuloso envolvendo três etapas (FIG. 3.16). A nebulização utiliza funções de pertinência predefinidas para relacionar valores reais de entrada à conjuntos nebulosos correspondentes. Em seguida é realizado o processo de inferência, onde é avaliada a base de regras, fazendo uma associação com o grau de pertinência, possibilitando definir a força de cada regra, ou grau de ativação. E por último, quando necessário é feito o processo de desnebulização, que calcula as saídas do sistema baseado na força de cada regra e no grau de pertinência, transformando a saída novamente em um valor real que possa ser interpretado pelo sistema.

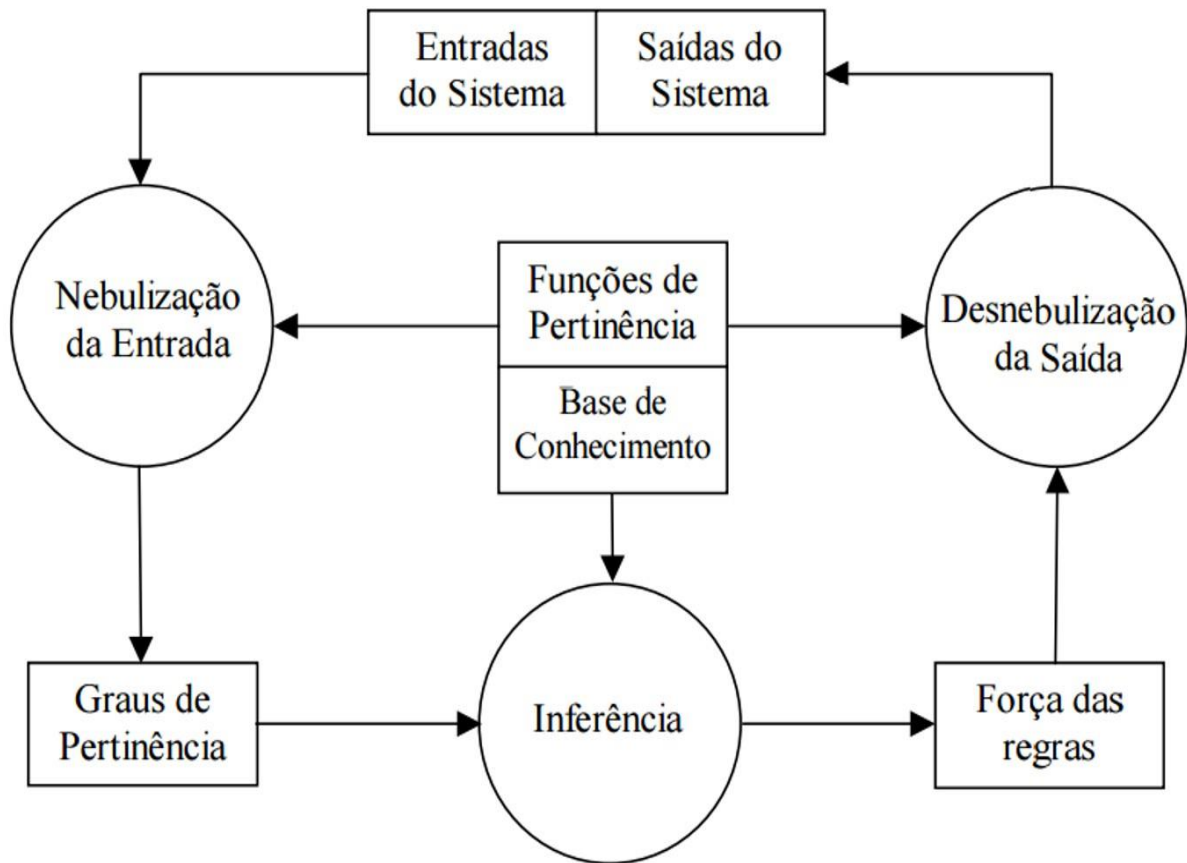


FIG. 3.16 Estrutura Básica de um Controlador Nebuloso (Netto, 2005)

Esse tipo de controle é aplicado principalmente a sistemas com características vagas e complexas, com entradas e saídas contínuas, que são difíceis ou não apresentam um modelo matemático eficiente. Sempre buscando representar o conhecimento humano, como uma forma de inteligência artificial (MARRO ET. AL, 2010).

3.2 MODELO MUSCULAR DE HILL

Para o cálculo da força do músculo monitorado, neste trabalho, é utilizado o Modelo Muscular de Hill desenvolvido por Winters (1985), citado por Ramos (2013), que inclui uma versão melhorada do modelo.

Neste modelo é utilizado um esquema com três elementos, um elemento passivo paralelo (PE), um elemento passivo série (SE) e um elemento de contração ativo (CE), conforme mostrado na FIG. 3.17.

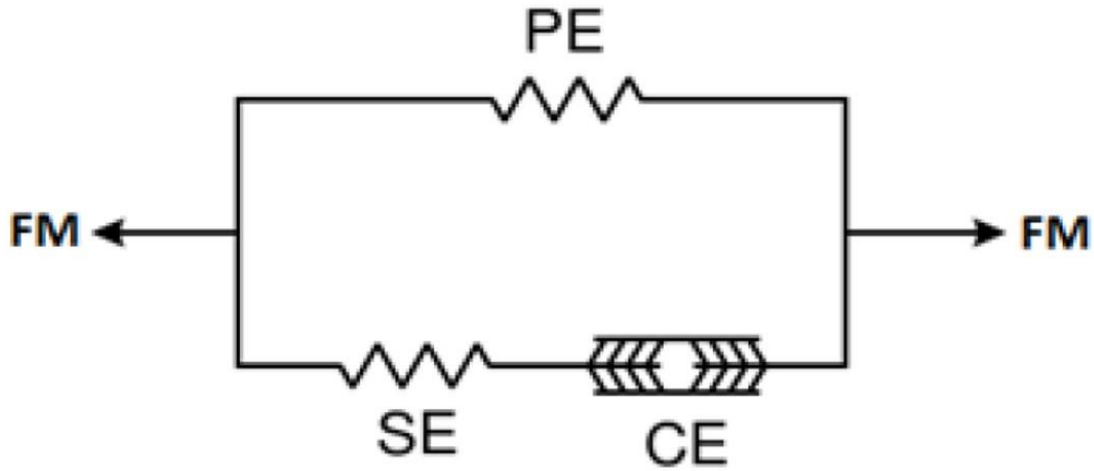


FIG. 3.17 Modelo de Três Elementos de Hill (Ramos, 2013)

Esse modelo estima a força muscular exercida utilizando o sinal EMG e os parâmetros cinemáticos do músculo monitorado.

Da FIG. 3.17 observa-se três relações: deslocamentos paralelos têm o mesmo deslocamento L , elementos em série são submetidos ao mesmo carregamento F e a força total F_M desenvolvida pelo músculo é dada pela soma das forças dos elementos em paralelo. Essas relações são expressas, respectivamente, por

$$L_{PE} = L_{CE} + L_{SE} \quad \text{EQ. 3.10}$$

$$F_{SE} = F_{CE} \quad \text{EQ. 3.11}$$

$$F_M = F_{PE} + F_{CE} = F_{PE} + F_{SE} \quad \text{EQ. 3.12}$$

Os elementos PE e SE representam o tecido conectivo flexível incluindo o tendão e as fibras musculares inativas. E suas relações entre força e extensão nestes são dadas por

$$F_{PE} = \frac{F_{PEmax}}{(e^{S_{PE}})} \left[e^{\frac{S_{PE} \Delta L_{PE}(t)}{\Delta L_{PE}}} - 1 \right] \quad \text{EQ. 3.13}$$

$$F_{SE} = \frac{F_{SEmax}}{(e^{S_{SE}})} \left[e^{\frac{S_{SE} \Delta L_{SE}(t)}{\Delta L_{SE}}} - 1 \right] \quad \text{EQ. 3.14}$$

Onde F_{max} é a força máxima que o elemento suporta, S é o parâmetro relacionado com a rigidez muscular, e ΔL e L_{max} são a contração atual e máxima respectivamente.

A força F_{CE} do elemento de contração ativo é dada em função da ativação neural $a(t)$, nível de intensidade do sinal EMG, a força máxima que pode ser produzida pelo elemento F_{CEmax} e as curvas normalizadas adimensionais de relação força-comprimento $f_l(t)$ e força-velocidade $f_v(t)$. Assim,

$$F_{CE} = a(t) \cdot f_l(t) \cdot f_v(t) \cdot F_{CEmax} \quad \text{EQ. 3.15}$$

$$a(t) = \frac{A^{u(t)} - 1}{A - 1} \quad \text{EQ. 3.16}$$

Onde $u(t)$ é o sinal EMG amplificado e A define o grau de não-linearidade da relação

$$f_l(t) = \exp\left(-0,5 \left(\frac{\frac{\Delta L_{CE}(t)}{L_{CEo}} - \varphi_m}{\varphi_v}\right)^2\right) \quad \text{EQ. 3.17}$$

$$f_v(t) = \frac{0,1433}{0,1074 + \exp\left(-1,3 \sinh\left(2,8 \frac{V_{CE}(t)}{V_{CEo}(t)} + 1,64\right)\right)} \quad \text{EQ. 3.18}$$

Em que φ_m e φ_v são parâmetros da modelagem gaussiana da relação entre força e velocidade, L_{CEo} é o comprimento de fibra ótimo, quando é possível desenvolver a força máxima do músculo F_{CEmax} , V_{CE} é a velocidade de contração e V_{CEo} é a velocidade ótima dependente do nível de ativação neural, calculado por

$$V_{CEo}(t) = 0,5 (a(t) + 1) V_{CEmax} \quad \text{EQ. 3.19}$$

Algumas relações úteis entre os parâmetros são dadas a seguir,

$$V_{CEmax} = 2 L_{CEo} (1 + 4\alpha) \quad \text{EQ. 3.20}$$

$$F_{PEmax} = 0,05 F_{CEmax} \quad \text{EQ. 3.21}$$

$$\Delta L_{PEmax} = L_{max} - (L_{CEo} + L_{Ts}) \quad \text{EQ. 3.22}$$

$$F_{SEmax} = 1,3 F_{CEmax} \quad \text{EQ. 3.23}$$

$$\Delta L_{SEmax} = 0,03 L_{Ts} \quad \text{EQ. 3.24}$$

$$\Delta L_{CE} = L_{CE}(t) - L_{CEo} \quad \text{EQ. 3.25}$$

As constantes α , L_{max} e L_{Ts} são a porcentagem de fibras rápidas atuantes, o máximo comprimento do músculo e o comprimento do tendão, respectivamente.

Para obter o comprimento instantâneo do músculo L_{CE} e a velocidade de contração V_{CE} Ramos (2013) partiu da hipótese de que comprimento do músculo varia de acordo com o ângulo da articulação com uma função polinomial do terceiro grau. Essa hipótese também é utilizada nesse trabalho, assim tem-se

$$L_{CE}(\theta(t)) = a_3\theta(t)^3 + a_2\theta(t)^2 + a_1\theta(t) + a_0 \quad \text{EQ. 3.26}$$

E a velocidade de contração é obtida diferenciando a EQ. 3.26 em relação ao tempo,

$$V_{CE}(\theta(t), \dot{\theta}(t)) = 3a_3\theta(t)^2\dot{\theta}(t) + 2a_2\theta(t)\dot{\theta}(t) + a_1\dot{\theta}(t) \quad \text{EQ. 3.27}$$

As EQ. 3.16 até EQ. 3.27 são resolvidas com os parâmetros do músculo com a finalidade de tornar possível calcular as forças em cada elemento do esquema considerado (PE, SE e CE) e então com os valores de F_{PE} , F_{CE} e F_{SE} é possível obter a força muscular exercida pelo músculo monitorado usando a EQ. 3.12.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é mostrado todo o desenvolvimento proposto neste trabalho. São detalhadas as características dos principais componentes do sistema pneumático utilizado, os modelos físicos da válvula e do atuador pneumático escolhidos (válvulas eletropneumáticas *on-off* 3/2 vias (3 vias e 2 posições do modelo SOV 23 SOS NC, série 70, fabricadas pela Metal Work®, e o músculo pneumático do modelo MAS-20-200 fabricado pela FESTO®), o desenvolvimento e implementação dos modelos de controle propostos e a realização dos testes em bancada.

4.1 VÁLVULAS ELETROPNEUMÁTICAS ON-OFF 3/2 VIAS

Para acionamento do PAM, neste trabalho, são utilizadas válvulas eletropneumáticas *on-off* servo assistidas acionadas por solenoides de 3 vias e 2 posições, com vias de 1/8 polegadas de diâmetro, do modelo SOV 23 SOS NC, série 70, fabricadas pela Metal Work® (FIG. 4.1), com retorno por mola mecânica, normalmente fechadas.



FIG. 4.1 Válvula Eletropneumática 3/2 vias (catálogo Metal Work, 2017)

Essa válvula possui tempo de acionamento de 15 ms, 35 ms de retorno e pressão mínima de atuação de 2,5 bar (METAL WORK, 2016).

Para seu acionamento é utilizada uma solenoide de 110 V.

O esquema representativo de válvulas 3/2 vias com acionamento por solenoide e retorno por mola é apresentado na FIG. 4.2.

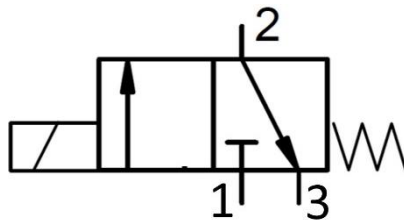


FIG. 4.2 Esquema Representativo de Válvulas *on-off* 3/2 Acionadas por Solenoide e com Retorno por Mola (catálogo Metal Work, 2017)

O número de quadrados representa a quantidade de posições permitidas pela válvula, as setas indicam o caminho da passagem do fluxo de ar comprimido, não necessariamente indicando seu sentido.

A via representada pelo número 1 é a via de alimentação, a de número 2 é a via de trabalho e a 3 a via de exaustão. O símbolo "T" representa o fechamento da via na posição analisada.

Assim, o funcionamento da válvula ocorre de forma que enquanto permanecer desligada, isto é, sem receber nenhuma tensão elétrica, a via 1 permanece bloqueada impedindo o fluxo de ar comprimido, sendo o fluxo permitido apenas para exaustão seguindo da via 2 para a 3. Essa passagem permanece liberada nas duas posições possíveis dessa válvula, em ambos os sentidos. Quando acionada, ou seja, quando recebe impulso elétrico, a via 1 é liberada, em um tempo de 15 ms dado seu tempo de acionamento, e o fluxo segue direto para a via 2.

Como essa válvula possui retorno por mola, para voltar a bloquear a via 1 basta suspender o sinal elétrico, isso ocorre em um tempo de 35 ms dado seu tempo de retorno, não necessitando de um segundo comando.

A pressão mínima de trabalho (2,5 bar) indica que pressões com valor inferior a este, não passam pelas vias, ou seja, o fluxo é contido devido à fatores como o atrito por exemplo, de forma que a baixa pressão do fluido não produz força suficiente para vencer o atrito existente no interior da válvula.

Cada tipo de válvula possui uma taxa de fluxo ou vazão que varia de acordo com a pressão de entrada e saída. A FIG. 4.3 apresenta o gráfico da vazão mássica da válvula em estudo.

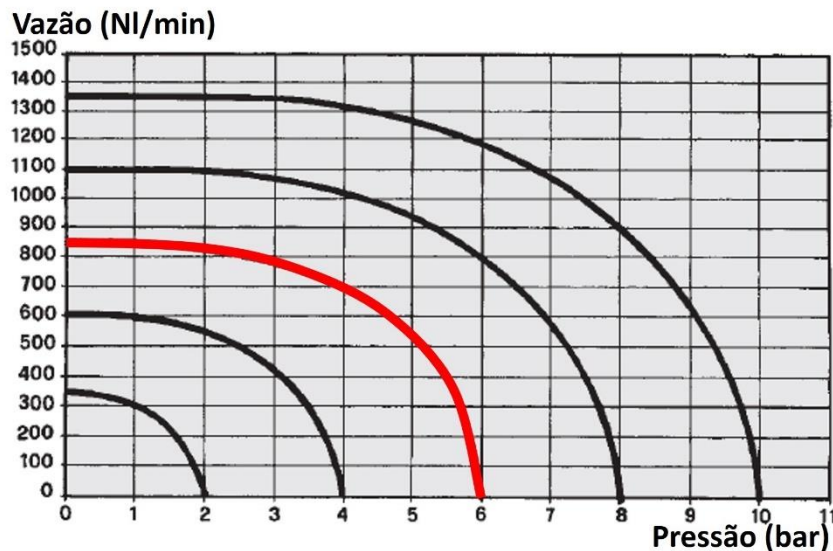


FIG. 4.3 Gráfico de Vazão da Válvula *on-off* 3/2 (catálogo Metal Work, 2017)

A vazão tende a zero à medida que a pressão de saída da válvula se aproxima à pressão de entrada. Quanto maior a pressão de entrada maiores os valores da vazão no início do escoamento. Neste trabalho é utilizada uma pressão de entrada constante de 6 bar. Dessa forma a curva de interesse é a que está marcada em vermelho.

Com essa variação na taxa de fluxo ocorre também uma mudança na forma de escoamento do ar comprimido. Existem três tipos de escoamentos: sônico saturado, sônico e subsônico, que são definidos pela razão de pressões crítica ($b_v = 0.32$, para o modelo de válvula utilizado neste estudo, segundo o fabricante). Assim o tipo de escoamento é dado por

$$\text{Escoamento subsônico,} \quad P_2/P_1 < b_v \quad \text{EQ. 4.1}$$

$$\text{Escoamento sônico,} \quad P_2/P_1 = b_v \quad \text{EQ. 4.2}$$

$$\text{Escoamento sônico saturado,} \quad P_2/P_1 > b_v \quad \text{EQ. 4.3}$$

Em que P_1 é a pressão na entrada da válvula e P_2 é a pressão na saída da válvula.

4.2 MÚSCULO PNEUMÁTICO

O músculo pneumático utilizado neste trabalho é do modelo MAS-20-200 fabricado pela FESTO®, FIG. 4.4.

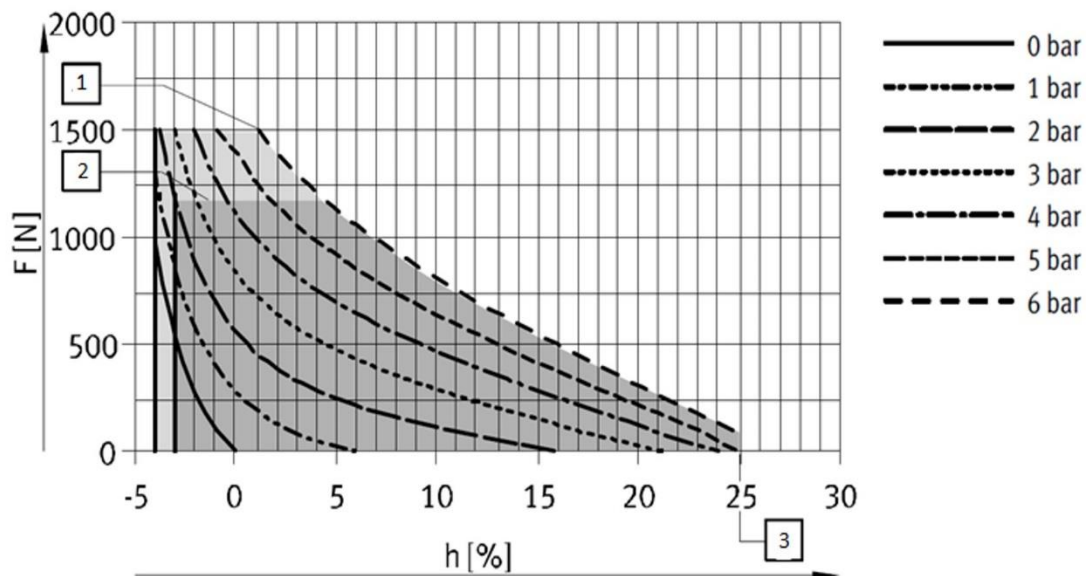


FIG. 4.4 Músculo Pneumático, modelo MAS-20-200 (catálogo FESTO, 2017)

Esse modelo possui um comprimento nominal de 20 cm e diâmetro de 2 cm. Foi escolhido devido à sua disponibilidade no LPM do IME.

O músculo pneumático é um tubo elástico que se contrai quando inserida uma pressão em seu interior, desenvolvendo força máxima no início de sua contração e ao final tende a zero.

A faixa de operação, que relaciona a força e a pressão no interior do PAM, específica para o modelo em estudo é mostrada na FIG. 4.5.



- 1 Força teórica (1500 N) para a pressão máxima de operação
- 2 Força máxima de operação (1200 N)
- 3 Máxima Contração

FIG. 4.5 Faixa de Operação do Músculo Pneumático MAS-20-200 (adaptado de catálogo FESTO, 2017)

Com a pressão máxima de trabalho é de 6 bar, é atingida uma contração máxima de 25% do comprimento nominal, equivalente a 5 cm.

4.3 MODELAGEM DE VÁLVULAS ON-OFF

Normalmente, a estrutura interna de uma válvula solenoide *on-off* não é conhecida pelo usuário e não é facilmente medida. Assim um modelo que considera as componentes dos subsistemas elétricos, magnéticos e mecânicos não é muito eficiente. Em geral, são utilizadas as equações termodinâmicas para escoamento de um fluido através de um orifício, para modelagem de válvulas solenoides, considerando um processo adiabático, ausência de perdas e bocal convergente. (JOUPPILA ET. AL., 2010).

No entanto, o autor afirma que essas equações funcionam apenas enquanto os efeitos de atrito e compressibilidade do fluido são insignificantes, ou seja, durante o escoamento sônico saturado, já que a taxa de perdas das válvulas comerciais faz com que a pressão crítica seja diferente para cada tipo de válvula considerado. De forma que essas equações não são eficientes para a modelagem de uma válvula solenoide *on-off* 3/2 vias, o mesmo tipo de válvula utilizado neste trabalho.

Assim, para modelagem da válvula eletropneumática *on-off* 3/2 vias, são utilizadas as equações propostas por Jouppila et. al. (2010) que consideram uma taxa de fluxo constante durante o escoamento sônico, e diminuindo com comportamento quadrático aproximado a um quarto de elipse durante o escoamento subsônico. Assim,

$$\dot{m} = \begin{cases} C_v A_R \frac{P_1}{\sqrt{RT}} & \text{se } \frac{P_2}{P_1} \leq b_v \\ C_v A_R \frac{P_1}{\sqrt{RT}} \sqrt{1 - \left(\frac{\left(\frac{P_2}{P_1} - b_v \right)}{1 - b_v} \right)^2} & \text{se } \frac{P_2}{P_1} > b_v \end{cases} \quad \text{EQ. 4.4}$$

Onde C_v é o coeficiente de descarga, A_R é a área do orifício de saída, R é a constante dos gases igual a 287 J/kg/K, P_1 a pressão de entrada, P_2 a pressão de saída e T é a temperatura do fluido na entrada da válvula igual a 293,15 K.

O coeficiente de descarga das válvulas utilizadas neste estudo é $2,083 \cdot 10^{-10}$ m³/s.bar, segundo o fabricante, assim a taxa de fluxo é dada em m³/s.

Esse modelo foi escolhido por ser de fácil implementação, utilizando parâmetros da válvula facilmente estabelecidos, além de o autor ter utilizado uma válvula com as mesmas características das empregadas neste trabalho.

4.4 MODELAGEM DO MÚSCULO PNEUMÁTICO

Morgado Junior (2011) reinterpreta a modelagem de um músculo cardíaco simplificado, proposto por Fung (1993), considerando um modelo mola amortecedor em paralelo. A equação que representa o modelo é dada por

$$M\ddot{X} + B\dot{X} + KX = F \quad \text{EQ. 4.5}$$

$$F = F_{ce} - F_{ext} \quad \text{EQ. 4.6}$$

Onde K é a constante elástica, B é a constante de amortecimento (B = 5000), F_{ce} é a força de contração do músculo, F_{ext} é a força externa aplicada na extremidade livre do músculo pneumático, M é massa imposta ao sistema, X é o deslocamento do atuador e F é a força exercida pelo atuador.

Com a finalidade de simplificar o cálculo, Morgado Junior (2011) utiliza uma abordagem que usa a transformada de Laplace com uma simplificação que retira a inércia do sistema. Com isso o deslocamento do PAM pode ser calculado por

$$X(t) = \frac{F}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{B}t} \right) \quad \text{EQ. 4.7}$$

A constante de elasticidade é calculada em função da pressão (P) por

$$K = \begin{cases} 2288 P + 7711,7 & \text{se } P \leq 4,5 \text{ bar} \\ 1547,4 P + 10816 & \text{se } P > 4,5 \text{ bar} \end{cases} \quad \text{EQ. 4.8}$$

E a força de contração pode ser calculada, também em função da pressão, pela mesma equação utilizada por Serres (2008),

$$F_{ce} = \begin{cases} 229 P & \text{se } P \leq 2 \text{ bar} \\ 179,2 + 139 P & \text{se } P > 2 \text{ bar} \end{cases} \quad \text{EQ. 4.9}$$

Esse modelo foi escolhido principalmente por ser representado também em função do tempo e por ser de fácil implementação.

4.5 SISTEMAS IMPLEMENTADOS

Neste tópico é feita uma apresentação detalhada de como são desenvolvidos os sistemas de controle para sua implementação.

De uma forma geral a implementação é feita conforme mostrado no fluxograma da FIG. 4.6.

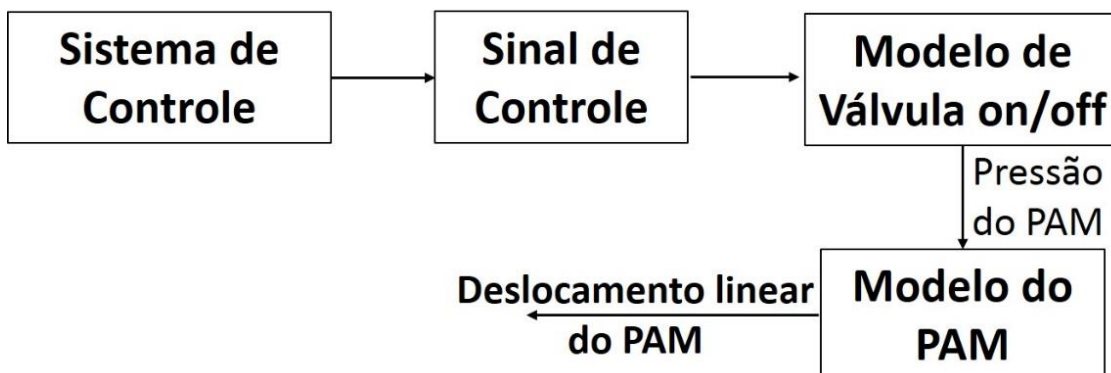


FIG. 4.6 Fluxograma de Implementação do Sistema

Onde os sistemas de controle são os dois modelos propostos: Controle Nebuloso e Controle com MMR, que funcionam conforme ilustrado nas FIG. 3.4 e FIG. 3.5, respectivamente.

Na implementação o sinal de controle é representado por um sinal binário, onde 1 indica válvula acionada e 0 válvula desligada.

São utilizadas duas válvulas dispostas em série, conforme ilustrado na FIG. 2.3, de forma que para inflar o atuador apenas a válvula A deve ser acionada. Para

descarregá-lo, apenas a válvula B deve ser acionada. E para interromper o fluxo de ar comprimido deve-se manter as duas válvulas desligadas.

Assim, quando a válvula recebe sinal 0, é calculada a pressão no atuador usando o modelo de válvulas *on-off*; quando o sinal é 1, é mantida a pressão constante.

➤ Modelo de Válvulas *on-off*

Para modelar as válvulas *on-off* 3/2 vias é utilizado o modelo proposto por Jouppila et. al. (2010). O modelo é utilizado de forma inversa para que se possa obter a pressão na saída da válvula.

Assim, a equação utilizada para modelagem é a inversa da EQ. 4.4, dada por

$$P_2 = \begin{cases} \frac{\dot{m} \sqrt{RT}}{C_v A_R} & \text{se } \frac{P_2}{P_1} \leq b_v \\ \left[\left(1 - \frac{\dot{m} \sqrt{RT}}{C_v A_R P_1} \right)^2 (1 - b_v) + b_v \right] P_1 & \text{se } \frac{P_2}{P_1} > b_v \end{cases} \quad \text{EQ. 4.10}$$

➤ Modelo do PAM

A pressão na saída da válvula corresponde à pressão no interior do PAM. Pode-se utilizar essa correspondência uma vez que a tubulação que liga a válvula ao atuador é de tamanho consideravelmente pequeno, resultando em uma perda de carga que pode ser desconsiderada no modelo.

É então utilizado o modelo proposto por Morgado Junior (2011), de onde se obtém a saída do sistema, o deslocamento linear do atuador ao longo do tempo.

4.5.1 SISTEMA DE CONTROLE NEBULOSO

Este modelo de controle calcula o tamanho dos pulsos que devem ser emitidos pelas válvulas para que o atuador se movimente com o tempo de referência prescrito. Para isso é utilizado um controlador nebuloso que fornece o tempo necessário para que o PAM seja inflado e descarregado com a pressão de trabalho, estabelecida em 6 bar, segundo recomendações do fabricante.

O controlador nebuloso recebe como entradas a carga imposta ao sistema e a pressão de trabalho (6 bar), fornecendo como saídas os tempos necessários para que o PAM seja inflado e descarregado.

Inicialmente são criadas as funções de pertinência triangulares de entrada para a carga e pressão, com cinco e quatro conjuntos nebulosos, conforme apresentado nas FIG. 4.7 e FIG. 4.8, respectivamente.

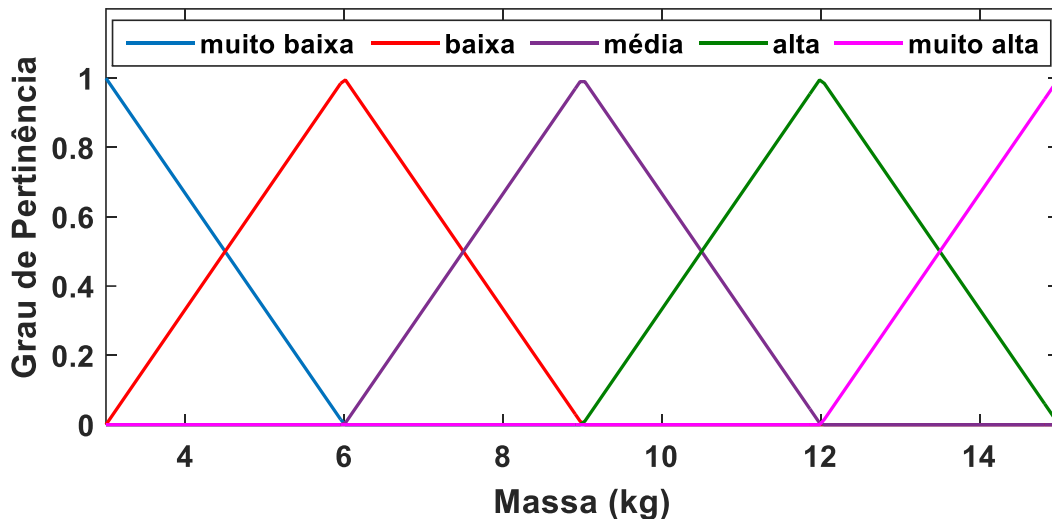


FIG. 4.7 Funções de Pertinência para Massa

As funções de pertinência de carga são criadas em um universo de discurso com valores de 0 à 15 kg, uma vez que compreende os valores de massa que são utilizados nos testes (5, 10 e 15 kg).

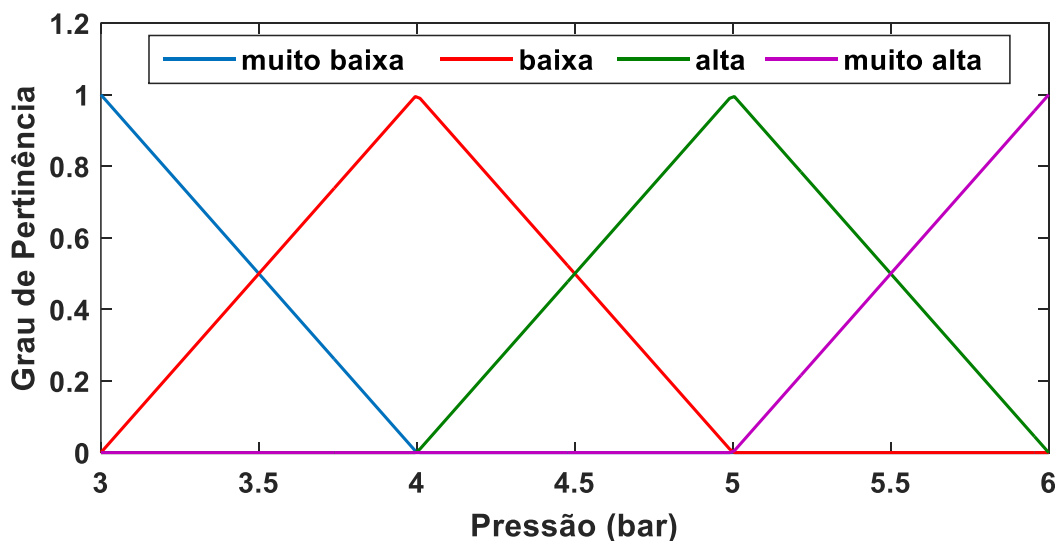


FIG. 4.8 Funções de Pertinência para Pressão

Apesar de ser utilizada apenas a pressão de trabalho igual a 6 bar, o controlador foi desenvolvido para pressões de 3 a 6 bar, para a possibilidade de estudos futuros. Se inicia em 3 bar pois, segundo Pedrosa (2015) e Morgado Junior (2011), o PAM não apresenta um bom funcionamento com pressões inferiores a esse valor. Outro motivo é a pressão de atuação mínima da válvula ser igual a 2,5 bar.

Para desenvolver o sistema de inferência são realizados experimentos onde o atuador é inflado até atingir a pressão de trabalho, mantido nessa posição por dois segundos e descarregado, com cargas de 3, 6, 9, 12 e 15 kg.

Os resultados obtidos são apresentados por meio de gráficos da pressão do atuador em função do tempo na FIG. 4.9.

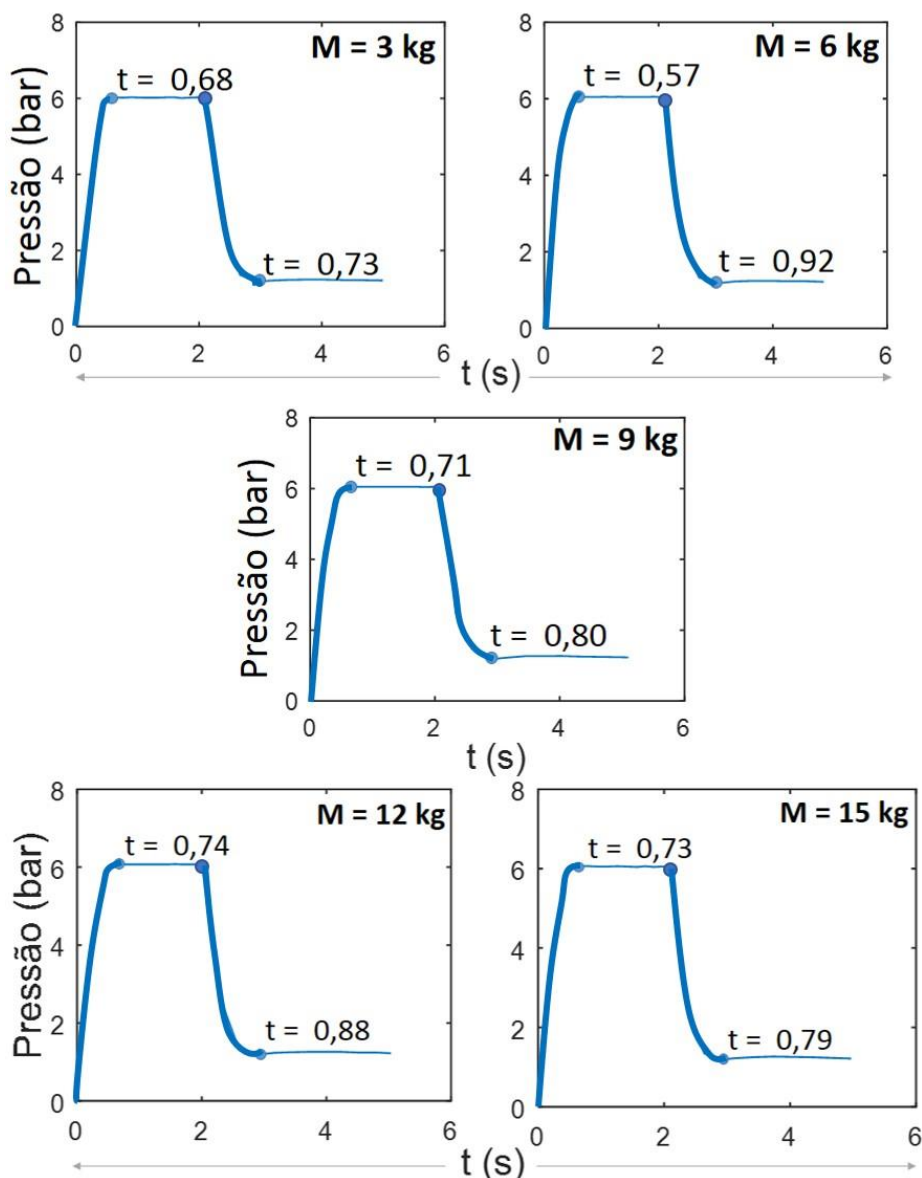


FIG. 4.9 Gráficos Pressão do PAM x Tempo

Analisando os gráficos é possível observar que o atuador é inflado até atingir a pressão de trabalho (6 bar), no entanto ao ser descarregado não atinge a pressão de 0 bar novamente, não sendo totalmente descarregado.

Isso ocorre devido ao uso de duas válvulas dispostas em série, conforme mostrado na FIG. 2.3, onde a via 1 da válvula B é responsável por realizar a exaustão do PAM e as válvulas utilizadas neste estudo possuem pressão mínima de atuação de 2,5 bar, não permitindo o total descarregamento do músculo pneumático.

Com os dados de tempo coletados, é possível descrever os consequentes das regras lógicas do sistema de inferência. As TAB. 4.1 e TAB. 4.2, apresentam a inferência inicialmente utilizada para inflar e descarregar o PAM, respectivamente.

TAB. 4.1 Sistema de Inferência para Inflar o PAM

Conjuntos		Massa				
		Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Pressão	Muito Baixa	0,30	0,20	0,34	0,38	0,38
	Baixa	0,38	0,28	0,42	0,46	0,45
	Alta	0,48	0,38	0,52	0,55	0,55
	Muito Alta	0,68	0,57	0,71	0,74	0,73
		Tempo (s)				

TAB. 4.2 Sistema de Inferência para Descarregar o PAM

Conjuntos		Massa				
		Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Pressão	Muito Baixa	0,48	0,64	0,49	0,56	0,49
	Baixa	0,56	0,74	0,59	0,67	0,60
	Alta	0,65	0,83	0,72	0,78	0,71
	Muito Alta	0,73	0,92	0,80	0,88	0,79
		Tempo (s)				

Para desenvolvimento do controlador nebuloso é utilizado o modelo TSK, que tem como saída valores reais dados por uma função. Os coeficientes das funções de saída são estimados usando a estimativa de mínimos quadrados recursiva (MQR) com uma aproximação a um polinômio de sexta ordem. Assim os sistemas de inferência mostrados nas TAB. 4.1 e TAB. 4.2 são utilizados apenas para realização do treinamento do sistema na estimativa MQR, para definição dos coeficientes das funções de saída.

As TAB. 4.3 e TAB. 4.4 apresentam os coeficientes encontrados pela estimativa MQR para inflar e descarregar o PAM, respectivamente.

TAB. 4.3 Coeficientes da Estimativa MQR para inflar o PAM

Pressão (bar)	Coeficientes						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3	$1,9 \text{ e}^{-6}$	$-8,9 \text{ e}^{-5}$	$1,5 \text{ e}^{-3}$	$-9,7 \text{ e}^{-3}$	$3,0 \text{ e}^{-3}$	0,19	-0,15
4	$1,5 \text{ e}^{-6}$	$-6,7 \text{ e}^{-5}$	$9,8 \text{ e}^{-4}$	$-3,9 \text{ e}^{-3}$	-0,03	0,28	-0,14
5	$1,4 \text{ e}^{-6}$	$-5,7 \text{ e}^{-5}$	$7,1 \text{ e}^{-4}$	$-2,8 \text{ e}^{-4}$	-0,05	0,35	-0,13
6	$1,4 \text{ e}^{-6}$	$-5,9 \text{ e}^{-5}$	$7,6 \text{ e}^{-4}$	$-8,6 \text{ e}^{-4}$	-0,05	0,36	0,04

TAB. 4.4 Coeficientes da Estimativa MQR para Descarregar o PAM

Pressão (bar)	Coeficientes						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3	$-7,2 \text{ e}^{-7}$	$1,9 \text{ e}^{-5}$	$2,5 \text{ e}^{-4}$	-0,013	0,15	-0,63	1,35
4	$-1,6 \text{ e}^{-6}$	$7,3 \text{ e}^{-5}$	$-1,0 \text{ e}^{-3}$	$2,6 \text{ e}^{-3}$	0,05	-0,32	1,06
5	$-2,4 \text{ e}^{-7}$	$-3,3 \text{ e}^{-6}$	$6,3 \text{ e}^{-4}$	-0,015	0,16	-0,61	1,46
6	$4,7 \text{ e}^{-7}$	$-3,9 \text{ e}^{-5}$	$1,3 \text{ e}^{-3}$	$-8,6 \text{ e}^{-4}$	-0,022	0,19	1,62

Com os coeficientes determinados é possível gerar o gráfico da saída tempo do controlador em função da pressão e carga, FIG. 4.10.

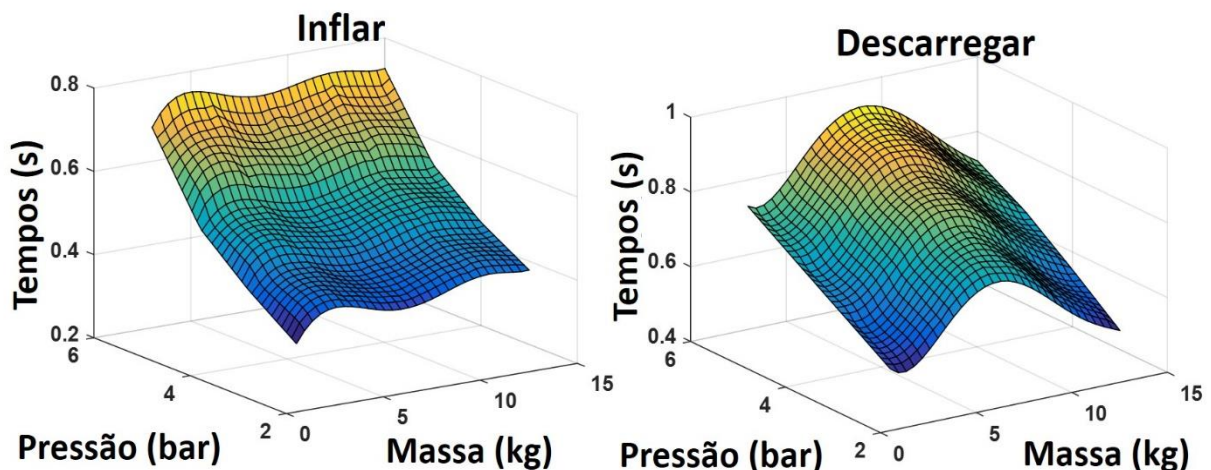


FIG. 4.10 Superfícies das Saídas (Tempo) do Controlador Nebuloso

Como nos experimentos é utilizada apenas a pressão de trabalho de 6 bar, são utilizadas apenas as curvas mostradas na FIG. 4.11.

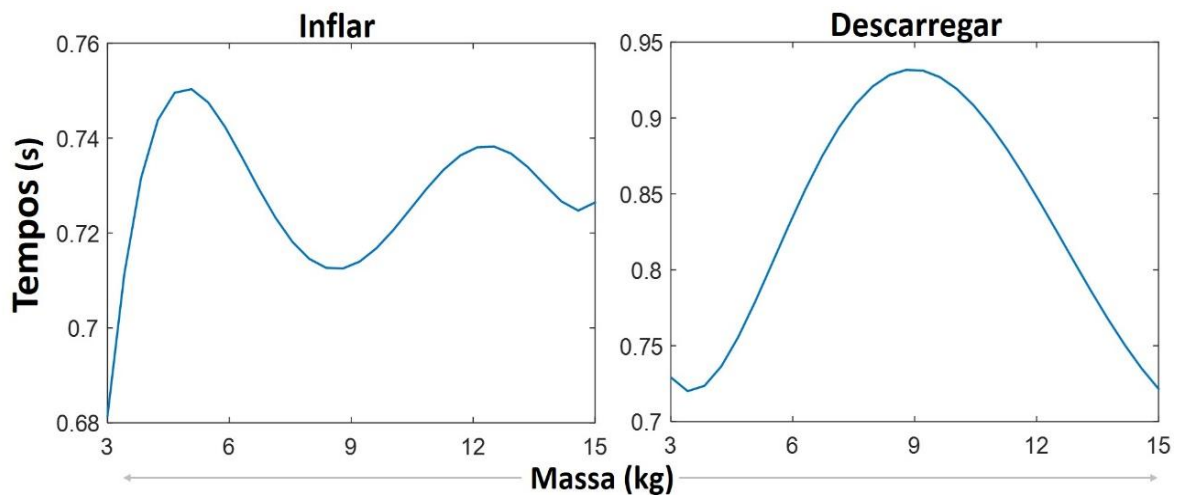


FIG. 4.11 Gráficos das Saídas (Tempo) do Controlador Nebuloso para Pressão de 6 bar

Como observado nas FIG. 4.10 e FIG. 4.11, o comportamento do atuador ao ser inflado e descarregado com diferentes cargas não é linear, nem proporcional à carga aplicada ao sistema. Isso ocorre devido ao fato de que a leitura dos dados é feita pelo MATLAB®, e a eficiência da programação depende da potência do computador que está sendo utilizado. Por isso essa variação nos tempos para inflar e descarregar o PAM é também causada devido à pequenos erros na leitura do tempo a cada instante. Essa desconformidade também ocorre devido à compressibilidade do ar e ao comportamento do atuador, devido as suas propriedades elásticas e de amortecimento. No entanto, trata-se apenas de milésimos de segundos, não produzindo erros significativos nos experimentos.

Em seguida é feito o cálculo do comprimento dos pulsos (L_{pulsos}), pela EQ. 4.11, levando em consideração a quantidade de pulsos a serem emitidos e o tempo de referência, tempo desejado para movimentação do PAM.

$$L_{pulsos} = \frac{T_{referência} - T_{controlador}}{n^{\circ} \text{ de pulsos}} \quad \text{EQ. 4.11}$$

onde $T_{referência}$ é o tempo desejado para a execução do movimento e $T_{controlador}$ é o tempo obtido do controlador nebuloso. Com isso, é possível criar o sinal de controle.

O comprimento dos pulsos calculados (L_{pulsos}) representa o tempo de pulso em que o atuador é inflado e descarregado; após a emissão desse pulso o fluxo de ar é interrompido durante 0,15 segundos, e assim consecutivamente.

4.5.2 SISTEMA DE CONTROLE COM MMR

Neste sistema de controle é utilizado o Modelo Muscular de Hill para estimar a força de um músculo fisiológico, referido aqui como músculo real, de forma que o PAM seja acionado, emitindo pulsos de ar comprimido pelas válvulas, sempre que a força muscular for maior que um valor predefinido em 30 N. Caso a força muscular seja menor que este valor, o atuador permanece em uma posição constante.

Neste estudo, considera-se o movimento do antebraço de uma pessoa ao manipular uma carga qualquer. Vale ressaltar que os valores utilizados neste trabalho não representam valores fisiológicos reais, foram estimados apenas para obtenção de uma força muscular que possa ser aplicada ao sistema de controle, com único objetivo de avaliar o comportamento do PAM.

Desse modo foram criadas funções com parâmetros escolhidos aleatoriamente, para representar o sinal EMG e o deslocamento angular do antebraço. Para representar o sinal EMG é utilizada uma função senoidal dependente do tempo,

$$\text{emg} = b_1 + b_2 \text{sen}(1.2467 t + \pi/2) \quad \text{EQ. 4.12}$$

Onde $b_1 = b_2 = 0,05$. De uma forma ilustrativa o sinal EMG é mostrado na FIG. 4.12.

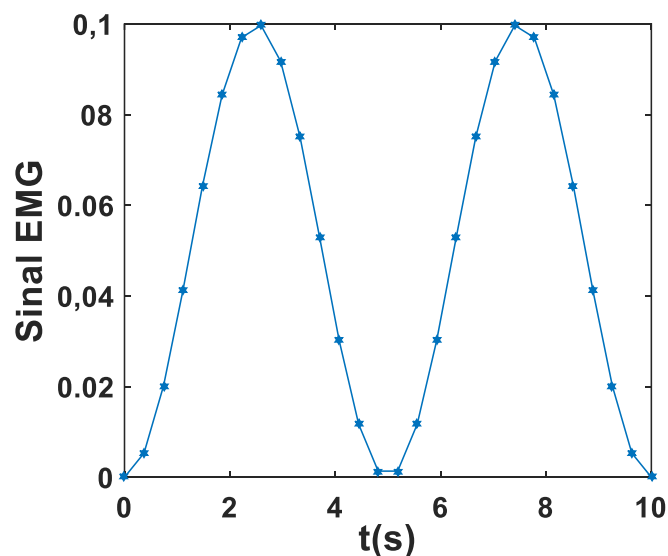


FIG. 4.12 Gráfico do Sinal Eletromiográfico Representativo

Para representar o deslocamento angular do antebraço é utilizada uma função polinomial de 2ª ordem também dependente do tempo,

$$\theta = c_1 t^2 + c_2 t - c_3 e^{-16} \quad \text{EQ. 4.13}$$

Onde $c_1 = -0,08$, $c_2 = 0,83$ e $c_3 = 6,4$. Para ilustrar a função tem-se a FIG. 4.13.

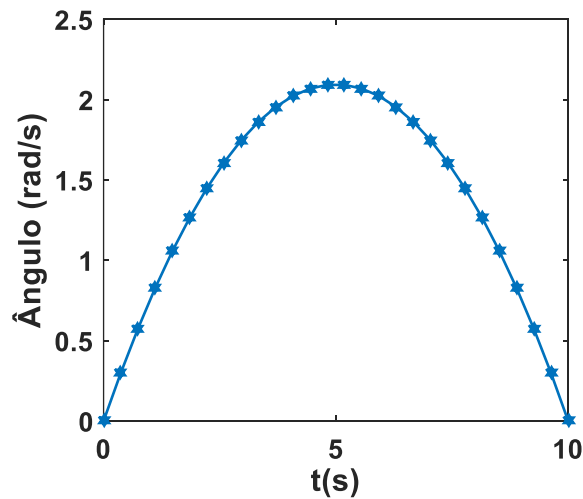


FIG. 4.13 Deslocamento Angular Representativo

A TAB. 4.5 apresenta os parâmetros utilizados para solução do modelo.

TAB. 4.5 Parâmetros para o Modelo de Hill

Parâmetros	
A	0,61
L_{CE0}	0,16591
F_{CEmax}	600
L_{max}	0,1893
L_{Ts}	0,9602
α	0,7426
φ_v	0,5624
φ_m	-0,0794
a_0	0,1133
a_1	-0,0074
a_2	-0,0113
a_3	0,00201
S_{PE}	0,8083
S_{SE}	0,9967

Com as entradas estabelecidas, sinal EMG e deslocamento angular do antebraço, e a definição dos parâmetros, o modelo tem como resultado a força muscular conforme apresentada na FIG. 4.14.

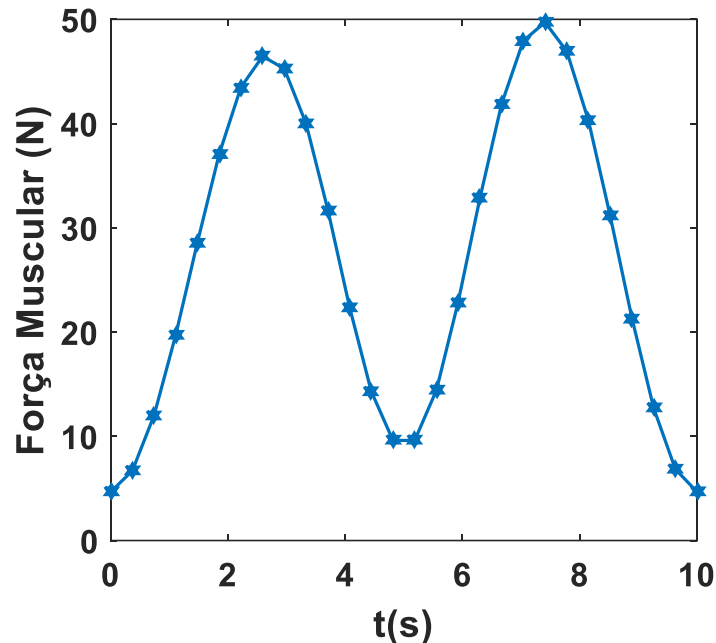


FIG. 4.14 Gráfico da Força Muscular

Dado que esta força muscular calculada é apenas representativa, não retratando a realidade, ela é utilizada para todos os experimentos com as diferentes cargas, já que se deseja apenas observar a resposta do sistema ao controlador, se o atuador é acionado corretamente quando a força é maior que 30 N.

4.6 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Para realização dos experimentos foi montada uma bancada de testes no LPM do IME, semelhante ao esquema mostrado na FIG. 2.3. O sistema utiliza duas válvulas eletropneumáticas *on-off* 3/2 vias, dispostas em série, para acionamento do músculo pneumático MAS-20-200. São utilizados um sensor de pressão e um potenciômetro para aquisição dos dados sobre o comportamento do atuador.

Para enviar os comandos de controle das válvulas e realizar a leitura dos sinais obtidos pelos sensores é utilizado um micro controlador Arduino UNO (FIG. 4.15),

que se comunica com o MATLAB® através da toolbox disponibilizada pela MathWorks™. A leitura é dada em Volts, em uma escala de 0 à 5 V.



FIG. 4.15 Micro controlador Arduino UNO (logicamecatronica.com)

O sensor de pressão utilizado é do modelo MPX5700 (FIG. 4.16), que permite leituras de até 7 bar.

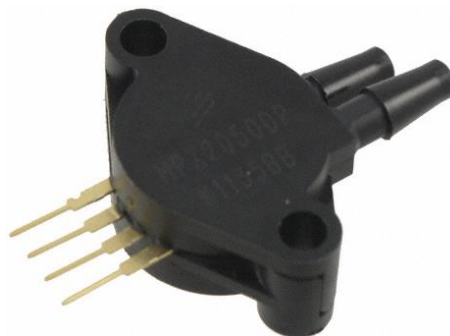


FIG. 4.16 Sensor de Pressão Manométrica MPX5700 (labdegaragem.com)

Martins (2012), realizou a calibração deste mesmo sensor, no entanto com o sinal lido em bytes resultando na pressão dada em KPa. Contudo, o MATLAB® faz a leitura dos sensores em Volt, por este motivo foi criada uma nova função para relacionar o valor lido em Volts com a pressão dada em bar, utilizando a tabela de dados apresentada por pelo autor. Assim a equação é dada por,

$$P = -1,6 e^{-4} V^5 + 1,73 e^{-3} V^4 - 2,39 e^{-3} V^3 + 0,02 V^2 + 1,62 V - 0,311 \quad \text{EQ. 4.14}$$

Para leitura do deslocamento do atuador é utilizado um potenciômetro deslizante 10 K Ω de comprimento igual a 6 cm (FIG. 4.17).



FIG. 4.17 Potenciômetro Deslizantes 10 K Ω (usinainfo.com)

Antes da realização dos experimentos são realizadas algumas medidas no sensor fim de testar sua precisão. No entanto foi observado que utilizando apenas uma regra de três simples não era possível obter as medidas em centímetros corretamente. Assim foi criada uma função para obter corretamente o deslocamento do PAM em centímetro dado o sinal recebido em Volt.

$$X = 0,013 V^5 - 0,19 V^4 + 0,88 V^3 - 1,12 V^2 + 0,45 V + 9,3 e^{-4} \quad \text{EQ. 4.15}$$

A bancada de testes montada para realização dos experimentos é mostrada na FIG. 4.18.

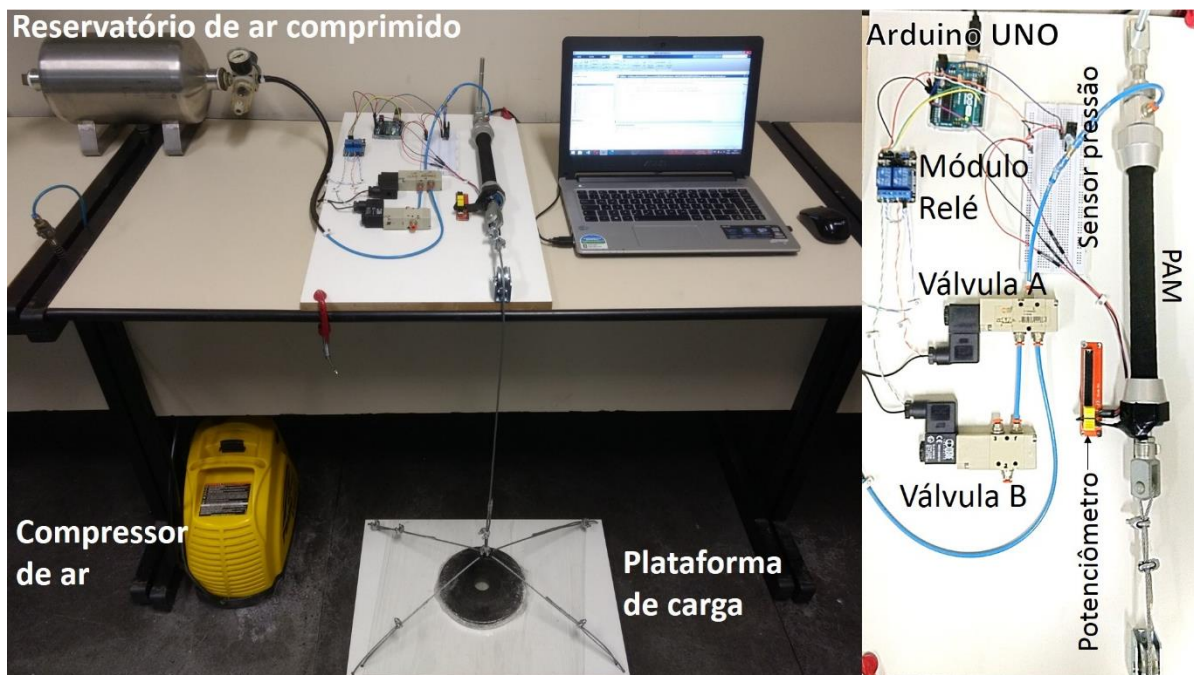


FIG. 4.18 Bancada de Testes

onde o compressor de ar abastece o reservatório utilizado como fonte de alimentação para o sistema. O controle é realizado pelo computador por meio do software MATLAB®, conectado ao Arduino UNO por um cabo USB, que envia os comandos de controle para as válvulas e recebe os sinais obtidos pelo sensor de pressão e o potenciômetro. O PAM é ligado à uma plataforma de carga por meio de um cabo de aço utilizando uma roldana para diminuir o atrito quando movimentada. O módulo relé é utilizado para fornecer a tensão necessária para ativar a solenoide da válvula, sendo esta de 110 V, uma vez que o Arduino UNO fornece no máximo 5 V.

A plataforma de carga pesa 2 kg e para realização dos experimentos foram utilizados pesos complementares para atingir os valores de carga utilizados nos testes.

Foram realizados experimentos onde o PAM é inflado e descarregado com pesos de 5, 10 e 15 kg na plataforma de cargas, utilizando os dois modelos de controle propostos.

Para teste do Sistema de Controle Nebuloso, o PAM foi inflado até atingir a pressão de trabalho de 6 bar, se mantém nessa posição por um segundo, e em seguida é descarregado se mantendo assim por dois segundos, e então esse processo é realizado novamente. Os experimentos são realizados para os três valores de carga escolhidos, cada um com os tempos de referência de 3, 4 e 5 segundos, totalizando assim nove experimentos.

Para teste do Sistema de Controle com MMR, o PAM é inflado até a pressão de 6 bar, se mantém nessa posição fixa por dois segundos, em seguida é descarregado. Os experimentos também são realizados para os três valores de carga escolhidos, sendo todos os três testes realizados com o mesmo valor da força muscular mostrado na FIG. 4.14.

Os resultados obtidos são apresentados em formas de gráficos da pressão e do deslocamento linear ao longo do tempo, comparando os gráficos da implementação, simulados em MATLAB®, e os dados experimentais coletados.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo os resultados são divididos por seções de modo a separá-los de acordo com o Sistema de Controle em atuação.

5.1 CONTROLE NEBULOSO

A implementação e testes do Controle Nebuloso foi realizada em nove experimentos, utilizando cargas de 5, 10 e 15 kg, cada uma para os tempos de referência de 3, 4 e 5 segundos.

Nos experimentos iniciais realizados foi observado que o atuador atinge a pressão de trabalho (6 bar) com apenas seis iterações do programa de controle. Isso ocorre devido ao alto tempo de resposta de todo o sistema, ou seja, são somados os tempos de resposta do MATLAB®, do módulo relé e das válvulas *on-off*. Por este motivo, para o cálculo dos comprimentos foi utilizado um valor de seis pulsos para inflar e descarregar o PAM (EQ. 4.11).

Desse modo, são apresentados os gráficos obtidos utilizando tempo de referência (TR) de 3 segundos.

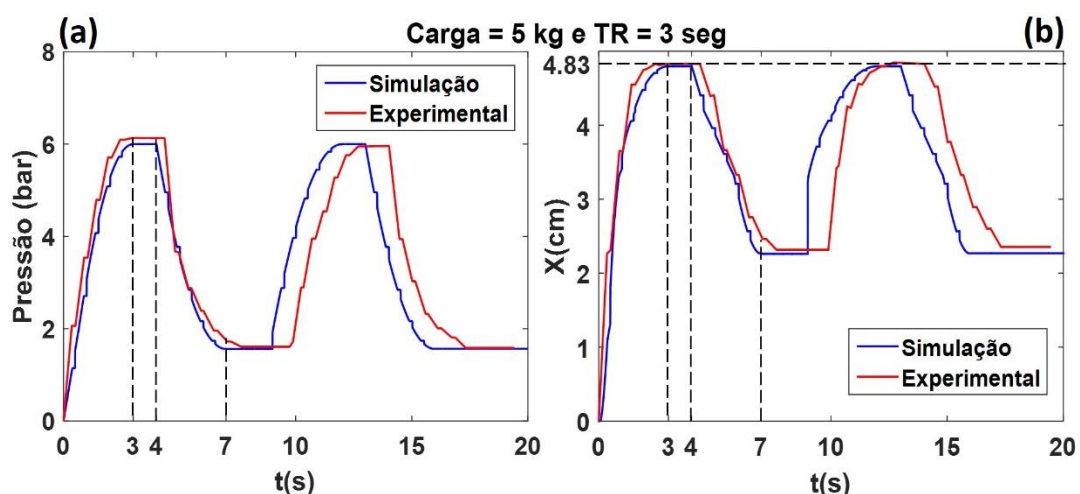


FIG. 5.1 Gráfico Deslocamento do PAM x Tempo, com Carga de 5 kg e TR de 3 segundos, com atraso experimental

Observando a FIG. 5.1 percebe-se um atraso nos resultados experimentais em relação às curvas de simulação. Assim, conforme descrito, este experimento é realizado inflando o atuador em um tempo de referência de 3 segundos, mantendo-o parado por 1 segundo, em seguida descarregando-o também em 3 segundos. Passados mais 2 segundos esse processo é repetido.

Dessa forma, o PAM deveria ser descarregado a primeira vez passados 4 segundos e novamente inflado em 9 segundos, conforme é observado na curva de simulação (curva de cor azul). Esse atraso ocorre devido ao alto tempo de resposta do sistema, e atrasos nos envios dos comandos para as válvulas, como já discutido anteriormente.

No entanto, apesar dos atrasos contidos, o músculo pneumático se movimenta com tempo bem próximo ao valor de referência estabelecido e as curvas possuem aspectos e formas semelhantes. Dessa forma foi embutido na simulação o tempo de resposta do sistema para melhor visualização dos resultados.

Assim são apresentados a seguir os resultados com os ajustes nas simulações.

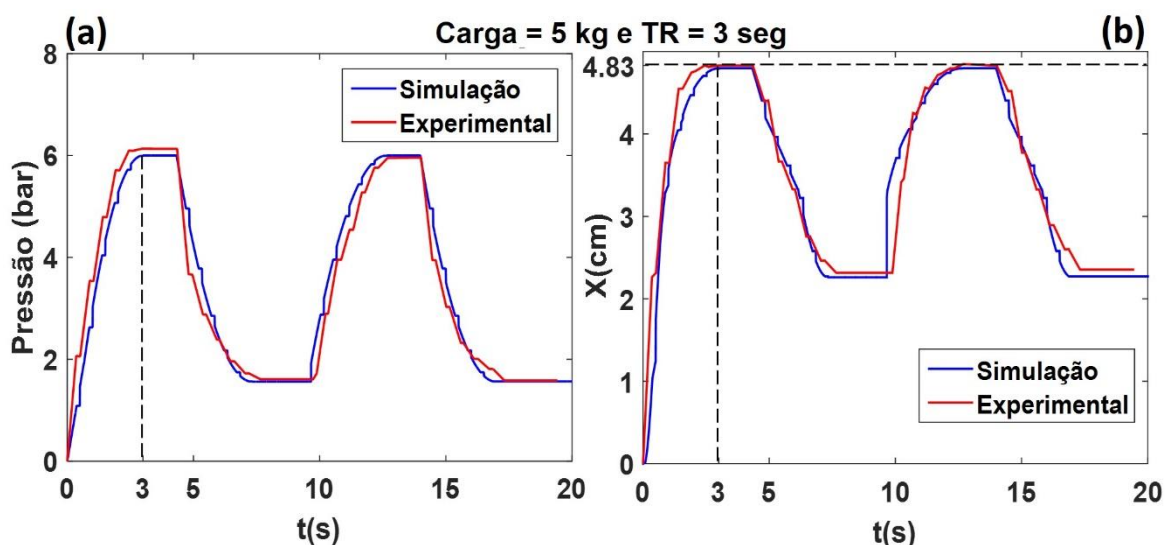
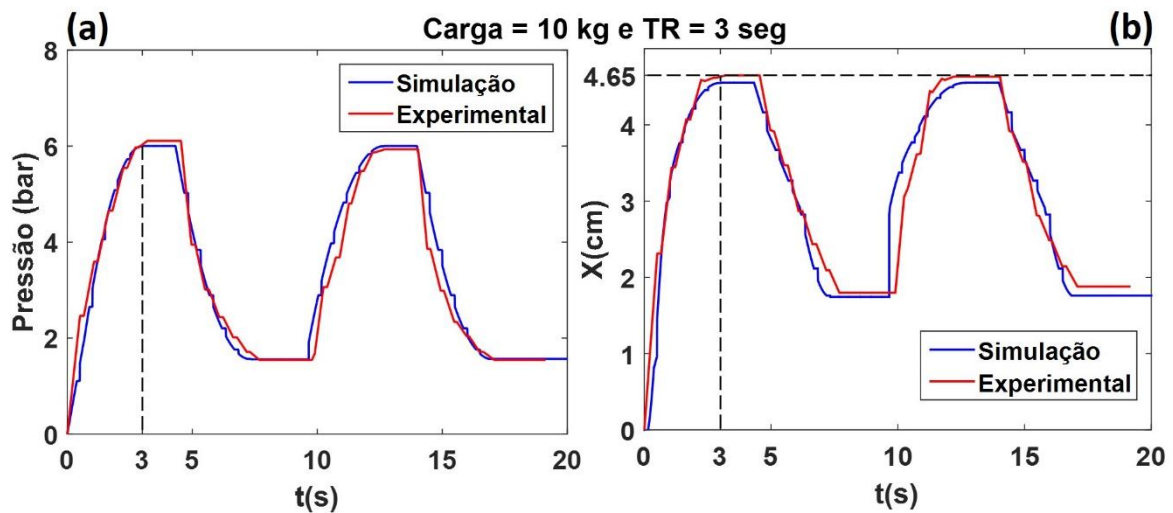


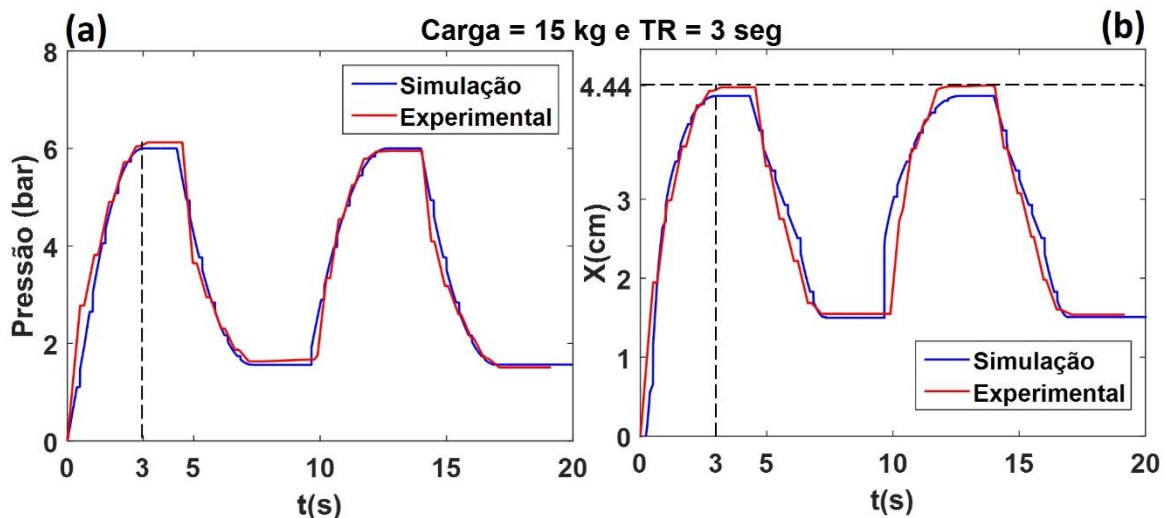
FIG. 5.2 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 3 seg, Carga = 5 kg

Com o tempo de resposta incluído na simulação observa-se uma aproximação muito maior com os resultados experimentais, conforme visto na FIG. 5.2.

A linha tracejada horizontal indica a maior contração do atuador, assim com uma carga de 5 kg e pressão de trabalho de 6 bar, o PAM atinge uma contração máxima de 4,83 cm.



Com a carga de 10 kg (FIG. 5.3), a contração máxima atingida pelo PAM com a pressão de trabalho é de 4,65 cm.



Já com a carga de 15 kg (FIG. 5.4) e a pressão de trabalho, o PAM atinge uma contração máxima de 4,44 cm.

Com base nos resultados obtidos (FIG. 5.2, FIG. 5.3 e FIG. 5.4), observa-se que ao inflar o atuador a pressão aumenta muito rapidamente no início, e conforme vai atingindo a pressão de trabalho, esse aumento passa a ser mais lento. O mesmo ocorre quando descarregado o PAM. Esse comportamento é decorrente da taxa de fluxo da válvula utilizada, mostrada na FIG. 4.3.

Quando descarregado, o PAM não consegue retornar à pressão 0 bar, devido à pressão mínima de atuação da válvula de 2,5 bar, segundo o fabricante.

No entanto, observando os gráficos nota-se que a pressão mínima atingida pelo PAM é de aproximadamente 2 bar. Isso ocorre devido à força externa da carga imposta ao sistema, e devido à correspondência com a calibração do sensor de pressão (EQ. 4.14) que considera a pressão de 0 bar como a pressão inicial no interior do PAM, quando na verdade se inicia com a pressão atmosférica.

Observa-se que quanto maior a carga imposta ao sistema, menor é a contração máxima atingida pelo PAM.

De acordo com a faixa de operação do músculo utilizado (FIG. 4.5), a força máxima desenvolvida pelo atuador, com pressão de 6 bar, é de 1200 N. Na modelagem do PAM a força desenvolvida por ele é calculada pela EQ. 4.6. Desse modo com as cargas de 5, 10 e 15 kg, o PAM desenvolve uma força de aproximadamente 1.151, 1.102 e 1053 N, respectivamente. Com uma força efetuada menor, a contração máxima também diminui.

A seguir são apresentados os resultados obtidos quando definido o tempo de referência igual a 4 segundos, também com as cargas de 5, 10 e 15 kg, apresentados nas FIG. 5.5, FIG. 5.6 e FIG. 5.7.

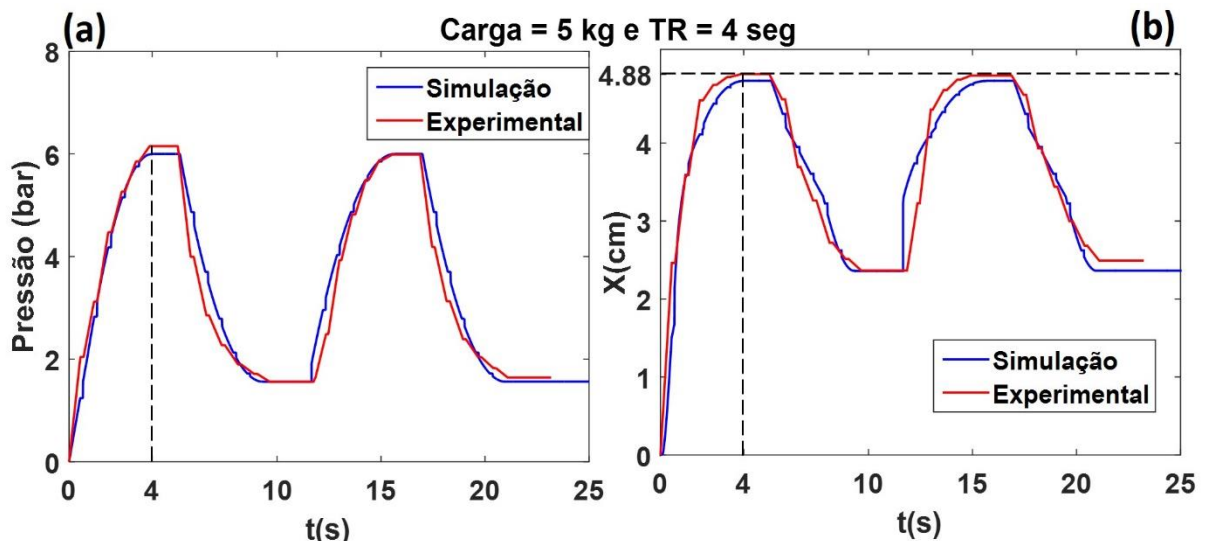


FIG. 5.5 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 4 seg, Carga = 5 kg

A contração máxima atingida pelo PAM deve ser a mesma em todos os experimentos, visto que são utilizados os mesmos valores de carga. No entanto, na

FIG. 5.5 (b) observa-se um valor um pouco maior que no experimento anterior (FIG. 5.2 (b)).

Isso pode ocorrer devido a pequenos erros contidos na leitura do sensor de pressão, por não ser de alta precisão, e/ou na calibração do manômetro acoplado na saída do reservatório de ar comprimido. Assim, são registradas pressões máximas um pouco diferentes, conforme pode ser observado nas FIG. 5.2 (a) e FIG. 5.5 (a).

No entanto estes erros, além de serem comuns em experimentos, são mínimos e não interferem no estudo do comportamento do atuador.

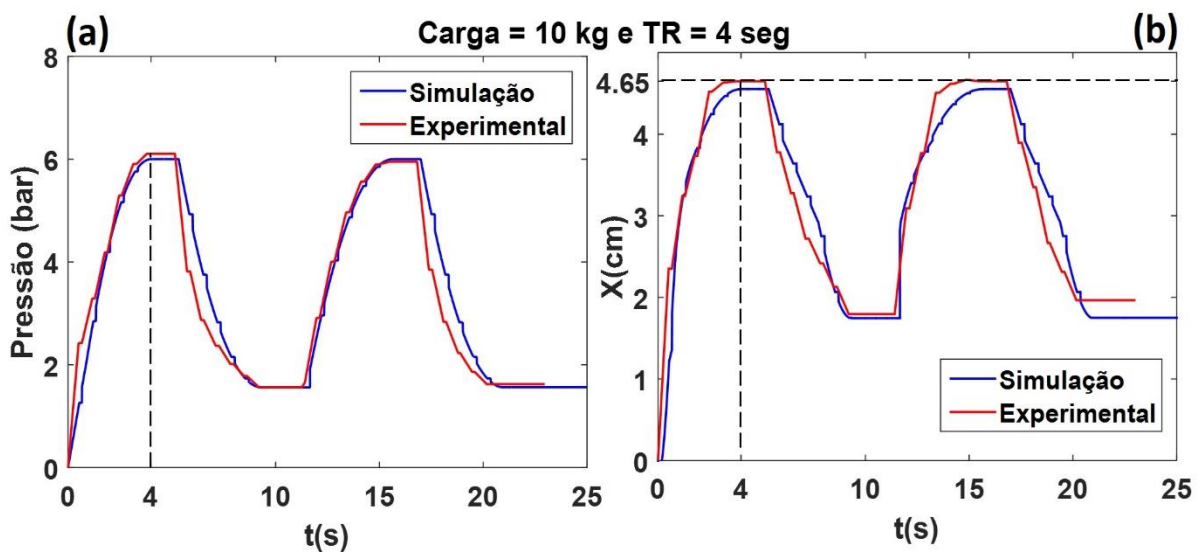


FIG. 5.6 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 4 seg, Carga = 10 kg

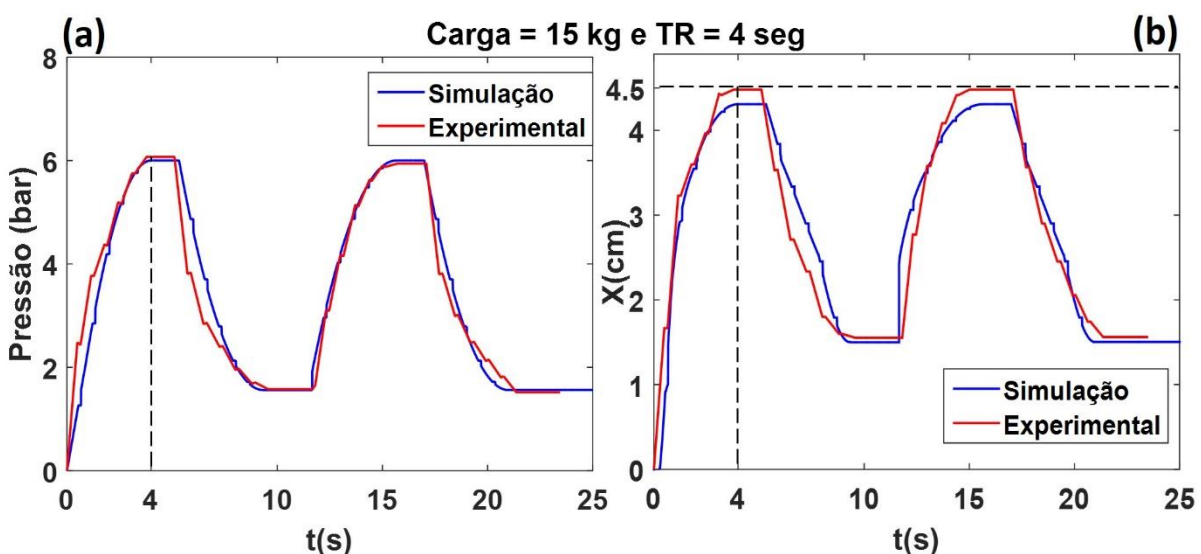


FIG. 5.7 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 4 seg, Carga = 15 kg

Assim como no experimento anterior, as FIG. 5.5, FIG. 5.6 e FIG. 5.7, mostram que o atuador é inflado e descarregado com tempos aproximados ao tempo de referência de 4 segundos de forma satisfatória.

As curvas de simulação são bastante próximas às experimentais, apresentando erros mínimos e aceitáveis.

As FIG. 5.8, FIG. 5.9 e FIG. 5.10, apresentam os resultados para o tempo de referência definido em 5 segundos.

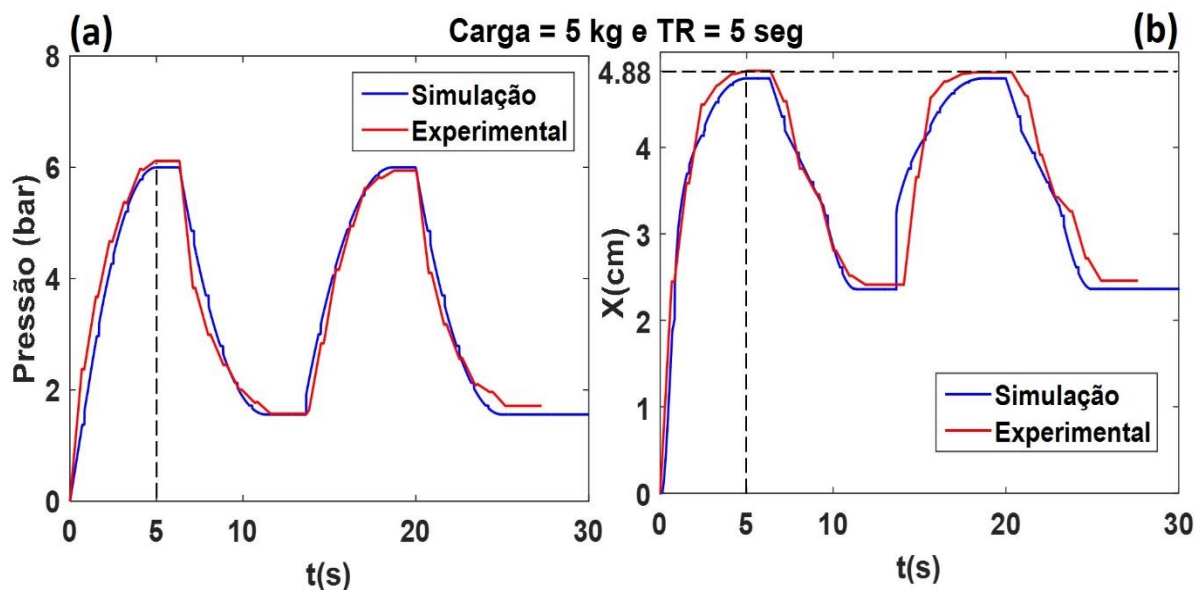


FIG. 5.8 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 5 seg, Carga = 5 kg

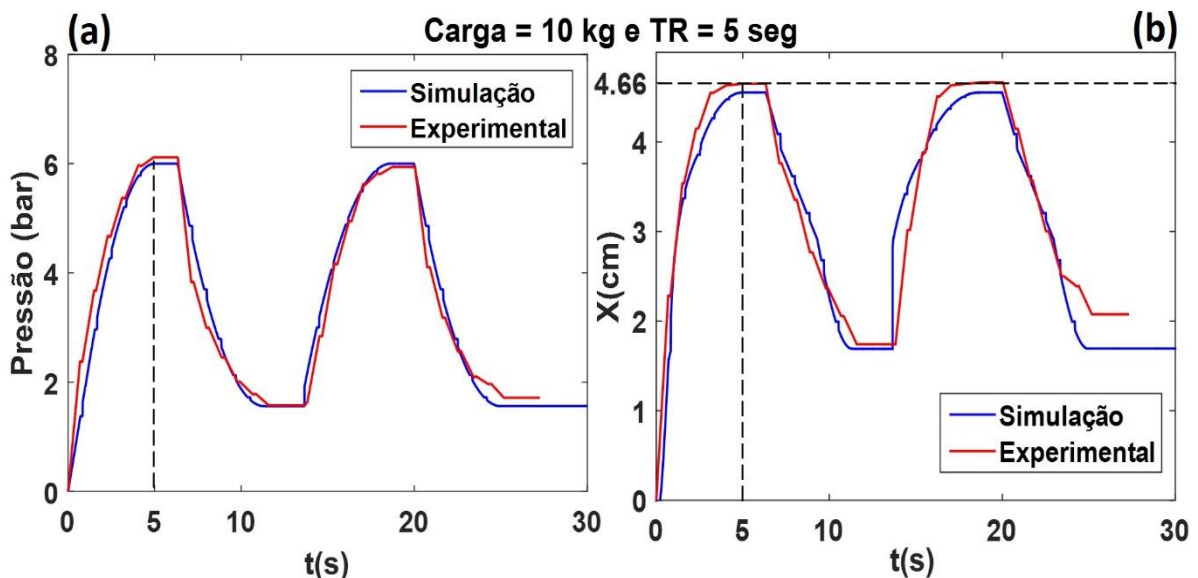


FIG. 5.9 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 5 seg, Carga = 10 kg

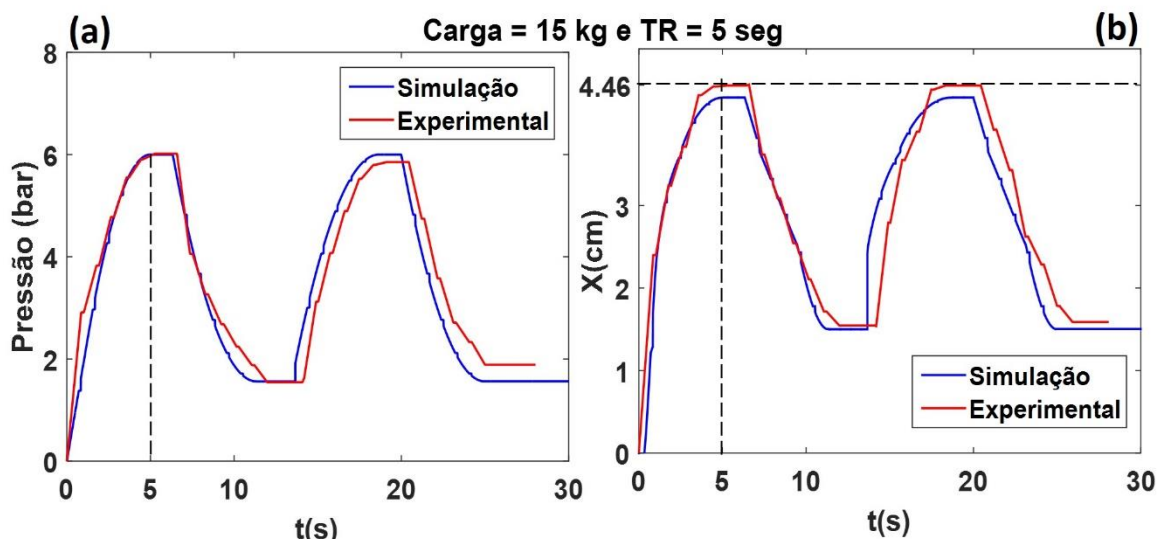


FIG. 5.10 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle Nebuloso, TR = 5 seg, Carga = 15kg

Como nos outros experimentos, o atuador também apresenta comportamento satisfatório ao se movimentar com o tempo de referência de 5 segundos.

Analisando todos os resultados obtidos nos experimentos com o Controle Nebuloso, é possível observar que com o aumento do tempo de referência as curvas ficam mais acentuadas, ou seja, fica mais evidente a distribuição da taxa de fluxo ou vazão em função da pressão, sendo mais fácil de visualizar a semelhança entre as curvas de pressão no atuador e as curvas de vazão mássica da válvula utilizada (FIG. 4.3).

Os resultados da simulação são muito próximos aos experimentais, validando a eficiência dos modelos de válvulas *on-off* e de músculo pneumático.

O Sistema de Controle Nebuloso, de um modo geral, apresentou resultado satisfatório. O atuador se movimenta com tempos bem aproximados aos tempos de referência estipulados.

5.2 CONTROLE COM MMR

A implementação e testes do Controle com Modelo de Músculo Real (MMR) foi realizada com as cargas de 5, 10 e 15kg, todos considerando a força muscular obtida com o Modelo Muscular de HILL (FIG. 4.14).

O PAM atinge a pressão de trabalho (6 bar) com o número máximo de 6 iterações do programa de controle. Assim, o modelo Muscular de HILL é implementado com uma quantidade de 28 pontos, de forma que a força seja superior a 30 N apenas 6 vezes para inflar o atuador e outras 6 para descarregá-lo, conforme pode ser visualizado na FIG. 4.14.

Para definir quando o PAM deve ser inflado ou descarregado, é analisado o deslocamento angular do antebraço, representando na FIG. 4.13. Assim, quando o deslocamento angular estiver aumentando, ou seja, o antebraço estiver sendo erguido, e a força muscular for maior que 30 N, a válvula A emite pulsos de ar comprimido, inflando o atuador. Quando o deslocamento angular estiver diminuindo, significando que o antebraço está descendo, e a força muscular for maior que 30 N, a válvula B emite pulsos de ar comprimido, descarregando o atuador.

Caso o deslocamento angular esteja aumentando e a pressão máxima de trabalho já tenha sido atingida, o fluxo de ar é interrompido, mantendo o atuador inflado, até que o deslocamento angular comece a diminuir, ou seja, até que o antebraço comece a descer.

Assim, analisando as FIG. 4.13 e FIG. 4.14, sabe-se que o PAM deve ser inflado entre 1,8 e 3,7 segundos, mantido nessa posição até 6,3 segundos e ser descarregado em seguida.

As FIG. 5.11, FIG. 1.12 e FIG. 5.13, apresentam os resultados obtidos com a atuação deste sistema de controle.

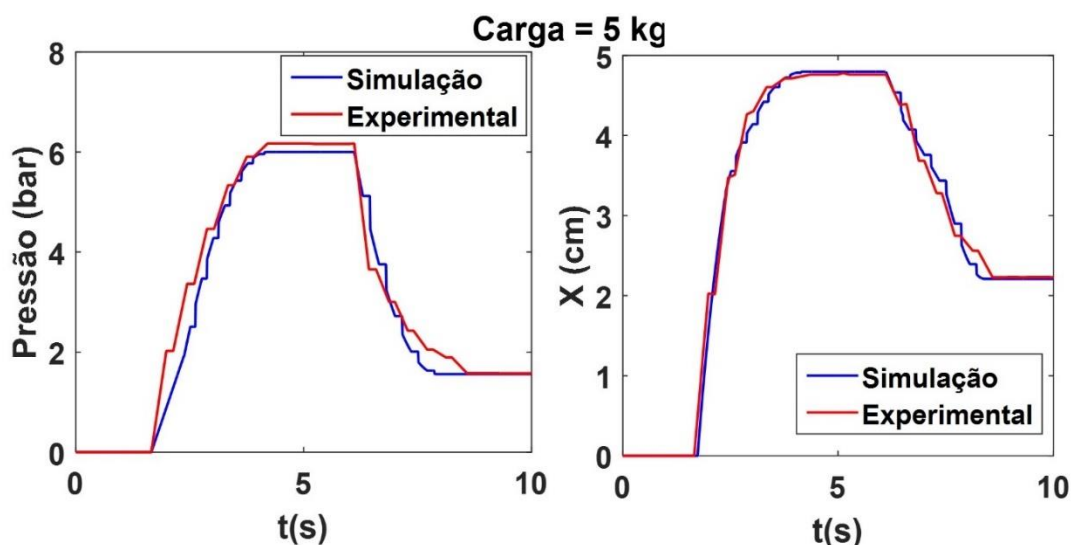


FIG. 5.11 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle com MMR, Carga = 5 kg

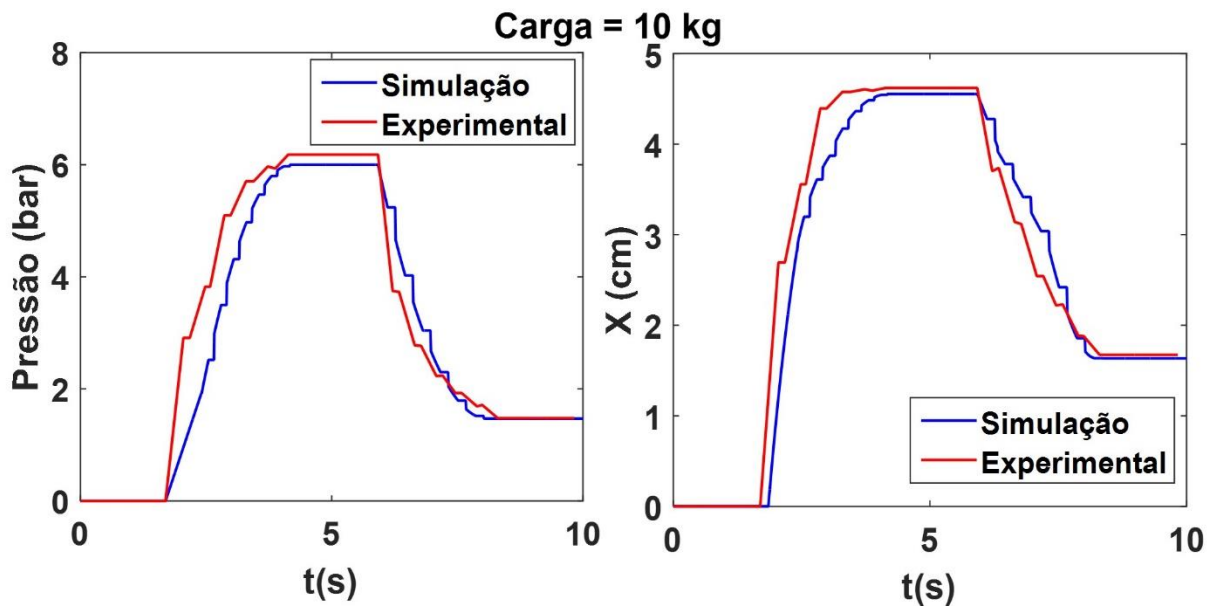


FIG. 5.12 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle com MMR, Carga = 10 kg

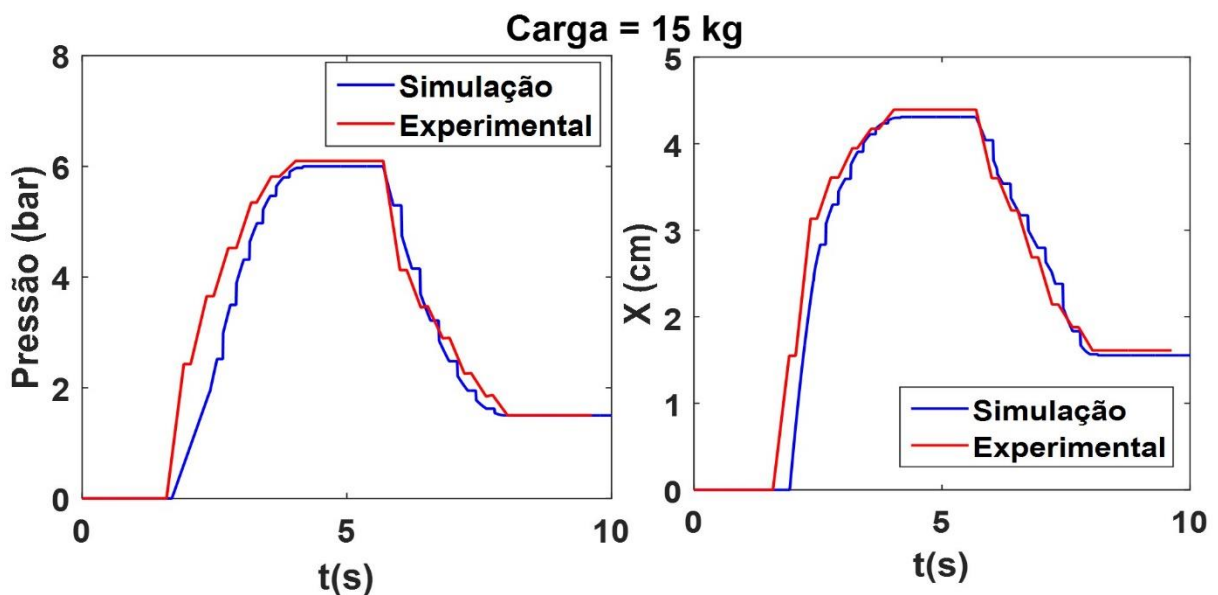


FIG. 5.13 Gráficos de (a) Pressão e (b) Deslocamento do PAM, Controle com MMR, Carga = 15 kg

Assim como nos experimentos anteriores, foi observado um pequeno atraso nos resultados experimentais provocados pelo alto tempo de resposta do sistema, logo esse tempo também foi inserido nas simulações, buscado uma maior aproximação dos resultados.

Com base nos resultados obtidos (FIG. 5.11, FIG. 5.12 e FIG. 5.13), observa-se que o atuador é inflado e descarregado com um tempo de aproximadamente 2,5 segundos e se comporta conforme esperado, realizando os movimentos de acordo

com os sinais de entrada, a força muscular (FIG. 4.14) e o deslocamento angular do antebraço (FIG. 4.13). Dessa forma o Sistema de Controle com MMR apresenta resultados satisfatórios.

6 CONCLUSÃO

Foram propostos dois Sistemas de Controle para um músculo pneumático acionado por válvulas *on-off* 3/2 vias, o Controle Nebuloso e o Controle com Modelo de Músculo Real. Nos dois modelos são emitidos pelas válvulas, pulsos intermitentes que interrompem o fluxo de ar comprimido, mantendo o atuador em uma posição fixa fazendo com que o movimento seja mais lento e suave.

Foi observado um atraso nos resultados experimentais quando comparados com os resultados das simulações. Tais atrasos são decorrentes de um alto tempo de resposta de todo o sistema, que é a soma dos tempos de resposta das válvulas, do módulo relé, do Arduino UNO e do MATLAB®.

Devido a este alto tempo de resposta, o PAM atinge a pressão máxima de trabalho com apenas 6 iterações do sistema de controle, viabilizando que apenas essa quantidade de pulsos seja emitida pelas válvulas. Este número é consideravelmente pequeno, já que quanto maior a quantidade de pulsos e menor seu comprimento, mais suave se torna o movimento.

Buscando atenuar as grandes diferenças entre os resultados, foram incluídos na simulação os tempos de resposta do sistema.

Um outro problema encontrado foi a pressão mínima de atuação das válvulas utilizadas, sendo esta igual a 2,5 bar, de acordo com o fabricante, o que não permite o completo descarregamento do PAM.

Possíveis soluções para os problemas encontrados são a utilização de um computador de alta performance para obter uma resposta mais rápida do MATLAB®, bem como uma otimização no algoritmo de controle utilizado. Utilizar válvulas *on-off* de rápida comutação, com pressão mínima de atuação de 0 bar, permitindo o total descarregamento do PAM, acionadas por solenoides de 5 V, eliminando o uso do módulo relé. Esse tipo de válvula possui um tempo de resposta de aproximadamente 3 ms, e utilizando solenoides de 5V elas podem ser conectadas diretamente ao Arduino UNO, diminuindo ainda mais o tempo de resposta do sistema.

Dessa forma, tanto com a atuação do Controle Nebuloso quanto com o Controle com MMR, os resultados obtidos foram satisfatórios, já que o músculo pneumático se movimenta conforme o proposto em cada modelo. Sendo o Controle com MMR mais

indicado para dispositivos biomecânicos por ser utilizado como uma forma de complementar a força muscular do usuário. Já o Controle Nebuloso pode ser aplicado tanto em dispositivos totalmente robóticos quanto em biomecânicos quando se deseja prescrever o movimento em relação ao tempo ou velocidade.

Depois de inserido o tempo de resposta do sistema na simulação, os resultados apresentaram uma melhor aproximação com os experimentais, tanto nos gráficos de pressão quanto nos de deslocamento linear do atuador, validando mais uma vez os modelos de válvulas *on-off* e de músculo pneumático utilizados. Assim conclui-se que quando há um bom ajuste dos parâmetros utilizados nestes modelos eles representam adequadamente a realidade do sistema.

Como sugestões para trabalhos futuros apresenta-se:

- Aplicar esses modelos de controladores à projetos de exoesqueletos para membros superiores ou até mesmo inferiores;
- Utilizar o Modelo Muscular de Hill com parâmetros, sinal EMG e deslocamento angular reais;
- Desenvolver um modelo de controle em malha fechada utilizando os conceitos apresentados neste trabalho;
- Utilizar válvulas de rápida comutação com pressão mínima de atuação de 0 bar, acionadas por solenoides de 5V, para diminuir o tempo de resposta do sistema.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, A. O. G. **Controle de um Manipulador Robótico Através de uma Interface Cérebro Máquina Não Invasiva com Aprendizagem Mútua**. Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2010.
- BATISTA, R. F. **Proposta de Arquitetura de Controle para Exoesqueleto Robótico de Reabilitação da Marcha Antropomórfica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- BAVARESCO, V. **Modelagem Matemática e Controle de um Atuador Pneumático**. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.
- BISSOCHI, C. A., PASSOS, L. S. **Apresentação do Modelo Matemático de um Músculo Artificial Pneumático**. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2008.
- CHOU, C.-P., HANNAFORD, B. **Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles**. em IEEE Xplore, 1994.
- COELHO, L. S., SUGUIMOTO, R. M., COELHO, A. A. R. **Abordagem Otimizada de Controle Nebuloso para Sistemas Não-Lineares do Tipo Hammerstein**. SBA: Controle & Automação, Curitiba, 2007.
- COLBRUNN, R.W. **Desing and Control of a Robotic Leg with Braided Pneumatic Actuators**, May, 2000.
- DE NEGRI, V. J. **Introdução aos Sistemas para Automação e Controle Industrial**. LASHIP, Florianópolis, 2004.
- DE NEGRI, V. J. **Sistemas hidráulicos e pneumáticos para automação e controle**. LASHIP, 2001.
- DURÃES, R. L. **Validação de Modelos Baseados em RNA Utilizando Análise Estatística de Dados e Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- FAST COMPANY, eLEGS. 2017. Disponível em: <http://www.fastcodesign.com/1662467/a-robotic-exoskeleton-helps-paraplegics-walk-again>.
- FESTO. AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. Catálogo [online]. 2017. Disponível: https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/info_501_en.pdf

- FESTO. Portifólio ExoHand. Catálogo [online]. 2017. Disponível em: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/156734/Brosch_FC_ExoHand_EN_1o.pdf
- FIALHO, A. B. **Automação Pneumática: Projeto, Dimensionamento e Análise de Circuitos**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2004.
- FUNG, Y. C. **Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues**. Springer Verlag, New York, 1993.
- GARCÉS, D. S. C. **Exoesqueleto Robótico para Aumentar a Capacidade Física do Membro Superior Humano**, Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- GONÇALVES, A. C. B. F. **Análise da Usabilidade de um Dispositivo Robótico Desenvolvido para Reabilitação de Tornozelo em Indivíduos Hemiparéticos Pós Acidente Vascular Encefálico**. Dissertação de Mestrado, EESC/ USP, São Carlos, 2013.
- GUENTHER, R., PERONDI, E. C.; DEPIERI, E. R.; VALDIERO, A. C. **Cascade Controlled Pneumatic Positioning System with LuGre Model Based Friction Compensation**. Journal of the Braz, Soc. of Mech. Sci. & Eng., Vol. 28, No. 1, January-March 2006.
- HEINEN, F. J. **Sistema de Controle Híbrido para Robôs Móveis Autônomos**, Dissertação de Mestrado, UNISINOS, São Leopoldo, 2002.
- HUBKA, V., EDER, W. E., **Theory of Thecnical Systems**. Germany: Springer-Verlag, 1988.
- JANG, J. S. R., SUN, C. T., MIZUTANI, E. **Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence**. USA: Prentice-Hall, 1997.
- JOUPPILA, V., GADSDEN, S. A., ELLMAN, A. **Modeling and Identification of a Pneumatic Muscle Actuator System Controlled by an ON/OFF Solenoid Valve**, 7th International Fluid Power Conference, German, Aachen, March, 2010.
- KARPENKO, M., SEPEHRI, N. **Design and experimental evaluation of a nonlinear position controller for a pneumatic actuator with friction**, in Proceedings of the American Control Conference, Vol. 6, July 2004.
- KLUTE, G.K., HANNAFORD, B. **Modeling Pneumatic McKibben Artificial Muscle Actuators: Approaches and Experimental Resul**. Submitted to the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, November 1998, revised March 1999.

- KLUTE, G. K. ; HANNAFORD, B. **Accounting for Elastic Energy Storage in McKibben Artificial Muscle Actuators**. Seattle, WA: ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2000.
- LOCATELI, C. C. **Modelagem e Desenvolvimento de um Sistema de Controle de Posição Pneumático com Acionamento por Válvulas ON-OFF**, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2011.
- LOPES, I. P. **Músculo de McKibben aplicado em manipulador não condutor**, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2014.
- LUCAS, J. A. C. **Projeto de uma Garra Robótica Pneumática**. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- MARRO, A. A., SOUZA, A. M. C., CAVALCANTE, E. R. S., BEZERRA, G. S. e NUNES, R. O. **Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações**. DIMAp/ UFRN, Natal, 2010.
- MARTINS, L. L. **Desenvolvimento de um regulador de Pressão Microprocessador**, Dissertação de Mestrado, USP, 2012.
- METAL WORK. EQUIPAMENTOS PNEUMÁTICOS. Catálogo [online]. 2017. Disponível: http://www.metalwork.com.br/flip/cat_geral/#/622/
- MORGADO JUNIOR, F. D. **Modelagem e Controle de Músculo Pneumático**, Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, 2011.
- NETTO, J. C. **Controladores Nebulosos Aplicados a Processos Industriais: Estudos Comparativos de Métodos de Sintonia**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia da Unifersidade Federal de Juiz de Fora, 2005.
- PEDROSA, A. I. R. **Modelagem e Controle de um Exoesqueleto Acionado por Músculos Pneumáticos**, Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, 2015.
- PERONDI, E.A. **Controle Não-Linear em Cascata de um Servoposicionador Pneumático com Compensação de Atrito**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Santa Catarina, 2002.
- PONTE, P. J. V. **Análise Dinâmica e Cinemática de um Exoesqueleto para Auxiliar a Marcha Humana**. Dissertação de Mestrado, IME, 2013.
- RAFIKOV, M.; BALTHAZAR, J. M. **Optimal Linear and Nonlinear Control Design for Chaotic Systems**. Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences IDETC'05 2005 and Computers and Information in Engineering Conference Long Beach, California, USA, September 24–28, 2005.

- RAMOS, J. L. A. S. **Controle de Torque de um Exoesqueleto Atuado por Músculos Pneumáticos Artificiais Utilizando Sinais Eletromiográficos**, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2013.
- RITTER, C. S. **Modelagem Matemática das Características Não-Lineares de Atuadores Pneumáticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010.
- SANKAI, Y. **HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernetics. System and Information Engineering**. University of Tsukuba. Tennodai : s.n., 2007.
- SERRES, J., L., **Dynamic Characterization of a Pneumatic Muscle Actuator and its Application to a Resistive Training Device**, Wright State University, 2008.
- SHAW, I. S., SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999.
- SILVA, E. C. N. **Sistemas Fuidomecânicos, Apostila de Pneumática**. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.
- SOUZA, H. N. C. **Instrumentação e Controle de um Exoesqueleto Parte Inferior do Corpo**, Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro 2014.
- SUZUKI, R. M., **Controle Baseado em Linearização por Realimentação dos Estados Aplicados a um Servoposicionador Pneumático**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2010.
- SZEPE, T. **Accurate force function approximation for pneumatic artificial muscles**, Department of Technical Informatics, University of Szeged, Hungary, 2005.
- UTKIN, V. I. **Discontinuous Control Systems: State of Art in Theory and Applications**. IFAC World Congress of Automatic Control, Preprints, Munich, v. 1, 1987.
- VALDIERO, A. **Controle de Robôs Hidráulicos com Compensação de Atrito**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- VIRVALO, T. **Modelling and Desing of a Pneumatic Position Servo System Realizes with Commercial Components**. PHD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, 1995.
- WINTERS, J. M., STARK, L. **Analysis of Fundamental Human Movement Patterns Through the Use of In-Depth Antagonistic Muscle Models**. IEEE Transaction on Biomedical Engineering, Vols. BE - 32, 1985.