



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UM SISTEMA DE CONTROLE DE POSIÇÃO ACIONADO POR MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

por

Élida Fernanda Xavier Júlio

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre

ÉLIDA FERNANDA XAVIER JÚLIO

**CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UM
SISTEMA DE CONTROLE DE POSIÇÃO
ACIONADO POR MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. Simplício Arnaud da Silva

J94c Júlio, Élide Fernanda Xavier.
 Controlador fuzzy aplicado a um sistema de controle de posição
 acionado por motores de indução trifásicos / Élide Fernanda Xavier
 Júlio.- João Pessoa, 2010.
 59f. : il.
 Orientador: Simplício Arnaud da Silva
 Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT
 1. Engenharia Mecânica. 2. Controlador fuzzy – mesa de
 coordenadas X-Y. 3. Motores – indução trifásica.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

**CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UM SISTEMA
DE CONTROLE DE POSIÇÃO ACIONADO POR
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

por

Élida Fernanda Xavier Júlio

Dissertação aprovada em 05 de abril de 2010

Período letivo 2010.1

Prof. Dr. José Bezerra de Menezes Filho

Examinador Externo - IFPB

Prof. Dr. Isaac Soares de Freitas

Examinador Interno - UFPB

Prof. Dr. Simpício Arnaud da Silva

Orientador - UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz Fernando Ramos Júlio e Ângela Maria Xavier Júlio, a minha tia Bernadete de Lourdes Xavier e a minha irmã Elen Cristina Xavier Júlio, por serem, além de minha inspiração, incentivadores e colaboradores para o meu crescimento pessoal e profissional ao longo de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que me iluminou na realização deste trabalho.

Aos meus pais Luiz Fernando Ramos Júlio e Ângela Maria Xavier Júlio e a minha tia Bernadete de Lourdes Xavier, pela dedicação para a minha formação pessoal e profissional.

A minha irmã Elen Cristina Xavier Júlio pelo incentivo.

Ao professor Simplício Arnaud da Silva pelos inestimáveis ensinamentos e compartilhamento de sua experiência no decorrer deste trabalho.

Ao professor José Bezerra de Menezes Filho pelos preciosos ensinamentos e importantes contribuições no desenvolvimento deste projeto.

Ao professor Isaac Soares de Freitas pela atenção e orientação sempre que solícita.

Ao meu parceiro de pesquisa Carlos Alberto Nóbrega Sobrinho pela contribuição e disposição em sempre ajudar, e ao amigo Alexander Patrick Chaves de Sena pela colaboração.

Aos professores Jobson Francisco da Silva e Arnaldo Vilela de Lima, e aos engenheiros Flávio Gomes de Carvalho, Jairo Dias Inocência e Átila Bonifácio de Pontes pela contribuição na implementação experimental deste trabalho.

Aos professores Antônio Feliciano Xavier Filho e Giovanni Loureiro França de Mendonça pelos esclarecimentos quanto à lógica fuzzy.

Aos amigos e professores Magno José Gomes da Silva e Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo auxílio na bibliografia, e James Sidney Freitas de Carvalho, pelas sugestões técnicas.

A todos os professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, que cooperaram para o desenvolvimento deste trabalho.

CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UM SISTEMA DE CONTROLE DE POSIÇÃO ACIONADO POR MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

RESUMO

No presente trabalho apresenta-se um projeto de controladores fuzzy para uma mesa de coordenadas X-Y com dois graus de liberdade. Ambas as bases que compõem a mesa se deslocam horizontalmente, sendo acionadas por motores de indução trifásicos alimentados através de inversores de frequência. Para a detecção de posição das bases, encoders ópticos foram acoplados aos eixos dos motores, a fim de serem obtidos os deslocamentos angulares desses últimos. Uma placa de aquisição de dados realizou a interface entre um computador Pentium 1,4 GHz e a planta, para captar os sinais provenientes dos encoders e fornecer os sinais de controle aos inversores de frequência. No ambiente de programação LabVIEW®, implementaram-se os controladores fuzzy, os quais determinam as variáveis de controle que acionam os motores. Sinais de referência do tipo degrau, senoidal e cosenoidal foram utilizados para a avaliação do desempenho do sistema, no controle de posição e acompanhamento de trajetória. Resultados experimentais são apresentados.

Palavras chaves – controlador fuzzy, controle de posição, mesa de coordenadas.

FUZZY CONTROLLER APPLIED TO A POSITION CONTROL SYSTEM POWERED BY TREE-PHASES INDUCTION MOTORS

ABSTRACT

This work presents the project of fuzzy controllers for a X-Y coordinate table with two degrees of freedom. Both bases of the table moves horizontally, powered by tree-phases induction motors operated by frequency inverters. For detection position of bases, optical encoders were engaged to the axes of the engines to be obtained the angular displacement. A data acquisition board made the interface between a 1.4 GHz Pentium computer and the system. This board catches signals from the encoders and provides control signals to the frequency inverters. Fuzzy controllers, implemented in LabVIEW® software, determinate the control variables to power the engines. Step, sine and cosine reference were used to evaluate the system performance, in position control and following trajectory. Experimental results are presented.

Keywords – fuzzy controller, position control, coordinate table.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
1. APRESENTAÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 NOTAS HISTÓRICAS.....	5
2.3 SISTEMAS DE CONTROLE DE POSIÇÃO	7
2.3.1 Aplicação dos Motores Elétricos	8
2.4 CONTROLE DIGITAL.....	9
2.4.1 Controle Clássico e Controle Moderno baseado em Espaço de Estados.....	9
2.4.2 Redes Neurais Artificiais	11
2.4.3 Controle Fuzzy.....	12
2.5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	14
3. IMPLEMENTAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....	15
3.1 INTRODUÇÃO.....	15
3.2 BANCADA DE TESTE	15
3.2.1 Subsistema de Medição de Posição	18
3.2.2 Subsistema de Acionamento	21
3.3 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	33

4.	IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE FUZZY	27
4.1	INTRODUÇÃO.....	27
4.2	NOTA SOBRE LÓGICA FUZZY	27
4.3	MODELAGEM DOS CONTROLADORES	28
4.3.1	Fuzzificação	28
4.3.2	Defuzzificação	29
4.3.3	Inferência Fuzzy.....	30
4.4	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	33
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1	INTRODUÇÃO.....	34
5.2	NOTA SOBRE O SISTEMA.....	34
5.3	ACIONAMENTO DO SISTEMA COM SINAL DO TIPO DEGRAU	35
5.4	ACIONAMENTO DO SISTEMA COM SINAIS DO TIPO SENOS E COSENO.....	43
5.5	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	48
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	50
6.1	CONCLUSÕES.....	50
6.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
	APÊNDICE A. PROGRAMAS EM LABVIEW.....	60
A.1	INTRODUÇÃO.....	60
	APÊNDICE B. CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO.....	63
B.1	INTRODUÇÃO.....	63
B.2	CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SAÍDA.....	63
B.3	CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE ENTRADA	64
	APÊNDICE C. LÓGICA FUZZY	67
C.1	INTRODUÇÃO.....	67
C.2	FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY	67
C.3	SISTEMAS DE CONTROLE FUZZY	70

C.3.1 Fuzzificação	71
C.3.2 Inferência Fuzzy	71
C.3.3 Defuzzificação.....	74
APÊNDICE D. BASE DE REGRAS DOS CONTROLADORES FUZZY	76
D.1 INTRODUÇÃO.....	76
D.2 BASE DE REGRAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de blocos do sistema de controle de máquinas-ferramenta biaxial ...	8
Figura 2.2 - Diagrama de blocos do sistema de controle no espaço de estados	10
Figura 2.3 - Algumas topologias para Rede Neural Artificial.....	12
Figura 3.1 - Diagrama esquemático de uma mesa de coordenadas	16
Figura 3.2 - Bancada experimental do sistema de posicionamento.....	17
Figura 3.3 - Diagrama de blocos do sistema de controle de posição.....	17
Figura 3.4 - Encoder óptico do sistema de medição	18
Figura 3.5 - Sinal de onda quadrada com distorções	19
Figura 3.6 - Conversão do sinal de saída de binário para decimal	20
Figura 3.7 - Incremento e decremento dos números inteiros pelo contador	20
Figura 3.8 - Modulação PWM controlado por sinal senoidal	22
Figura 3.9 - Curva representativa da variação V/f	23
Figura 3.10 - Curva característica torque versus velocidade.....	23
Figura 3.11 - Curva característica da potência de saída do inversor	24
Figura 3.12 - Enrolamentos do estator e do rotor de um motor de indução	24
Figura 4.1 - Funções de pertinência da variável de entrada Erro	29
Figura 4.2 - Funções de pertinência da variável de entrada Derro	29
Figura 4.3 - Funções de pertinência da variável de controle Saída	30
Figura 4.4 - Variáveis de entrada e de saída dos controladores fuzzy.....	31
Figura 4.5 - Superfície de controle gerada por cada controlador fuzzy.....	32
Figura 5.1 - Curvas de resposta e de referência degrau, da base X, para deslocamentos nos dois sentidos	35
Figura 5.2 - Curva da variável de controle, da base X, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos	36
Figura 5.3 - Curvas de resposta e de referência degrau, da base X, para deslocamentos nos dois sentidos	36

Figura 5.4 - Curva da variável de controle, da base X, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos	37
Figura 5.5 - Curvas de resposta e de referência degrau, da base Y, para deslocamentos nos dois sentidos	38
Figura 5.6 - Curva da variável de controle, da base Y, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos	38
Figura 5.7 - Curvas de resposta e de referência degrau, da base Y, para deslocamentos nos dois sentidos	39
Figura 5.8 - Curva da variável de controle, da base Y, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos	39
Figura 5.9 - Curvas de resposta e de referência degrau da base X	40
Figura 5.10 - Destaque da curva de resposta para as perturbações na base X.....	41
Figura 5.11 - Curvas de resposta e de referência degrau variável da base X	42
Figura 5.12 - Curva da variável de controle da base X para referência degrau variável.....	42
Figura 5.13 - Curvas de resposta e de referência degrau variável da base Y	43
Figura 5.14 - Curva da variável de controle da base Y para referência degrau variável.....	43
Figura 5.15 - Curvas de resposta e de referência cosenoidal da base X para $T=150$ s.....	44
Figura 5.16 - Curvas de resposta e de referência senoidal da base Y para $T=150$ s.....	45
Figura 5.17 - Curvas de resposta e de referência, compostas pelas bases X e Y, para $T=150$ s.....	45
Figura 5.18 - Curvas de resposta e de referência cosenoidal da base X para $T=40$ s	46
Figura 5.19 - Curvas de resposta e de referência senoidal da base Y para $T=40$ s.....	46
Figura 5.20 - Curvas de resposta e de referência, compostas pelas bases X e Y, para $T=40$ s	47
Figura 5.21 - Curvas de resposta e de referência cosenoidal da base X para $T=25$ s.....	47
Figura 5.22 - Curvas de resposta e de referência senoidal da base Y para $T=25$ s.....	48
Figura 5.23 - Curvas de resposta e de referência, compostas pelas bases X e Y, para $T=25$ s	48
Figura A.1 - Programa de controle de posição	61
Figura A.2 - Programa de acompanhamento de trajetória.....	62
Figura B.1 - Princípio básico do Schmitt Trigger.....	64
Figura B.2 - Circuitos de condicionamento de saída e do acoplador óptico	64
Figura B.3 - Circuito de condicionamento de entrada.....	66
Figura C.1 - Conjuntos idade: (a) abordagem booleana e (b) abordagem fuzzy.....	69

Figura C.2 - Funções de pertinência.....	70
Figura C.3 - Esquema de um controlador fuzzy	71
Figura C.4 - Exemplo de cálculo da saída discreta de um controlador fuzzy.....	73
Figura C.5 - Defuzzificação pelo Centro-da-Área.....	74
Figura C.6 - Defuzzificação pelo Centro-do-Máximo.....	75
Figura C.7 - Defuzzificação pelo Média-do-Máximo	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Tabela de regras fuzzy sugerido para um sistema à malha fechada.....	31
Tabela 4.2 - Tabela de regras fuzzy dos controladores da mesa de coordenadas.....	32
Tabela 5.1 - Índices de desempenho experimentais extraídos das curvas de resposta da base X	37
Tabela 5.2 - Índices de desempenho experimentais extraídos das curvas de resposta da base Y	40
Tabela D.1 - Base de regras dos controladores fuzzy do sistema.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Conjunto de elementos
e_{ss}	Erro de regime permanente do sinal
f	Frequência aplicada ao estator do motor de indução
M_p	Sobre-sinal
NG	Função de pertinência denominada Negativo Grande
NM	Função de pertinência denominada Negativo Médio
NP	Função de pertinência denominada Negativo Pequeno
n_r	Velocidade de rotação do rotor do motor de indução
n_s	Velocidade de rotação síncrona do campo magnético do estator do motor de indução
p	Número de pólos do motor de indução
PG	Função de pertinência denominada Positivo Grande
PM	Função de pertinência denominada Positivo Médio
PP	Função de Pertinência denominada Positivo Pequeno
QZ	Função de pertinência denominada Quase Zero
s	Escorregamento do motor de indução
T	Período do sinal
T_s	Tempo de assentamento do sinal
$T(u)$	Conjunto de termos de u definido em U
U	Universo de discurso
u	Variável fuzzy
V_{cc}	Tensão de corrente contínua
x	Elemento qualquer de um conjunto
x	Saída discreta da defuzzificação
$\mu_A(x)$	Função de pertinência de x em A

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

As mesas de coordenadas são mesas posicionadoras ou de medição de coordenadas, que têm a finalidade de posicionar, adequadamente, uma peça a ser processada ou medida, assim como posicionar uma ferramenta que executará uma tarefa. Por serem máquinas versáteis, elas são utilizadas nas áreas industrial, comercial e de serviços.

Devido aos avanços nesses setores e à necessidade de uma maior exatidão de posicionamento dessas máquinas, as mesas de coordenadas do tipo manual estão sendo substituídas pelas acionadas por motores elétricos, acionamentos hidráulicos ou pneumáticos. As mesas manuais estão limitadas à habilidade e experiência do operador, que são fundamentais para um bom desempenho de uma determinada tarefa.

A grande maioria das mesas de coordenadas acionadas por motores elétricos utiliza malhas fechadas de controle que necessitam de sensores de posição. Nesses casos, os sensores de posição (encoders), normalmente, são acoplados ao eixo dos motores, a fim de fornecerem sinais elétricos indicando a posição da mesa. Além dos encoders, podem-se utilizar câmeras filmadoras para a mesma finalidade, as quais consistem em sistemas mais complexos de visão artificial. Os tipos de motores elétricos mais usados nesses sistemas de posicionamento são: motores de passo, de corrente contínua e de indução (MENEZES, 2007).

Do ponto de vista da engenharia, um sistema de controle é a interconexão de dispositivos mecânicos, elétricos ou eletrônicos, com o propósito de controlar as saídas dos processos (ou plantas). (RUFINO, 2008; NISE, 2002).

Com a predominância de controle por computador, encontram-se na literatura várias técnicas de projeto e implementação de controladores discretos. (HEMERLY, 1996, ASTROM, 1995).

Como alternativa ao controle convencional, utilizam-se os controles inteligentes, consistindo basicamente de três abordagens, de acordo com PARASKEVOPOULOS (1995): sistemas especialistas baseados em conhecimento, controle por lógica fuzzy e controle por redes neurais.

No controle por lógica fuzzy, é incorporada a maneira de pensar do homem em um sistema de controle (SHAW e SIMÕES, 2004). A lógica fuzzy combina lógica de multivalores, teoria probabilística e inteligência artificial, para representar o pensamento humano. Por meio da tecnologia fuzzy, pode-se capturar o conhecimento de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, e incluí-lo em controladores computadorizados, implementando-os com desempenho idêntico ou melhor que o do homem.

O controle fuzzy não necessita da modelagem matemática do processo, e sim da modelagem das ações provenientes do conhecimento de um especialista, utilizando para isso termos lingüísticos, ou seja, descrições verbais. Portanto, essa é uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle, que são desenvolvidos via modelagem matemática das plantas, derivando as variáveis a serem controladas em função do estado do processo (SHHEIBIA, 2001).

Os controladores fuzzy, além de não requererem o modelo matemático do processo a ser controlado, tratam igualmente sistemas lineares e não lineares e controlam sistemas multivariáveis complexos, executando estratégias de tomadas de decisão nos mais variados tipos de plantas.

A mesa de coordenadas X-Y estudada é um sistema eletromecânico de posição com dois graus de liberdade. Além de encoders nas retroalimentações desse sistema, foram utilizados inversores de frequência e motores de indução trifásicos para o acionamento elétrico com variações de tensão e, conseqüentemente, de velocidade de rotação desses motores.

Os controladores fuzzy da mesa foram desenvolvidos experimentalmente. Os projetos desses controladores efetuaram-se de acordo com a experiência adquirida nos ensaios realizados, sem a necessidade de identificação e equacionamento matemático do sistema. A implementação dos controladores foi realizada em ambiente LabVIEW®, que é um programa largamente utilizado em aplicações de controle.

1.2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O objetivo do presente trabalho é apresentar um acionamento automático de uma mesa de coordenadas X-Y alimentada por motores de indução trifásicos, utilizando lógica fuzzy para o seu controle de posição e acompanhamento de trajetória.

A aplicação de motores de indução alimentados por inversores de frequência foi motivada pelo fato desses equipamentos serem amplamente utilizados na automação industrial, proporcionando uma maior versatilidade na variação de velocidade de processos.

A implementação de controladores inteligentes por lógica fuzzy ainda é reduzida em comparação aos controladores clássicos e do tipo adaptativos, no acionamento de mesa de coordenadas (MENEZES, 2007), o que motiva realizar pesquisas científicas quanto às características dessa técnica de controle.

Este estudo visa contribuir para a implementação de controladores fuzzy no controle de posição de mesas de coordenadas acionadas por motores de indução trifásicos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada conforme a seguir:

O Capítulo II consiste de uma revisão da literatura. Inicialmente é dada uma visão histórica das máquinas-ferramenta, com enfoque no Controle Numérico Computadorizado (CNC). Em seguida, são mostradas algumas estruturas de servomecanismos mais utilizadas em sistemas de controle de posição. Na sequência, é realizada uma abordagem sobre os controladores clássicos e de espaço de estados, as redes neurais artificiais e os controladores fuzzy. O Capítulo se encerra com comentários e conclusões.

O Capítulo III trata da implementação e do funcionamento do sistema. São apresentados os dispositivos elétricos e mecânicos que constituem a planta, bem como o funcionamento desse último, desde a captação do sinal digital informando o deslocamento angular dos motores até o acionamento deles e, conseqüentemente, o deslocamento linear da mesa. No final do capítulo, constam os comentários e conclusões.

No Capítulo IV, apresenta-se o desenvolvimento dos controladores fuzzy da mesa. São apresentadas as configurações das variáveis de entrada e de controle dos controladores, bem como as estratégias de controle. O Capítulo é encerrado com comentários e conclusões.

No Capítulo V, são mostrados os resultados experimentais obtidos com a atuação do controlador tanto no controle de posição como no acompanhamento de trajetória. Comentários e conclusões finalizam o Capítulo.

No Capítulo VI, apresentam-se a conclusão deste projeto e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica a respeito do tema da pesquisa. Na seção 2.2, é apresentado um histórico do Comando Numérico Computadorizado (CNC), visto que esse tipo de máquina é uma das principais aplicações da mesa de coordenadas. Na seção 2.3, mostram-se as estruturas de controle e mecanismos de acionamento das máquinas-ferramenta. Na seção 2.4, são apresentadas as características e literatura de alguns controladores utilizados em controle de posição e trajetória. O capítulo se encerra com a apresentação de comentários e conclusões na seção 2.5.

2.2 NOTAS HISTÓRICAS

As máquinas-ferramenta são equipamentos que posicionam, de forma adequada, uma peça a ser usinada ou a ferramenta que executará a usinagem (BRAGA, 2006). A fabricação da peça pode ser realizada pela remoção de material da mesma, por meio de usinagem ou por um processo de forjamento ou estampagem, a fim de que ela adquira o formato desejado (SOUSA, 1998). O erro de posicionamento e a suavidade de movimento são fatores determinantes na exatidão de forma e diminuição da rugosidade da peça, em geral fabricada de metal, sendo o erro um dos pontos críticos das máquinas-ferramenta (JESUS, 1999). Desde o surgimento dessas máquinas, elas têm passado por aprimoramentos.

O torno mecânico é a máquina-ferramenta mais antiga conhecida. Em 1800, Henry Maudslay inventou o primeiro torno para trabalhos em metal. Essa máquina

fixava a peça a ser trabalhada em um gancho ou fuso que girava em torno de seu eixo, possibilitando que uma ferramenta de corte usinasse a superfície do material em um contorno desejado. Um operador, através do uso de manivelas e volantes, era quem manipulava a ferramenta de corte; e a exatidão nos trabalhos de usinagem dependia da experiência do operador.

Em 1818, Eli Whitney inventou a primeira fresadora. Neste caso, a área de trabalho era montada em uma mesa e movia-se com relação à ferramenta de corte. O desperdício de material era muito grande porque a exatidão das peças dependia da habilidade dos operadores, onde as diferenças na operação resultavam em variações das dimensões das peças fabricadas. A operação dessas máquinas tornou-se anti-econômica com o crescente aumento da demanda. Desta forma, houve a necessidade de se obter um meio de automatizar esses equipamentos (MENEZES, 2007).

No final da década de 1940, a tecnologia nas máquinas-ferramenta obteve impulso com a invenção do Controle Numérico (NC) por John Parsons, aprofundando, rapidamente, a relação entre essas máquinas e a eletrônica (NASCIMENTO, 2004). Nessa época, em 1949, a força aérea dos Estados Unidos firmou um contrato com Parsons para que ele desenvolvesse um novo tipo de máquina-ferramenta capaz de acelerar métodos de produção. Parsons autorizou, ainda, cientistas e engenheiros, do Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), a construírem um sistema de controle para uma fresadora de dois eixos, a qual usava uma fita perfurada como mídia de entrada, contendo as instruções de usinagem.

As primeiras máquinas NC não possuíam memória e não eram capazes de armazenar programas. Cada vez que uma peça diferente precisasse ser produzida, era necessária a geração de uma nova fita perfurada contendo as informações do novo programa. Além disso, havia a necessidade de que o programador ou operador especificasse a sucessão de todos os pontos por onde o ferramental de corte tinha de passar, bem como, a cada troca de ferramenta calcular uma nova trajetória considerando as dimensões dessa nova ferramenta.

Porém, no fim da década de 1970, o uso de computadores em Controle Numérico se tornou uma prática mais difundida, devido ao advento dos microprocessadores. Assim, nas máquinas CNC, as operações são controladas por processadores embutidos nelas. Dados os parâmetros necessários, a máquina CNC pode realizar, automaticamente, uma interpolação linear, circular e helicoidal; uma compensação da geometria da ferramenta, como, por exemplo, do seu raio e/ou

comprimento; entre outros. Com isso, ao programador cabe, basicamente, a programação da trajetória da superfície que se deseja usinar. Logo, o computador de um sistema CNC executa os cálculos necessários à usinagem da peça, a partir das informações de trajetória e dos parâmetros de usinagem determinados no programa CNC. Além disso, a utilização do computador permite que um programa seja editado, modificado, armazenado na memória, lido e executado (SOUSA, 1998).

Segundo KOREN (1978), as primeiras máquinas CNC utilizavam malhas de velocidade e posição no monitoramento e controle de seus eixos; e a retroalimentação do sinal de velocidade era fornecida por taco-geradores e os sinais de posição por encoders.

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE DE POSIÇÃO

Os controladores para acionamento de máquinas CNC têm a função de minimizar a diferença entre a posição de referência e a posição medida de malha fechada, causada pelo movimento conjunto dos eixos da máquina.

As estruturas de controle, para acionamento dessas máquinas, utilizam controladores do tipo malha aberta, compostos por motores de passo, e controladores de malha fechada, constituídos, principalmente, por motores de corrente contínua e motores de indução, com a posição de seus eixos sendo medida por meio de circuitos sensores de posição e de velocidade. (MENEZES, 2007)

Um sistema posicionador de baixo custo foi desenvolvido por CAMARGO (1988), no projeto de uma mesa X-Y acionada por motores de passo e controlada por comando numérico CNC. Como a estrutura de controle dispensou a retroalimentação de velocidade e posição, sendo, portanto, em malha aberta, obteve-se uma mínima complexidade do sistema, mostrando-se um protótipo viável em aplicações que não demandam elevadas exatidão e resolução (MARIANO, 2005).

Segundo LACERDA (1998) um diagrama de sistema de controle de máquinas-ferramenta biaxial, em malha fechada, representa-se conforme a Figura 2.1. Neste diagrama, a posição de interesse, quanto ao controle do sistema, é a composição das duas posições axiais. O interpolador gera os sinais de referência para as bases, e o controlador, que atua em malha fechada em cada base, anula o erro de posição axial.

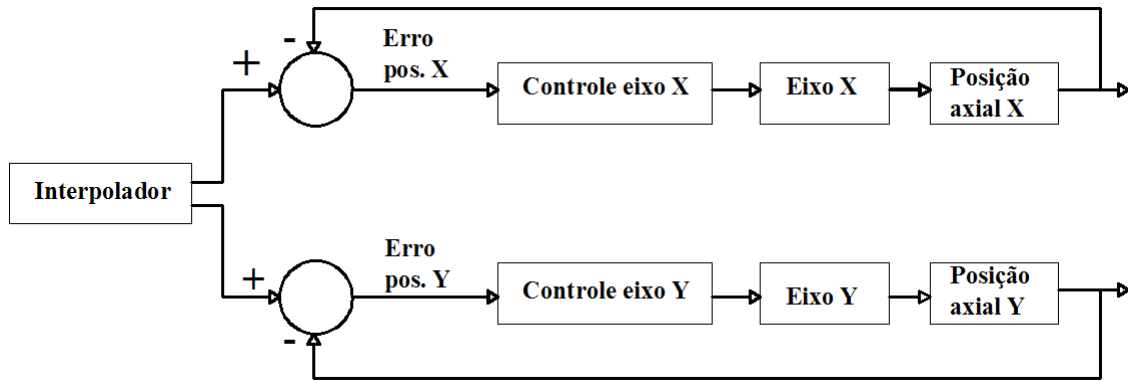


Figura 2.1 - Diagrama de blocos do sistema de controle de máquinas-ferramenta biaxial.

2.3.1 Aplicações de Motores Elétricos

Durante décadas, a utilização de motores de corrente contínua em estruturas de controle de posição foi predominante. Os acionamentos de alto desempenho utilizavam, prioritariamente, máquinas de corrente contínua, devido à possibilidade de obtenção de modelos linearizados para diversas condições de operação e por serem máquinas de estruturas simples, facilitando o projeto e implementação de controladores.

Os motores de corrente contínua possuem, ainda, ampla faixa de controle de velocidade de rotação, torque e posição, com métodos de acionamentos mais baratos que os utilizados em motores de corrente alternada (CAMACHO, 2003). Porém, como alguns processos exigem, além de exatidão de posicionamento, acionamentos com velocidades de rotação elevadas, esses motores tornaram-se inadequados para essas aplicações, visto que o seu comutador e as suas escovas não permitem altas velocidades de rotação, além de serem motores mais caros e que requerem manutenção freqüente. Em contrapartida, os motores de indução de corrente alternada são mais baratos, robustos e de fácil manutenção.

O acionamento dos motores de indução por inversores de frequência é uma solução relativamente nova, porém, amplamente utilizada na indústria. A utilização de inversores de frequência, atualmente, compreende o método mais eficiente para controlar a velocidade de rotação de motores assíncronos (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2010). O uso dessa combinação – motor de indução alimentado por inversor de frequência – possibilita acionamentos de velocidade de rotação variável desses motores, bem como facilidade de controle (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2005). Por conseguinte, em virtude dessas vantagens, inerentes às

aplicações dos motores de indução, a utilização desses últimos em sistemas de controle de posicionamento tem crescido consideravelmente na automação industrial.

2.4 CONTROLE DIGITAL

Com o desenvolvimento do minicomputador em meados de 1960 e do microcomputador em 1970, deu-se início ao uso do controle digital por computador em sistemas de controle com retroalimentação.

Um controlador digital único pode substituir numerosos controladores analógicos. O emprego do controle digital pode levar a uma maior flexibilidade na resposta a mudanças no projeto. Quaisquer modificações que sejam necessárias na lei de controle podem ser reconfiguradas via software em vez de alterações em hardware (NISE, 2002). Além disso, os controladores digitais apresentam: facilidade de inclusão de funções lógicas e não lineares na malha de controle; viabilidade de armazenar dados em tabelas e acumular conhecimento acerca das propriedades do sistema controlado; inexistência de problemas com relação à tolerância dos componentes analógicos, maior sensibilidade de medição e sensibilidade reduzida ao ruído dos sinais.

2.4.1 Controle Clássico e Controle Moderno baseado em Espaço de Estados

Em servomecanismos, considerando questões como princípio de funcionamento, técnicas de projeto e uso na indústria, os sistemas de controle retroalimentados podem ser classificados, basicamente, em controle clássico e controle moderno.

A teoria de controle clássica ou convencional é fundamentada na relação entrada-saída ou função de transferência. Entre as técnicas clássicas destacam-se Ziegler-Nichols, projeto avanço ou atraso de fase (SHAHIAN e HASSUL, 1993; CHEN, 1995; PHILLIPS e HARBOR, 1997; DORF e BISHOP, 2001; NISE, 2002; OGATA, 2003). NASCIMENTO (2004) projetou controladores clássicos do tipo proporcional (P), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID) com o objetivo de minimizar erros de posicionamento em máquinas-ferramenta.

O avanço nos campos da eletrônica e dos computadores viabilizou projetos de controladores com técnicas modernas, baseadas em espaço de estados, o que

possibilitou projetar controladores mais robustos que os obtidos com as técnicas clássicas (ASTROM & WITTENMARK, 1995; CHEN, 1995; HEMERLY, 1996; DORF e BISHOP, 2001; NISE, 2002; OGATA, 2003). As técnicas do Regulador Linear Quadrático (LQR), do Regulador Linear Gaussiano (LQG) e de Controle H Infinito (H^∞) são as que se destacam entre esses controladores.

Para sistemas multivariáveis, lineares e invariantes no tempo, de ordem n , com p sinais de entrada e q sinais de saída, são descritas a equação de estado (2.1) e a equação de saída (2.2). Na Fig. (2.2), apresenta-se o diagrama de blocos de um sistema linear no espaço de estados.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (2.2)$$

Sendo:

$\mathbf{x}(t)$: vetor de estados ($n \times 1$);

$\mathbf{u}(t)$: vetor de sinais de entrada ($p \times 1$);

$\mathbf{y}(t)$: vetor de sinais de saída ($q \times 1$);

$\mathbf{A}$: matriz de dinâmica ($n \times n$);

$\mathbf{B}$: Matriz de entrada ($n \times p$);

$\mathbf{C}$: matriz de saída ($q \times n$);

$\mathbf{D}$: matriz de transmissão direta ($q \times p$).

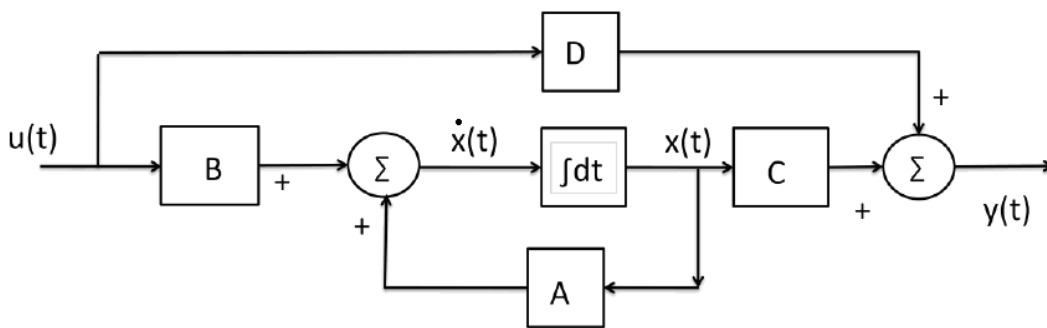


Figura 2.2 – Diagrama de blocos do sistema de controle no espaço de estados.

O objetivo do projeto de um controlador clássico é impor os pólos dominantes de malha fechada de modo que o sistema possua uma determinada frequência de

ressonância e um determinado amortecimento. Já no controle em espaço de estados, o controlador é projetado a partir da especificação de todos os pólos do sistema de malha fechada, e não apenas os pólos dominantes (MENEZES, 2007).

2.4.2 Redes Neurais Artificiais

Uma Rede Neural Artificial (RNA) é uma estrutura que processa a informação de forma paralela e distribuída, constituída de unidades de processamento simples, que adquirem, armazenam e utilizam conhecimentos experimentais, organizada segundo as redes neurais biológicas.

A combinação de diversos neurônios artificiais pode formar uma RNA (KOVÁCS, 1996). Uma Rede Neural apresenta três tipos de camadas: camada de entrada, camadas ocultas ou escondidas, e camada de saída. Na camada de entrada, o número de neurônios é igual ao número de sinais de entrada; entre a camada de entrada e a camada de saída localizam-se as camadas ocultas; e a camada de saída possui a quantidade de neurônios igual à de sinais de saída (MENEZES, 2007).

As conexões, em uma RNA, têm a função de tornar o sinal de saída de um neurônio em um sinal de entrada de outro, ou ainda, orientar o sinal de saída para o mundo externo (mundo real). As diferentes possibilidades de conexões entre camadas de neurônios podem resultar em um grande número de estruturas diferentes (MARIANO, 2005).

De acordo com a topologia, uma rede neural pode ser classificada como *feedforward*, sem retroalimentação (laços), conforme Figuras 2.3 a) e b); ou *feedback*, com retroalimentação, Figura 2.3 c). Na Figura 2.3 a) é ilustrada uma RNA estritamente *feedforward*, onde todas as unidades de processamento enviam suas saídas apenas para as unidades situadas na próxima camada. Na Figura 2.3 b), a rede tipo *feedforward* possui conexões diretas entre camadas de entrada e de saída. Na rede neural *feedback*, Figura 2.3 c), verifica-se a existência da retroalimentação, caracterizada pelas conexões provenientes da camada de saída para a camada de entrada (NASCIMENTO e YONEYAMA, 2000).

As variantes de uma RNA são inúmeras, e combinando-as é possível mudar a sua arquitetura conforme a necessidade da aplicação. Basicamente, os itens sujeitos a modificações, em uma rede neural, são: conexões entre camadas, camadas ocultas,

quantidade de neurônios, função de transferência e algoritmo de aprendizado (MARIANO, 2005).

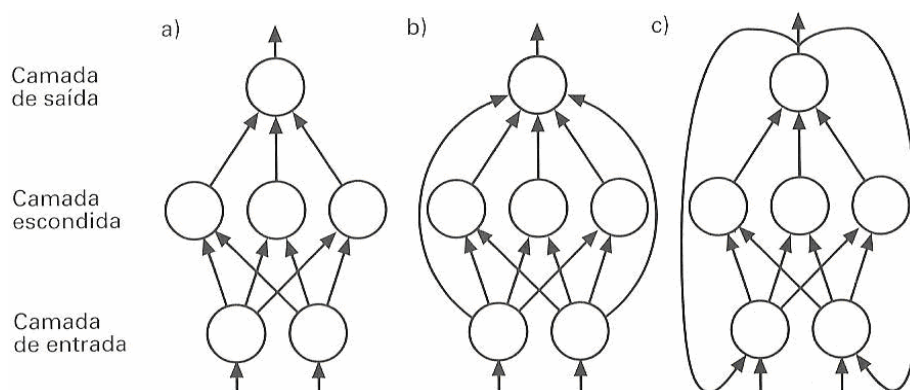


Figura 2.3 – Algumas topologias para Rede Neural Artificial.

Em MENEZES (2007) é apresentada uma estratégia de controle, por modo vetorial, utilizando uma única rede neural para acionar e controlar dois eixos de uma mesa de coordenadas X-Y.

2.4.3 Controle Fuzzy

A lógica fuzzy foi desenvolvida pelo professor Lotfi A. Zadeh, da Universidade da Califórnia, em Berkeley, na década de 60 (ZADEH, 1973). Em 1974, o professor E. H. Mamdani aplicou pela primeira vez um controlador fuzzy no controle de uma máquina a vapor, segundo REYERO e NICÓLAS (1995), após inúmeras tentativas frustradas com diversos tipos de controladores.

A técnica fuzzy é uma alternativa para a solução de problemas de controle com não linearidades nas dinâmicas inerentes aos processos. No estudo comparativo de estratégias de controle para sistemas microposicionadores de máquinas-ferramenta, em RUBIO (1998) comprovou-se, por meio de simulações, a aplicabilidade e eficácia dos controladores fuzzy, visto que possuem maior adaptabilidade à ocorrência de variações próprias do sistema. Segundo CAMPOS e SAITO (2004), por meio da lógica fuzzy é possível reduzir, consideravelmente, o tempo de desenvolvimento de um controlador não-linear, respeitando as especificações e restrições operacionais, controlando processos complexos de maneira simples, robusta e em tempo real.

Como o controle fuzzy possibilita a inclusão da experiência humana, em controladores computadorizados, a automatização de diversos processos o utiliza, desde tarefas domésticas até o controle de sofisticados processos industriais. É aplicado no controle de sistemas, na agricultura (SHEN *et al.*, 2007, BURGOS-ARTIZZU *et al.*, 2007); na área biomédica (HELD e ROY, 2000, SKELLY e CHIZECK, 2001); na fisioterapia (KIRYU *et al.*, 2001); na robótica (SHHEIBIA, 2001, WAI *et al.*, 2003); em sistemas fotovoltaicos (SIMÕES e FRANCESCHETTI, 1999, WEISS e XIAO, 2003); etc.

Os sistemas fuzzy podem ser utilizados conjuntamente com outras técnicas de controle, como fuzzy + algoritmos genéticos (PARK *et al.*, 1995, GALDI *et al.*, 2008); fuzzy PD (ZHANG *et al.*, 2008); fuzzy PI (VIEIRA *et al.*, 2007, LIN *et al.*, 2007a); fuzzy PID (PETROV *et al.*, 2003, QIANG *et al.*, 2008); algoritmos genéticos + fuzzy PI/PD (KUO e LI, 1999); etc.

Atualmente, há uma forte tendência na interação entre lógica fuzzy e redes neurais, dando origem às estruturas neuro-fuzzy, adequadas para geração automática de bases de regras e de funções de pertinência (TANSCHETT, 1998).

Diversas aplicações dos sistemas fuzzy e neuro-fuzzy são encontradas na literatura (YAGER & FILEV, 1994; JANG e ROGER, 1992; WONG *et al.*, 1999). A seguir, são apresentadas algumas pesquisas que utilizaram esses sistemas de controle, principalmente, fuzzy.

BORDON (2004) apresentou um controlador fuzzy de arquitetura simplificada para o acionamento de um motor de indução trifásico, com frequência de operação controlada e limitação de corrente.

YATIM e UTOMO (2005) desenvolveram um sistema neuro-fuzzy para o controle de velocidade de rotação de compressores acionados por motores de indução.

FERNANDES (2005) propôs um modelo de supervisão de um sistema híbrido (eólico e diesel) de geração de energia elétrica, gerenciado por lógica fuzzy, em regiões isoladas do estado de Mato Grosso do Sul.

RUFINO (2008) desenvolveu o protótipo de um robô móvel autônomo com um sistema de controle fuzzy.

XAVIER (2008) apresentou um controlador fuzzy para o posicionamento de uma mesa de coordenadas de um grau de liberdade, acionada por um motor de corrente contínua.

Recentemente, BEZERRA (2009) apresentou um sistema fuzzy para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água, por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjuntos motor-bomba, visando à economia de água e energia elétrica.

2.5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica, deste capítulo, apresentou um histórico sobre as máquinas-ferramenta, desde o seu surgimento até a criação das máquinas CNC; uma abordagem referente aos sistemas de controle de posição e os seus acionamentos por motores elétricos; além das características e literatura dos controladores clássicos e modernos, bem como dos controladores inteligentes, redes neurais e controle fuzzy.

Quanto ao controle de posição de mesa de coordenadas por controlador fuzzy, verificou-se, durante a pesquisa bibliográfica, que ainda é reduzida a aplicação desse controlador inteligente em relação aos controladores clássicos e modernos, nesse estudo. A implementação de controlador fuzzy, por ser uma técnica de controle atual, proporciona a realização de diversas pesquisas sobre sua aplicação.

CAPÍTULO III

IMPLEMENTAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a montagem experimental e princípio de funcionamento de uma mesa de coordenadas X-Y. Na seção 3.2 é abordada sobre a montagem do sistema posicionador em laboratório, especificando os equipamentos elétricos e mecânicos utilizados. Na seção 3.3, há uma explanação quanto ao funcionamento do sistema, sobre o mecanismo de obtenção da resposta do mesmo, por detector de posição óptico, e o seu método de acionamento, por motor de indução trifásico. Na seção 3.4, finaliza-se o capítulo com os comentários e conclusões.

3.2 BANCADA DE TESTE

Uma mesa de coordenadas é um sistema posicionador, constituído por uma associação de componentes mecânicos, que devem possuir elevada exatidão e confiabilidade, como fusos (trapezoidais e de esferas recirculantes), castanhas, guias, mancais, rolamentos, além de componentes eletro-eletrônicos como motores, sensores de posição, etc. Na Figura 3.1, mostra-se o desenho esquemático de um sistema posicionador com seus principais componentes.

Neste trabalho, utilizou-se uma mesa de coordenadas X-Y composta por duas bases perpendiculares entre si, X e Y, que se movimentam linearmente no plano horizontal. A base X da mesa possui um curso de 200 mm e a base Y de 100 mm, cujos fusos trapezoidais possuem um passo de 4 mm por revolução.

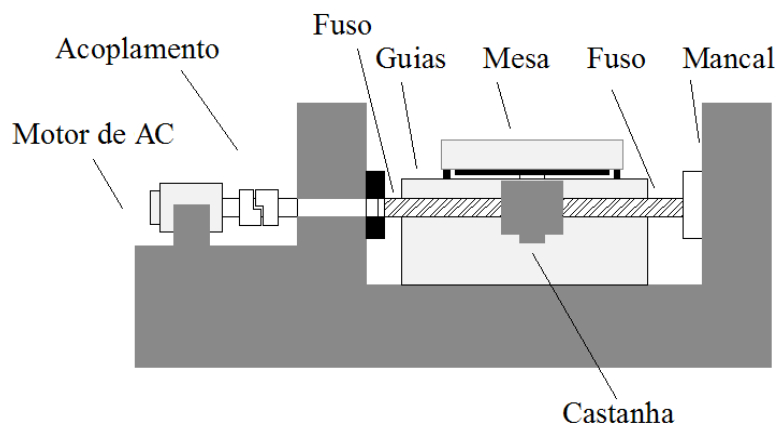


Figura 3.1- Diagrama esquemático de uma mesa de coordenadas.

Os motores de indução trifásicos usados nessa montagem são de 380 V, 60 Hz, com seus eixos acoplados a um conjunto redutor com relação de 10:1, a fim de que haja uma redução de velocidade dos fusos trapezoidais do sistema. Inversores de frequência, série CFW-08 da WEG, estão ligados a esses motores para os seus acionamentos.

Para garantir uma maior proteção ao sistema eletromecânico estudado, instalou-se um par de chaves fim de curso em cada base, delimitando o alcance máximo de movimentação nas direções X e Y. O objetivo disso é evitar danos a ambos os conjuntos redutores, caso as bases chegassem ao fim de seus cursos com velocidade elevada, por ocorrência de falhas de posicionamento ou instabilidade no sistema.

Dois controladores fuzzy foram implementados, um para cada base da mesa, através do ambiente de programação LabVIEW®, instalado em um microcomputador Pentium 1,4 GHz. Uma placa de aquisição de dados NI-DAQ USB 6009, fabricada pela National Instruments®, foi conectada ao computador a fim de realizar a interface desse último com o sistema. Na Figura 3.2, é mostrada a bancada experimental do sistema de posicionamento.

O controle de posição foi implementado em malha fechada, onde os sinais correspondentes à base X são processados e transmitidos independentemente dos sinais correspondentes à base Y, através da malha de controle de cada base, sem haver interação entre os controladores individuais.

O sistema é composto por um subsistema de medição de posição e um subsistema de acionamento. O primeiro subsistema corresponde à aquisição e tratamento dos sinais de saída da planta, e o segundo compreende à obtenção e

condicionamento dos sinais de entrada nos motores. Na Figura 3.3 é apresentado o diagrama de blocos do sistema.

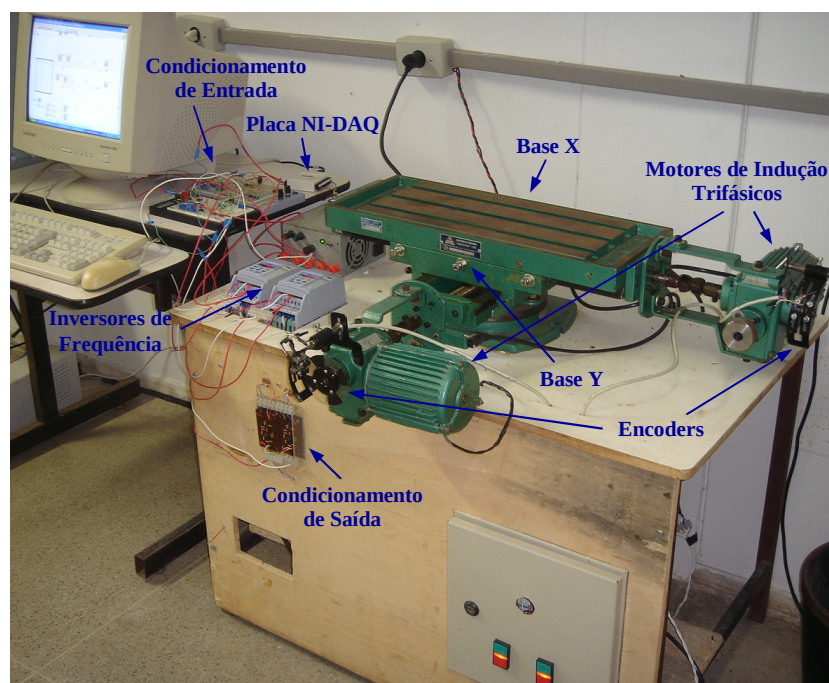


Figura 3.2 – Bancada experimental do sistema de posicionamento.

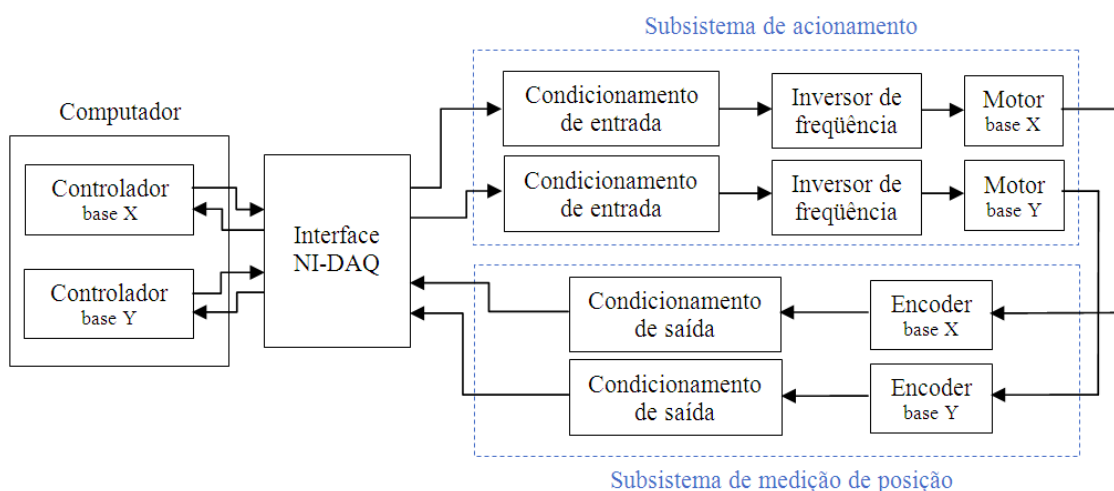


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do sistema de controle de posição.

Os sinais de referência das bases X e Y da mesa são determinados pelo usuário do sistema no programa LabVIEW®. A referência de valor nulo corresponde à posição central do curso de ambas as bases. As referências de valores positivos implicam em deslocamentos nas bases X e Y, na região delimitada do centro a um dos extremos dos

seus cursos, e as referências negativas resultam em movimentos das bases do centro às suas extremidades opostas.

Nesse projeto de controle à malha fechada com retroalimentação negativa, as informações sobre o sinal de saída do sistema são utilizadas para corrigir o erro (desvio) entre o sinal de referência e o valor de posição atual.

A partir dos dados do erro e da derivada desse erro, o valor da variável de controle é gerado no programa computacional LabVIEW®, utilizando o toolbox de controle fuzzy. O programa para obter esses dados é mostrado no Apêndice A.

3.2.1 Subsistema de Medição de Posição

Para a medição de posicionamento das bases X e Y, projetou-se para cada malha de controle um arranjo detector de posição (encoder) composto por dois acopladores ópticos, além de um circuito eletrônico de condicionamento do sinal de saída.

A aplicação de encoder óptico, em sistemas à malha fechada, é bastante comum, devido a sua simplicidade de construção e utilização. Ele foi acoplado ao eixo do motor de indução para a medição da posição angular do eixo e verificação do seu sentido de rotação (horário ou anti-horário). Essas informações indicam a posição e o sentido de deslocamento da base da mesa.

Os encoders confeccionados para a realização desse trabalho consistiram de um disco com 8 divisões dispostas a 45° entre si, sendo 4 transparentes e 4 opacas, e um par de acopladores ópticos inserido nas bordas deles. A configuração desse detector de posição é ilustrada na Figura 3.4.

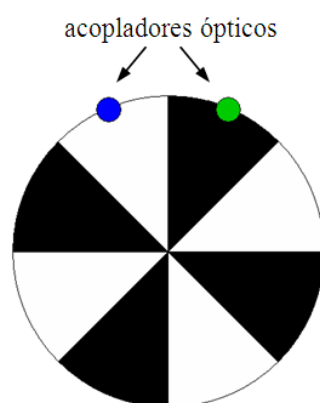


Figura 3.4 – Encoder óptico do sistema de medição.

O acoplador óptico é um sensor formado por um emissor de luz, geralmente um LED, e um receptor, fototransistor. O fototransistor funciona baseado no fenômeno físico da fotocondutividade, ou seja, quando há luz incidindo nele, a sua tensão de saída é igual a sua tensão V_{cc} de alimentação, que neste projeto foi de 5 V, e na ausência de luz sobre esse dispositivo a tensão de saída foi de 0 V.

Por meio da rotação do encoder, os acopladores ópticos capturaram um sinal elétrico com forma de onda, teoricamente, quadrada, com nível baixo de 0 V e nível alto de 5 V. Na prática, o sinal recebido por esses sensores não possui uma transição instantânea entre os níveis alto e baixo, como o de uma forma de onda quadrada ideal. A Figura 3.5 mostra o exemplo de um sinal de onda quadrada.



Figura 3.5 - Sinal de onda quadrada com distorções.

O sinal de saída do sistema é transmitido a um circuito de condicionamento de saída, o Shcmitt Trigger, com a finalidade de atenuar os ruídos, assim como diminuir os tempos de subida e de descida e eliminar o multi-chaveamento que os ruídos ocasionam no limiar de comutação dos níveis do sinal (PRODANOV, 2001). Os circuitos eletrônicos do Shcmitt Trigger e do acoplador óptico, usados neste trabalho, estão apresentados no Apêndice B.

Após o tratamento da saída do sistema, esse sinal digital é enviado à placa de aquisição de dados NI-DAQ, através das entradas digitais da sua porta P0. Essa porta disponibiliza 8 entradas, sendo 4 delas utilizadas: 2 entradas para o sinal proveniente do encoder óptico da base X e 2 entradas para o sinal lido pelo encoder da base Y. Assim, a partir do byte processado da porta P0, apenas 4 bits, que correspondem às entradas da placa com os sinais das retroalimentações, foram utilizados na programação em LabVIEW®. Esse programa computacional converte os sinais digitais em binário e, em seguida, para codificação decimal.

A ordem da contagem decimal deve-se à configuração do conjunto detector de posição. No caso dos encoders confeccionados, em uma revolução completa ocorrem 16 pulsos elétricos com 4 estados em código Gray. Se a rotação do encoder fosse no

sentido horário, os decimais obtidos eram 0, 1, 3 e 2, nessa ordem. Caso contrário, se a rotação fosse no sentido anti-horário, adquiriam-se os decimais em ordem inversa: 0, 2, 3 e 1. Na Figura 3.6, apresenta-se o sinal de saída em binário, obtido pelo par de acopladores ópticos (acoplador 1 e acoplador 2) em uma volta completa, e a conversão desse sinal para decimal.

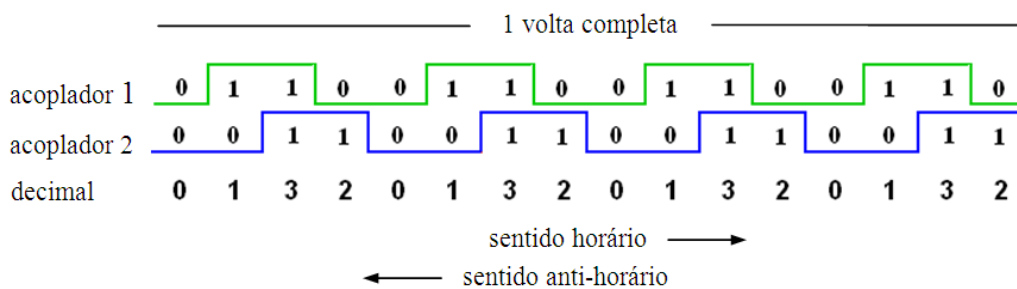


Figura 3.6 – Conversão do sinal de saída de binário para decimal.

Um algoritmo para a contagem da quantidade de pulsos elétricos foi desenvolvido, por meio da atualização do número decimal processado a cada iteração do laço no programa no intervalo de 20 ms. Se o número decimal atual (lido no tempo atual) em relação ao decimal anterior (processado na iteração anterior) correspondesse ao sentido de revolução horário do encoder, o algoritmo contador efetuava um incremento unitário, caso correspondesse ao sentido anti-horário, o algoritmo decrementava em um unitário a contagem. Assim, os incrementos e decrementos foram acumulados no programa a cada amostragem, implicando em uma contagem em números inteiros, {..., -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, ...}. Na Figura 3.7, é mostrada a contabilização do contador em números inteiros a partir dos dados decimais, para a metade de uma revolução do encoder.

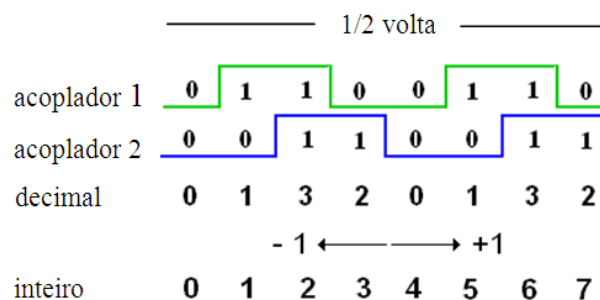


Figura 3.7 – Incremento e decremento dos números inteiros pelo contador.

Como o movimento angular dos eixos dos motores resulta no movimento linear do sistema, cada volta completa desses eixos corresponde a um deslocamento linear de 4 mm tanto na base X quanto na base Y. Para verificar a precisão dessa informação, realizou-se a calibração entre as ranhuras de ambos os fusos trapezoidais da mesa com um paquímetro, o qual indicou, também, um avanço de 4 mm.

A partir dessa informação e lembrando que em uma volta completa do eixo eram processados 16 pulsos elétricos, obteve-se a relação entre o deslocamento da mesa e o número de pulsos por volta, resultando em uma relação de 0,25 mm/pulso, ou seja, um passo de 0,25 mm em cada base da mesa equivale a 1 pulso lido pelos respectivos acopladores ópticos.

A codificação do sinal de saída digital para binário e por sua vez em decimal, o algoritmo contador desenvolvido, e a obtenção da posição em milímetros estão apresentados no Apêndice A.

3.2.2 Subsistema de Acionamento

Para acionar as bases X e Y da mesa, o subsistema de acionamento é composto por circuitos de condicionamento de entrada, inversores de frequência e motores de indução trifásicos.

No LabVIEW®, após a aquisição dos sinais de saída do sistema, os controladores fuzzy geram os sinais de controle que alimentam o subsistema de acionamento.

Esses sinais de controle variam de 0 V a 5 V e são enviados para as saídas analógicas da placa de aquisição de dados NI-DAQ. Esses valores máximo e mínimo de tensão do sinal de controle são determinados de acordo com a limitação de tensão de 0 V a 5 V das saídas analógicas da placa. Como a especificação de alimentação dos inversores de frequência utilizados é de 0 V a 10 V, os sinais de controle para as bases X e Y são transmitidos da placa para os respectivos circuitos de condicionamento de entrada, a fim de adaptar esses sinais às tensões que acionam os inversores de frequência. O circuito de condicionamento de entrada desenvolvido é mostrado no Apêndice B.

Os sinais de controle, após os seus condicionamentos, são enviados aos inversores de frequência, usados em modo remoto. Cada inversor aciona o motor de indução trifásico ao qual está ligado.

Os inversores de frequência são os equipamentos mais adequados para controlar a velocidade de rotação e o torque dos motores de indução (BORDON, 2004). Através dos inversores são fornecidas tensão e frequência variáveis a esses motores, controlando a relação entre tensão e frequência por meio da modulação por largura de pulso (PWM).

A modulação PWM consiste de amostras representadas por pulsos de amplitude fixa e largura proporcional ao sinal de tensão no instante da amostragem. Na Figura 3.8, é apresentado o controle PWM senoidal. A tensão trifásica senoidal de referência U_s é sobreposta por uma tensão triangular U_Δ . A interseção desses sinais gera os pulsos que ligam ou desligam os semicondutores dos inversores de frequência.

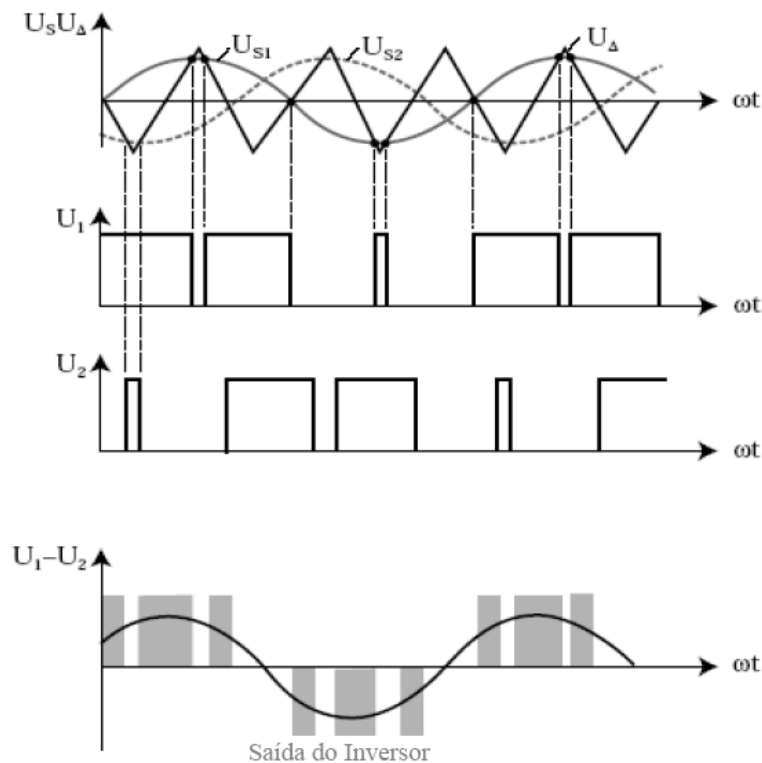


Figura 3.8 – Modulação PWM controlado por sinal senoidal.

Para a variação de velocidade e partidas suaves nos motores de indução trifásicos, é usado nos inversores o controle de velocidade tipo Volts/Hertz ou V/f, conhecido por controle escalar. Nesse princípio de controle, ao variar-se proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação dos motores, o fluxo e, conseqüentemente, o torque permanecem constantes. Conforme representado na Figura 3.9, a variação da relação V/f é linear até a frequência base f_b (nominal) do

motor. Acima dessa frequência, a tensão V_b (nominal) é máxima e permanece constante, havendo apenas a variação da frequência aplicada ao enrolamento estatórico do motor.

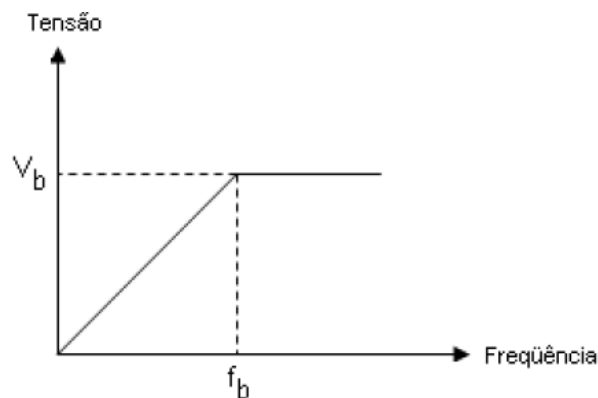


Figura 3.9 – Curva representativa da variação V/f .

Para frequências maiores que a frequência base, caracteriza-se a região de enfraquecimento de campo, visto que o fluxo decresce com o aumento da frequência, provocando também a diminuição de torque. A curva característica torque versus velocidade do motor acionado pelo inversor de frequência é apresentada na Figura 3.10.

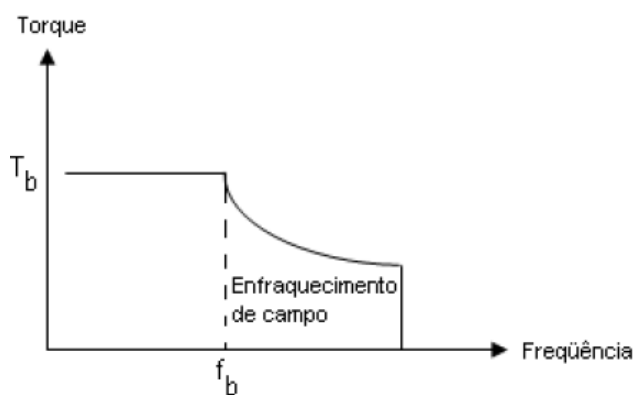


Figura 3.10 – Curva característica torque versus velocidade.

A potência de saída do inversor de frequência se comporta da mesma forma que a variação V/f , ou seja, cresce linearmente até f_b e permanece constante acima dessa frequência, conforme Figura 3.11 (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2010).

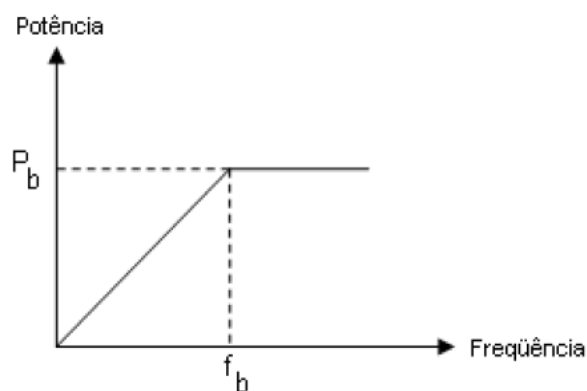


Figura 3.11 – Curva característica da potência de saída do inversor.

Nos inversores utilizados, para uma partida relativamente suave dos motores e, além disso, evitar solavancos que desgastam os componentes mecânicos do sistema, principalmente nos conjuntos redutores, programou-se um tempo de aceleração/desaceleração de 0,1 s em rampa. Isso permitiu um melhor controle, evitando um posicionamento inadequado da base X ou Y, e a minimização de sobre-sinais. Quanto à frequência, parametrizou-se em 0 Hz a frequência mínima e 60 Hz a frequência máxima, a fim de obter um controle de posição rápido para esse tipo de configuração de sistema.

Com relação ao funcionamento do motor de indução trifásico, a aplicação da tensão alternada nos enrolamentos do estator, gera em um campo magnético rotativo em torno do eixo central do motor. A variação de fluxo desse campo magnético induz uma tensão nos enrolamentos do rotor, gerando correntes rotóricas. Essas correntes, sob a ação do campo magnético oriundo do estator, originam a força magnética geradora do torque no rotor, resultando no giro desse último. Na Figura 3.12 é mostrada a configuração interna de um motor de indução.

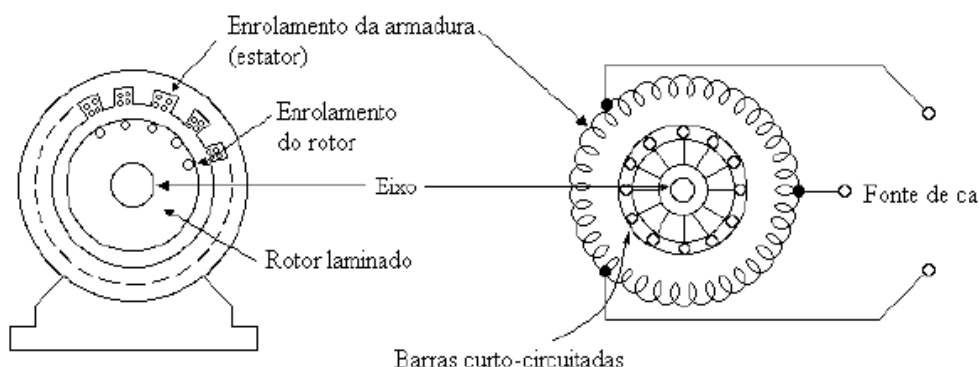


Figura 3.12 – Enrolamentos do estator e do rotor de um motor de indução.

A velocidade de rotação síncrona do campo magnético n_s em (rpm), é dada pela Eq. (3.1), onde: f é a frequência aplicada ao estator em (Hz) e p é o número de pólos. A relação entre a velocidade de rotação do campo girante e a velocidade de rotação do rotor n_r em (rpm) chama-se escorregamento s , dado pela Eq. (3.2) (CAMBOIM, 2008).

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (3.1)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

Como o número de pólos do motor é fixo, a velocidade de rotação desse tipo de máquina é variada na mesma proporção que se varia a sua frequência de alimentação. Isso é possível através da alimentação de tensão alternada de frequência ajustável pelo inversor de frequência a esses motores. A variabilidade da frequência de alimentação dos motores resulta na variação da velocidade de rotação do eixo do motor de indução e, conseqüentemente, na velocidade de movimentação das bases da mesa

A partir do acionamento do motor de cada malha de controle, as bases X e Y da mesa se deslocam linearmente. A base X se movimentando para direita ou esquerda e a base Y com deslocamentos de avanço ou retrocesso, dependendo do sinal de controle enviado pelos seus controladores fuzzy.

3.3 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo, foi apresentada a montagem experimental da mesa de coordenadas X-Y, especificando os componentes eletromecânicos que a compõe.

Mostrou-se o funcionamento desse sistema posicionador, desde a detecção dos sinais digitais de saída até os acionamentos das suas bases. Essa abordagem foi realizada, dividindo-se as malhas de controle da mesa em subsistema de medição de posição e subsistema de acionamento, conforme apresentação do digrama de blocos mostrado na Figura 3.3. A metodologia de leitura dos movimentos angulares, pelos encoders ópticos, e a possibilidade de variação da velocidade linear, por motores de

indução trifásicos alimentados através de inversores de frequência, apresentaram os desempenhos esperados.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE FUZZY

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é mostrada a implementação dos controladores fuzzy do servomecanismo estudado. Na seção 4.2, faz-se um breve comentário sobre a lógica fuzzy. Na seção 4.3, são apresentadas as construções dos blocos funcionais dos controladores: fuzzificação, defuzzificação e inferência fuzzy. Os comentários e conclusões se encontram no final do capítulo, na seção 4.4.

4.2 NOTA SOBRE LÓGICA FUZZY

A lógica fuzzy é uma técnica que emula o raciocínio humano em sistemas de controle, introduzindo estratégias de tomadas de decisão em processos complexos, sendo freqüentemente referida como inteligente, por introduzir alguma forma de inteligência artificial nas máquinas.

Segundo RUBIO *et al.* (2002) os algoritmos fuzzy são adaptativos e robustos, devido, principalmente, à sua arquitetura formada por uma base de conhecimento, gerada com determinado grau de incerteza, e um conjunto de regras que auxiliam na escolha do valor de comando adequado para uma situação específica.

No Apêndice C, encontra-se um embasamento teórico referente à constituição dessa arquitetura fuzzy.

4.3 MODELAGEM DOS CONTROLADORES

De acordo com o princípio fuzzy de controle, para a modelagem dos controladores da mesa de coordenadas, utilizou-se o conhecimento prévio do comportamento que se desejava do sistema no transitório até atingir o regime permanente. Desta forma, foram projetados esses controladores, através da determinação da fuzzificação, das regras de controle e do método de defuzzificação.

A modelagem dos termos lingüísticos das variáveis de entrada e de controle, dos controladores do sistema, foi baseada, inicialmente, nas sugestões da literatura de SHAW e SIMÕES (2004). Segundo eles, o uso de duas a sete funções de pertinência é a quantidade prática recomendada. Quanto maior o número desses termos, maior a exatidão, embora a demanda computacional se torne mais significativa. Além disso, as funções de pertinências não precisam ser simétricas, podendo assumir diversos formatos e distribuições nos universos de discurso específicos das variáveis.

Ambos os controladores fuzzy desenvolvidos, um para controlar a base X e outro para o controle da base Y, possuem as mesmas configurações na sua construção: termos lingüísticos, variáveis de entrada, inferências e variáveis de controle. Para a implementação dos controladores, utilizou-se o Fuzzy Logic Toolkit do programa LabView®.

O desenvolvimento dos blocos funcionais dos controladores é abordado a seguir.

4.3.1 Fuzzificação

Na etapa de fuzzificação dos controladores, foram criadas duas variáveis de entrada: o erro (Erro), definido pela diferença entre o valor de referência e o valor da posição, e a derivada desse erro (Derro).

Os universos de discurso do Erro e do Derro compreendem o intervalo de -1 a 1. Para a normalização desses universos, tanto as referências quanto as respostas do sistema foram normalizados em relação a um valor de 20 mm. Pois esse parâmetro, após realização de vários ensaios, permitiu um melhor controle de posição das bases, inclusive para pequenos deslocamentos, visto que nesses casos o posicionamento era mais crítico.

A variável lingüística Erro foi constituída por sete funções de pertinência, com formatos triangular e trapezoidal, denominadas: NG (Negativo Grande), NM (Negativo Médio), NP (Negativo Pequeno), QZ (Quase Zero), PP (Positivo Pequeno), PM (Positivo Médio) e PG (Positivo Grande). Na Figura 4.1, apresenta-se a disposição dos termos lingüísticos do Erro no seu universo de discurso.

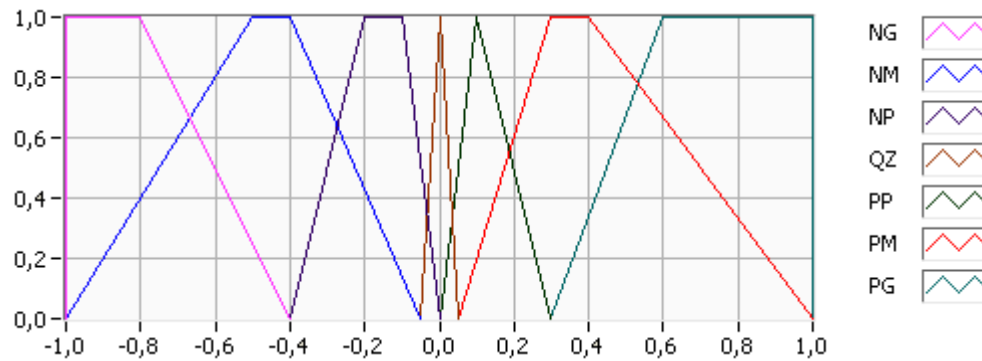


Figura 4.1 – Funções de pertinência da variável de entrada Erro.

Para a variável Derro foram associadas cinco funções de pertinência, com formas triangular e trapezoidal, definidas pelos termos: NG, NP, QZ, PP e PG. Na Figura 4.2 são mostradas essas funções.

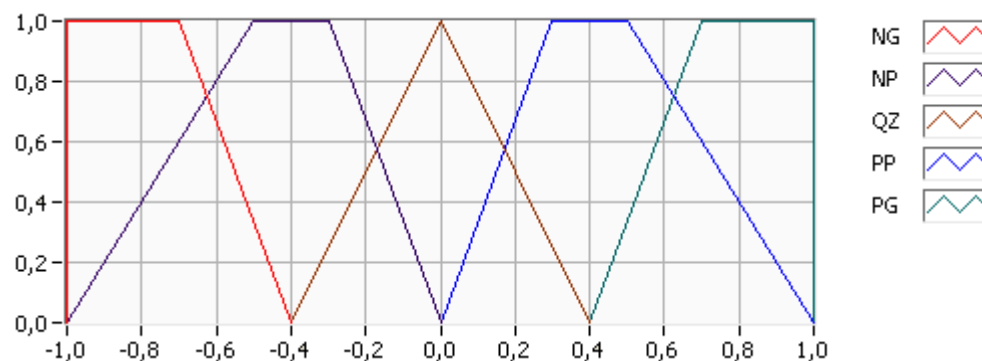


Figura 4.2 – Funções de pertinência da variável de entrada Derro.

4.3.2 Defuzzificação

Na defuzzificação, cada controlador contém uma variável de controle (Saída), a qual gera os sinais de controle, ou seja, as tensões de controle, que acionam as bases da mesa. Essa variável possui sete funções de pertinências, em triângulo e trapézio, que são NG, NM, NP, QZ, PP, PM e PG, abrangendo o universo de discurso de intervalo [0, 5],

conforme mostrado na Figura 4.3. Esse último intervalo de universo de discurso corresponde à faixa de tensão de 0 V a 5 V, permitida pelas saídas analógicas da NI-DAQ.

Em aplicações de malha fechada, é fundamental que a saída do controlador seja contínua, para que não haja oscilações e instabilidade no sistema, logo a literatura recomenda o uso do método de defuzzificação Centro-da-Área (C-o-A). Esse método conduz a um sinal de controle contínuo e não varia significativamente para pequenas mudanças nas variáveis de entrada (BEZERRA, 2009). Portanto, seguindo recomendações da literatura, optou-se pelo método de defuzzificação C-o-A.

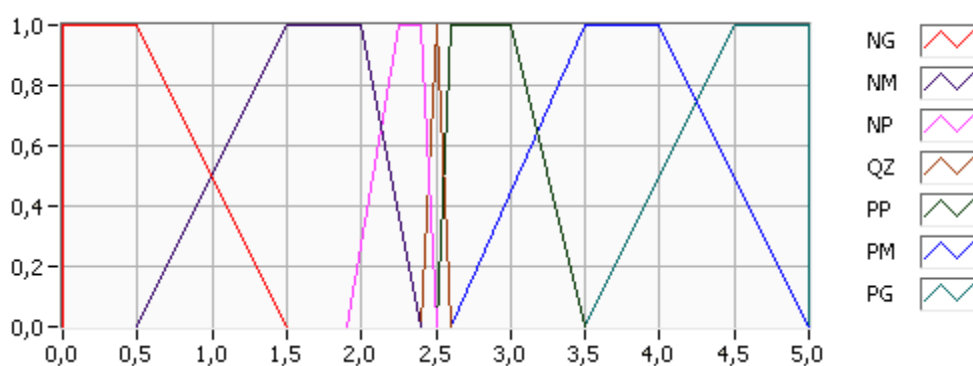


Figura 4.3 – Funções de pertinência da variável de controle Saída.

4.3.3 Inferência Fuzzy

As fases de fuzzificação e defuzzificação estão diretamente relacionadas. A partir da aquisição dos valores numéricos, normalizados, pelas variáveis de entrada, são gerados os sinais de controle discretos, pela variável de controle. Essa relação entre o Erro, o Derro e a Saída é realizada através da etapa de inferência fuzzy. A Figura 4.4 ilustra a ligação entre as entradas e a saída de um controlador.

Na inferência fuzzy desse projeto, para a composição de cada regra de controle e a relação entre elas, utilizou-se a técnica de inferência MAX-MIN.

O método fuzzy aplicado para a modelagem dos controladores foi o proposto por Mamdani. Esse método possibilitou elaborar regras estritamente lingüísticas.

Todas as ações de controle desenvolvidas estão inseridas na tabela de regras fuzzy dos controladores. Essa tabela foi construída, inicialmente, com base nas sugestões de SHAW e SIMÕES (2004) para obter curvas de respostas típicas de um sistema em malha fechada. Eles propõem um controlador com duas variáveis de entrada

e uma variável de controle, as quais são associadas sete funções de pertinência triangulares, a cada variável.

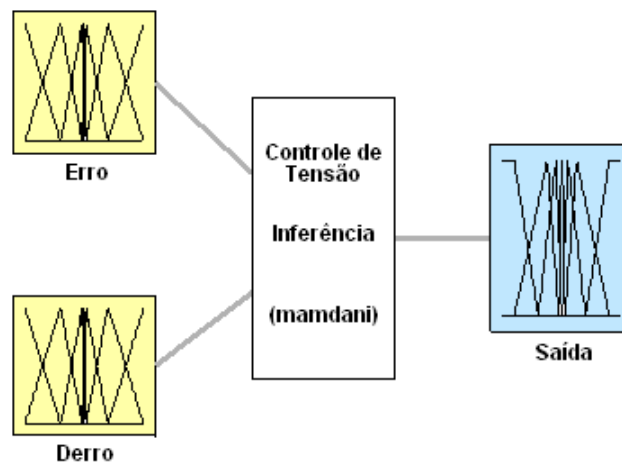


Figura 4.4 – Variáveis de entrada e de saída dos controladores fuzzy.

A Tab (4.1) contém 17 regras relacionadas de acordo com as sugestões citadas anteriormente, onde NB (Negativo Grande), NM (Negativo Médio), NS (Negativo Pequeno), QZ (Quase Zero), PS (Positivo Pequeno), PM (Positivo Médio) e PB (Positivo Grande) são os termos lingüísticos das variáveis.

Tabela 4.1 – Tabela de regras fuzzy sugerido para um sistema à malha fechada.

DERR0 ERRO	NB	NM	NS	QZ	OS	PM	PB
NB				NB			
NM				NM			
NS			NS	NS	OS		
QZ	PB	PM	OS	QZ	NS	NM	NB
OS			OS	PS	NS		
PM				PM			
PB				PB			

A realização de vários ensaios experimentais possibilitou verificar a necessidade de escolha de funções de pertinência mais adequadas, na composição das

regras de controle, e da criação de mais regras do que o proposto por SHAW e SIMÕES (2004).

Portanto, para gerar as respostas desejadas de posição da mesa, foram desenvolvidas 35 regras de controle. A tabela de regras fuzzy do sistema posicionador está apresentada na Tab. (4.2). As 35 sentenças de controle estão descritas na Tab. (D.1) do Apêndice D.

Tabela 4.2 – Tabela de regras fuzzy dos controladores da mesa de coordenadas.

Derro Erro	NG	NP	QZ	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NG
NM	NG	NG	NM	NM	NG
NP	NG	NM	NP	QZ	NG
QZ	NM	NP	QZ	PP	PM
PP	PG	QZ	PP	PM	PG
PM	PG	PM	PM	PG	PG
PG	PG	PG	PG	PG	PG

A partir das configurações dos controladores, é gerada a mesma superfície de controle para as bases X e Y, mostrada na Figura 4.5.

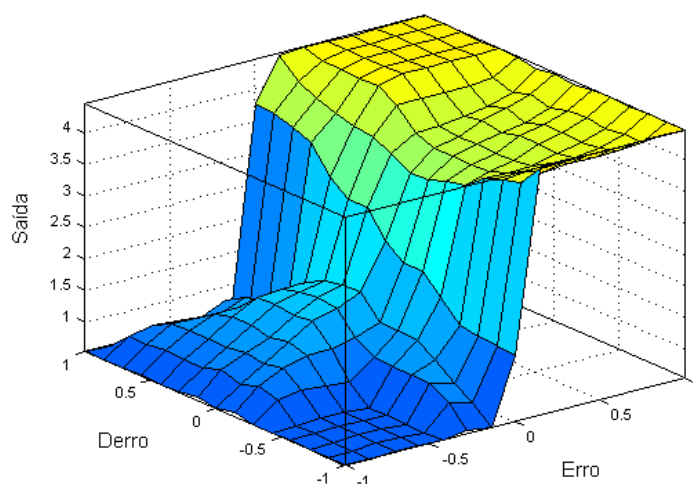


Figura 4.5 – Superfície de controle gerada por cada controlador fuzzy.

4.4 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou a modelagem dos controladores fuzzy do sistema de posição. Foram abordadas a implementação das funções de pertinência das variáveis de entrada e de controle, a opção em aplicar a defuzzificação por C-o-A, a composição das regras de controle, mostradas na tabela de regras fuzzy, e ao final, apresentada a superfície de controle obtida.

O modelamento dos controladores do sistema estudado foi obtido pelo aprimoramento experimental por tentativa e erro, partindo, inicialmente, das recomendações da literatura de SHAW e SIMÕES (2004).

Para isso, efetuaram-se ajustes nas funções de pertinências das variáveis Erro, Derro e Saída, alterando as formas das funções e suas distribuições nos universos de discurso. A assimetria dos termos lingüísticos do Erro e da Saída deveu-se à necessidade de equiparar o controle de posicionamento da mesa nos quatro sentidos de movimento. Antes desses ajustes, os controles de posições da base X e da base Y, com sentidos de deslocamento para direita e de avanço, respectivamente, apresentavam desempenhos diferentes, de quando se controlavam a base X e a base Y nos sentidos para esquerda e de retrocesso, respectivamente.

Além disso, na inferência fuzzy, a composição de cada regra de controle, agregando as funções de pertinências apropriadas, e a elaboração de mais regras, utilizando um total de 35 sentenças, foram fundamentais.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Estão mostrados, neste capítulo, os resultados experimentais obtidos nos testes. Na seção 5.2, são apresentadas algumas informações quanto ao funcionamento da mesa de coordenadas. Na seção 5.3, são analisados os gráficos e alguns valores extraídos a partir deles quanto às imposições de sinais do tipo degrau e degrau variável no acionamento do sistema. Na seção 5.4, avaliam-se os desempenhos dos controladores nos seguimentos às trajetórias das curvas de referência senoidal, cosenoidal e da composição dessas duas últimas. O capítulo é encerrado com os comentários e conclusões na seção 5.5.

5.2 NOTA SOBRE O SISTEMA

Nos gráficos a seguir, plotados através do programa MATLAB®, os valores das tensões de controle de 2,5 V a 5 V correspondem a deslocamentos para direita da base X e de avanço da base Y, enquanto que as tensões de controle de 2,5 V a 0 V resultam em deslocamentos das bases X e Y para esquerda e de retrocesso, respectivamente, com referência a um observador em frente à mesa.

Em todos os acionamentos iniciais do sistema, os movimentos das bases partiram de seus centros. O curso da base X da mesa foi de 200 mm e o da base Y foi 100 mm, conforme informado anteriormente.

Os programas, em LabVIEW®, referentes ao acionamento do tipo degrau e ao acompanhamento de trajetória estão apresentados no Apêndice A.

5.3 ACIONAMENTO DO SISTEMA COM SINAL DO TIPO DEGRAU

Inicialmente, aplicaram-se sinais de referência degrau com valores de amplitude correspondentes às posições nas extremidades dos cursos de cada base da mesa. As bases X e Y não foram acionadas simultaneamente, para esse tipo de teste.

Com relação à base X, primeiro ela foi acionada, partindo do seu centro, por um degrau de referência com amplitude de 100 mm, resultando em um deslocamento para direita, e em seguida aplicou-se um sinal de referência nulo, o que implicou à base o retorno a sua posição central. No gráfico da Figura 5.1, encontram-se as curvas de resposta da base X e da referência. Na Figura 5.2, observa-se a evolução temporal da tensão de controle.

Em seguida, a partir da posição central, aplicou-se um degrau de referência à base X, porém com uma amplitude de -100 mm, acarretando em um movimento para esquerda. Logo após esse deslocamento, a base X foi acionada por um sinal de referência nulo, provocando um deslocamento para direita em direção ao centro. As curvas de resposta da base e da variável de controle constam na Figura 5.3 e Figura 5.4, respectivamente.

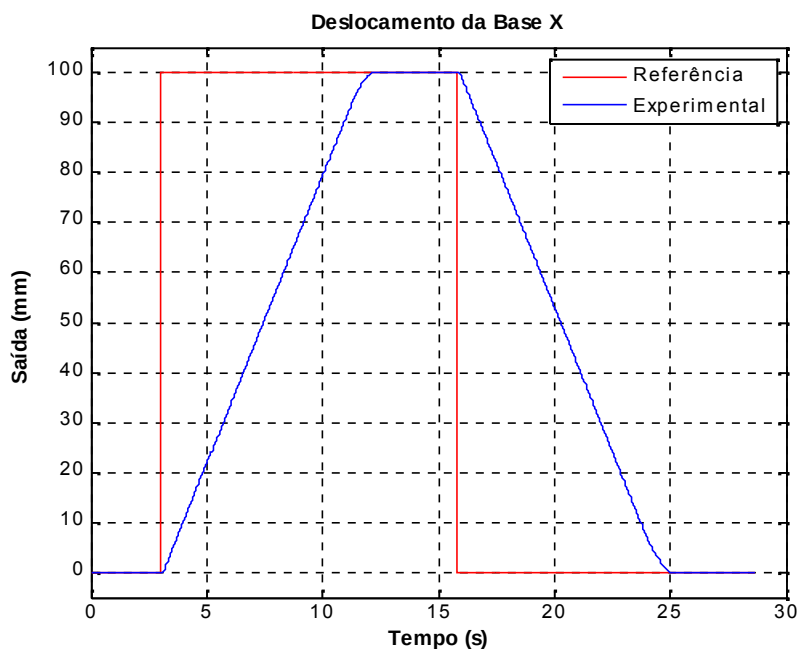


Figura 5.1 – Curvas de resposta e de referência degrau, da base X, para deslocamentos nos dois sentidos.

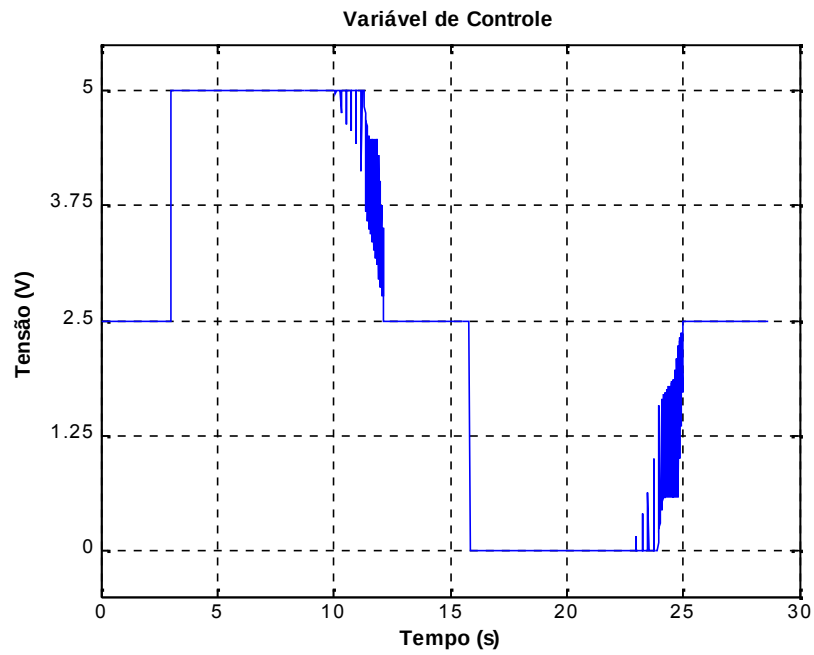


Figura 5.2 – Curva da variável de controle, da base X, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos.

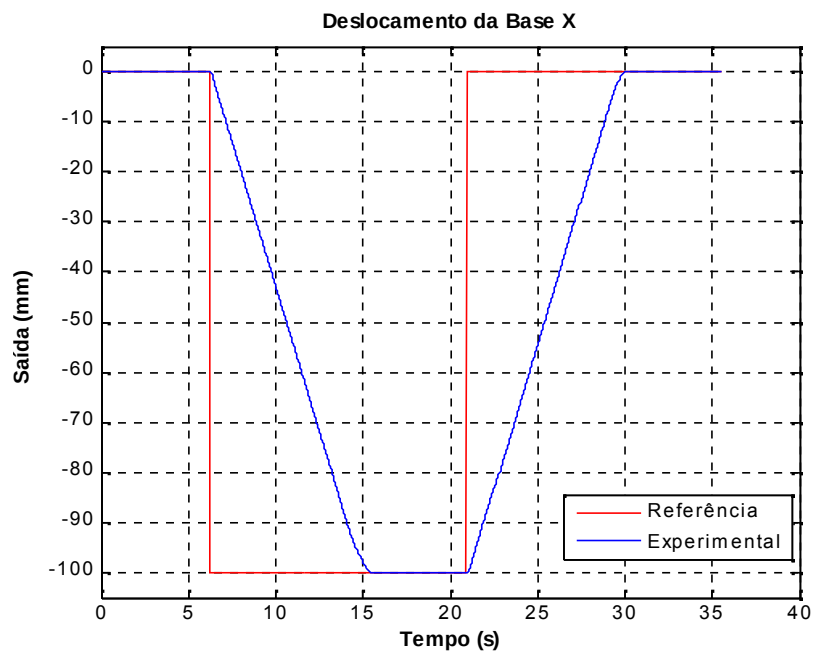


Figura 5.3 – Curvas de resposta e de referência degrau, da base X, para deslocamentos nos dois sentidos.

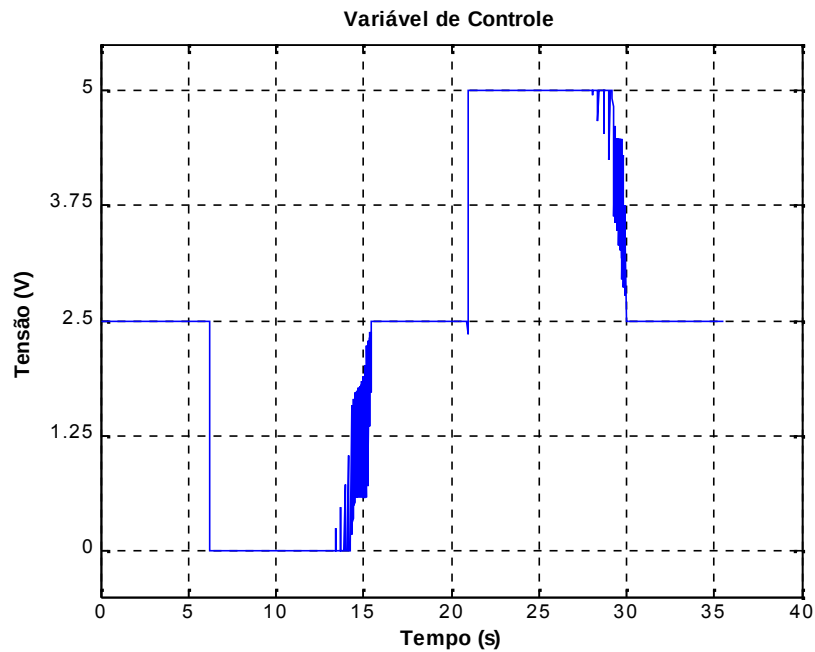


Figura 5.4 – Curva da variável de controle, da base X, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos.

Através das Figuras 5.1 e 5.3, é possível obter os tempos de assentamento T_s , os sobre-sinais M_p e os erros de regime permanente e_{ss} das curvas de resposta às referências. Esses dados, correspondentes à base X, estão apresentados na Tab. (5.1).

Tabela 5.1 – Índices de desempenho experimentais extraídos das curvas de resposta da base X.

Valor medido	Figura 5.1		Figura 5.3	
	Sinal de Referência		Sinal de Referência	
	100 mm	0 mm	-100 mm	0 mm
T_s (s)	8,72	8,80	8,84	8,68
M_p (%)	nulo	nulo	nulo	nulo
e_{ss} (%)	nulo	nulo	nulo	nulo

Analogamente, a base Y, inicialmente posicionada no centro, foi acionada por um degrau de referência com amplitude de 50 mm, implicando em um deslocamento de avanço. Em seguida, aplicou-se um sinal de referência nulo, o que provocou o retorno da base à posição central. As curvas de resposta da base Y e da variável de controle estão mostradas na Figura 5.5 e Figura 5.6, respectivamente.

Na base Y, posicionada no centro da mesa, são aplicados novos valores de referência, resultando em movimentos de retrocesso e de avanço (em direção ao centro), devido à excitação por um degrau de -50 mm de amplitude e por uma referência nula, respectivamente. Na Figura 5.7, é apresentado o sinal de saída, e na Figura 5.8, é mostrada a evolução temporal da tensão de controle.

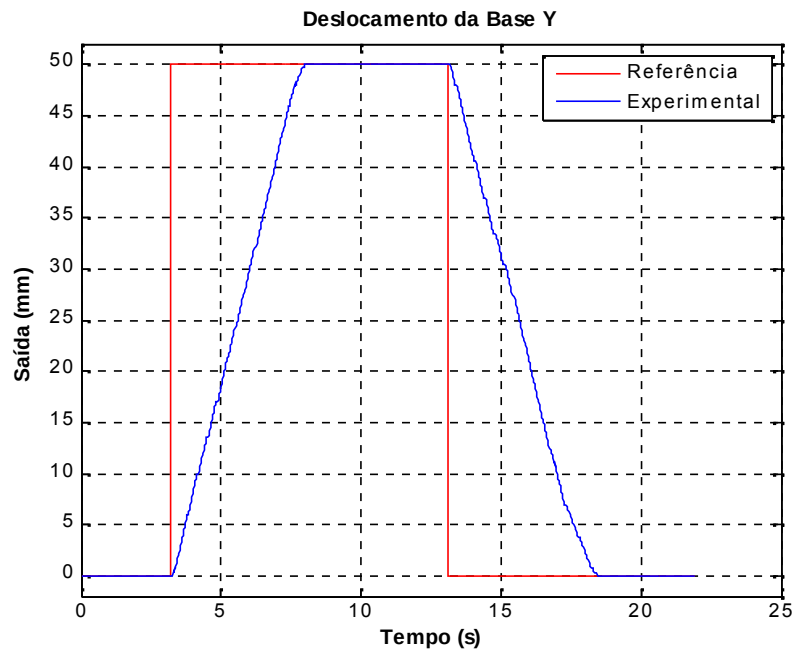


Figura 5.5 – Curvas de resposta e de referência degrau, da base Y, para deslocamentos nos dois sentidos.

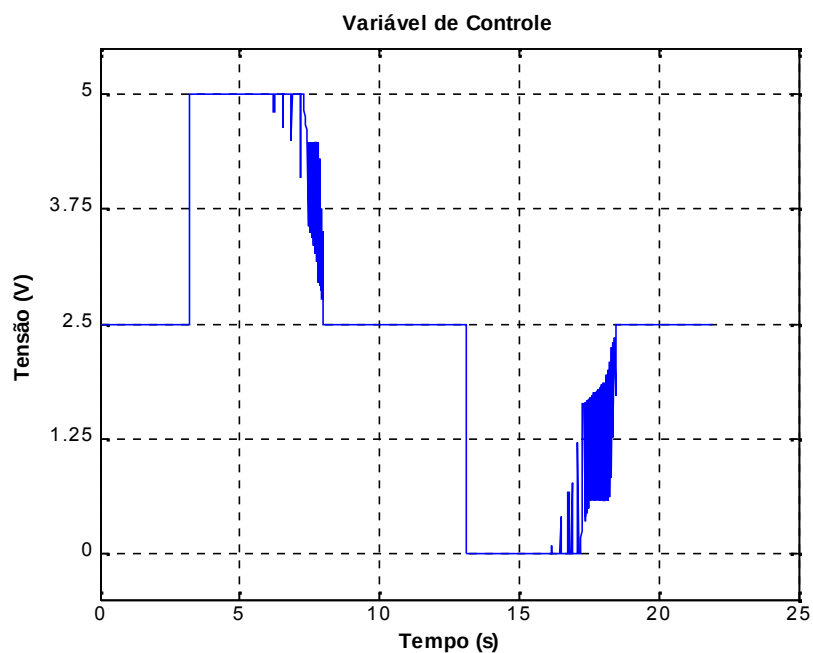


Figura 5.6 – Curva da variável de controle, da base Y, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos.

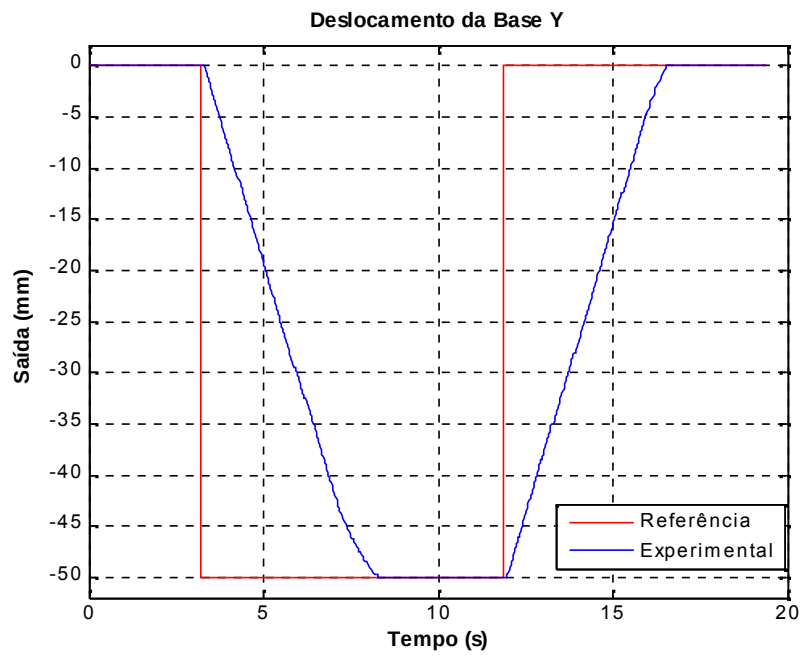


Figura 5.7 – Curvas de resposta e de referência degrau, da base Y, para deslocamentos nos dois sentidos.

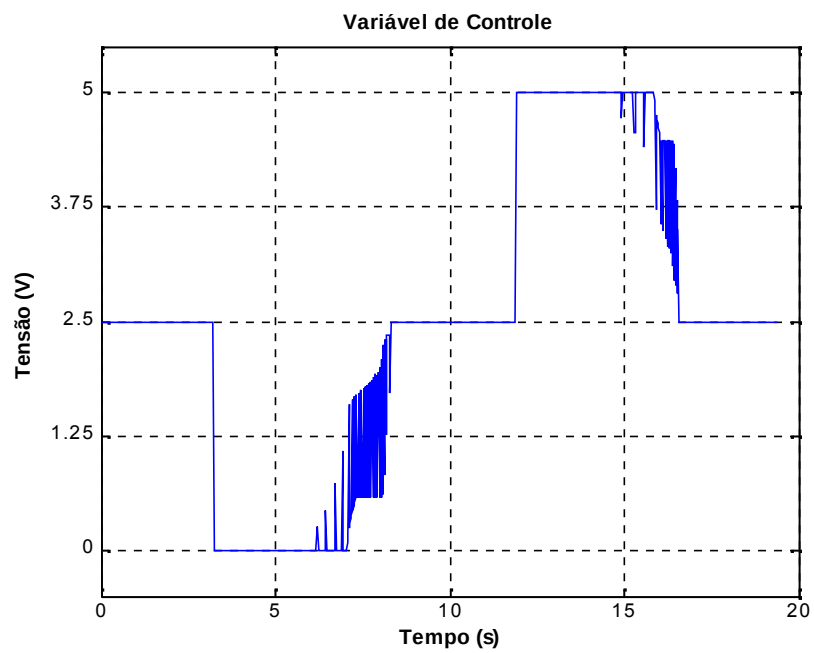


Figura 5.8 – Curva da variável de controle, da base Y, para referência degrau, nos dois sentidos de deslocamentos.

Na Tab. (5.2), constam os valores de T_s , M_p e e_{ss} , correspondentes à base Y, obtidos a partir das Figuras 5.5 e 5.7.

Tabela 5.2 – Índices de desempenho experimentais extraídos das curvas de resposta da base Y.

Valor medido	Figura 5.5		Figura 5.7	
	Sinal de Referência		Sinal de Referência	
	50 mm	0 mm	-50 mm	0 mm
T_s (s)	4,62	5,12	4,82	4,52
M_p (%)	nulo	nulo	nulo	nulo
e_{ss} (%)	nulo	nulo	nulo	nulo

Para verificar a eficiência do controle do sistema às perturbações, aplicou-se um degrau de referência com amplitude de -30 mm à base X. Logo após, foram aplicadas duas perturbações por meio da imposição de rotações ao eixo do motor dessa base, através de um manipulador acoplado ao eixo do seu conjunto redutor. Na primeira perturbação, forçou-se o deslocamento da base para direita até a posição -28,25 mm, e na segunda, um deslocamento dela para esquerda até -31,5 mm.

Na Figura 5.9 é possível observar a curva de resposta às condições especificadas anteriormente. A Figura 5.10 mostra com destaque, a partir da Figura 5.9, os alcances de posições atingidos devido às perturbações, bem como a robustez do controlador. Após cada perturbação a base retornou à posição -30 mm, com sobre-sinal e erro de regime permanentes nulos.

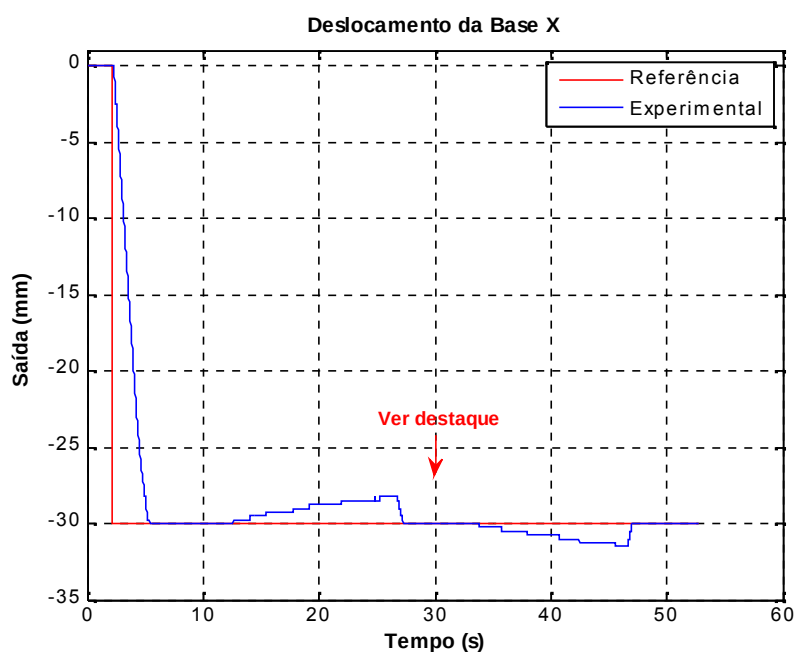


Figura 5.9 – Curvas de resposta e de referência degrau da base X.

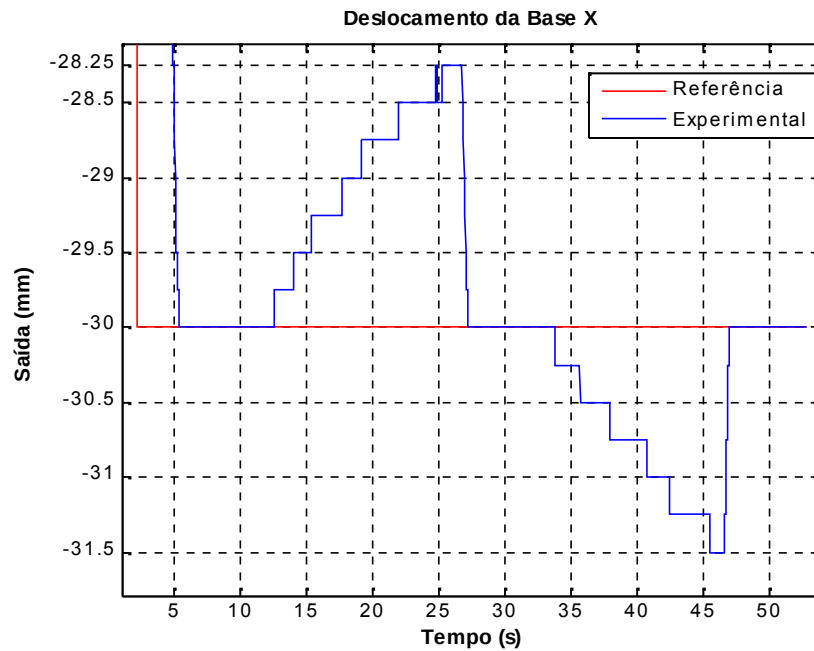


Figura 5.10 – Destaque da curva de resposta para as perturbações na base X.

Com o objetivo de verificar as respostas do sistema para posições distintas ao longo dos cursos da mesa, foram aplicados, tanto na base X como na base Y, degraus de referência com amplitudes variáveis de 10 mm, 15 mm, 23 mm, 30 mm, 26 mm, 14 mm, 0 mm, -12 mm, -20 mm, -25 mm, -30 mm, -19 mm, -8 mm e 0 mm, acionando-se uma base por vez.

Com relação à base X, ela partiu do centro em 0 mm, com movimentação inicial para direita até a posição 30 mm, depois para esquerda, passando pelo centro, continuando em direção à esquerda até -30 mm e ao final retornando à posição central. Na Figura 5.11, encontram-se as curvas de resposta e do degrau de referência variável. A Figura 5.12 apresenta o sinal da tensão de controle.

Todas as posições foram alcançadas com sobre-sinais e erros de regime permanente nulos. O tempo de assentamento do sinal, no primeiro degrau de 10 mm foi de 1,20 s.

Do mesmo modo, inicialmente posicionada em 0 mm, a base Y foi acionada em direção as posições máximas de 30 mm e -30 mm e, em seguida, voltou para a posição 0 mm. As curvas de resposta e da variável de controle estão nas Figuras 5.13 e 5.14, respectivamente.

A curva de resposta de posição apresentou erros de regime permanente nulos. Apenas no controle da posição em -8 mm houve um sobre-sinal de 2,27%. O tempo de assentamento do sinal ao degrau de 10 mm foi de 1,22 s.

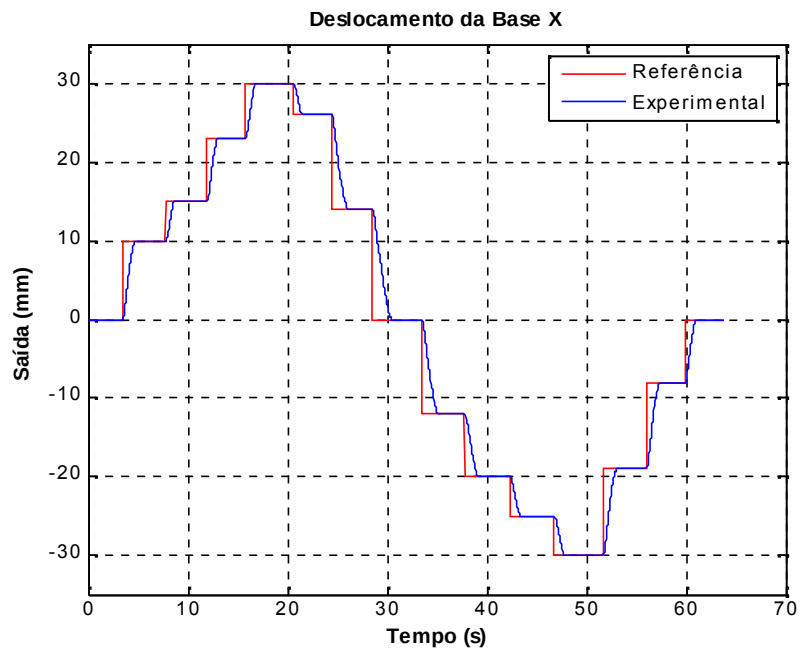


Figura 5.11 – Curvas de resposta e de referência degrau variável da base X.

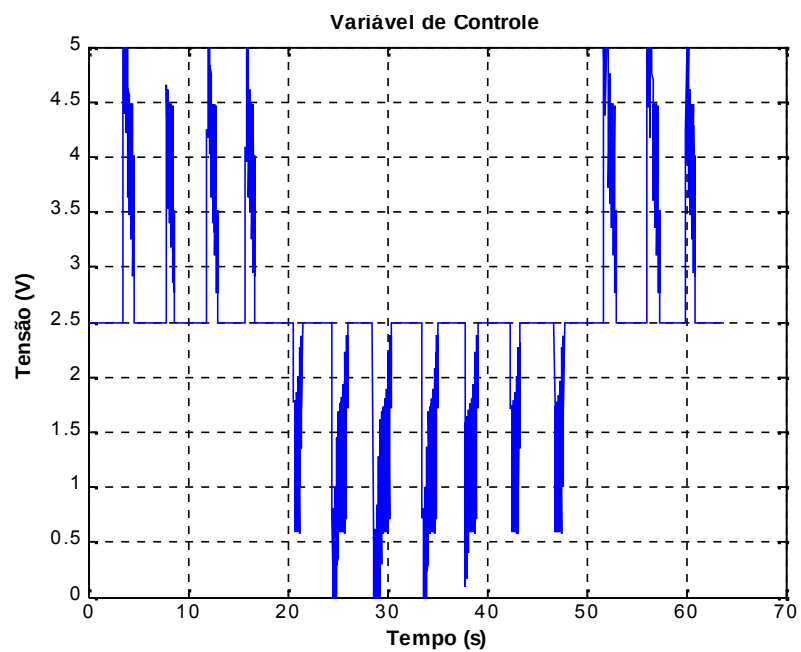


Figura 5.12 – Curva da variável de controle da base X para referência degrau variável.

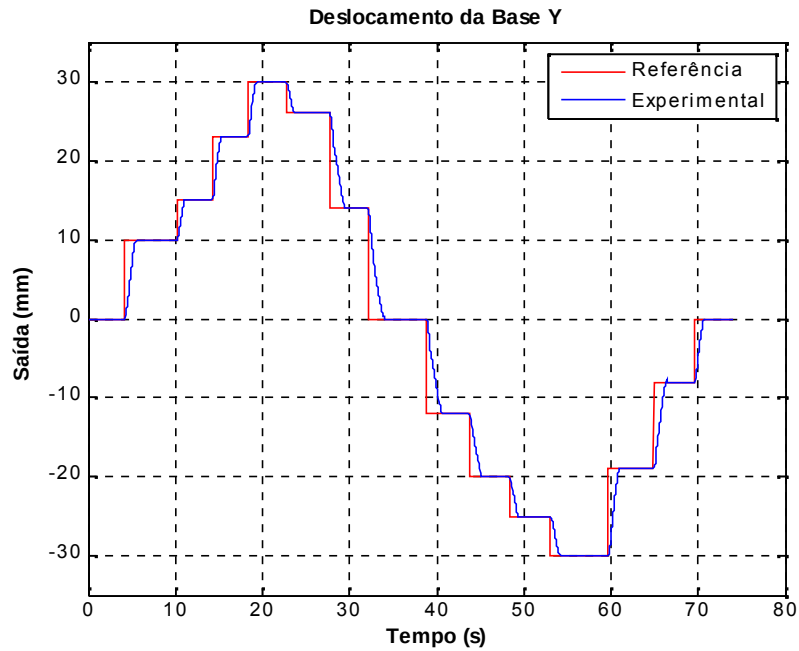


Figura 5.13 – Curvas de resposta e de referência degrau variável da base Y.

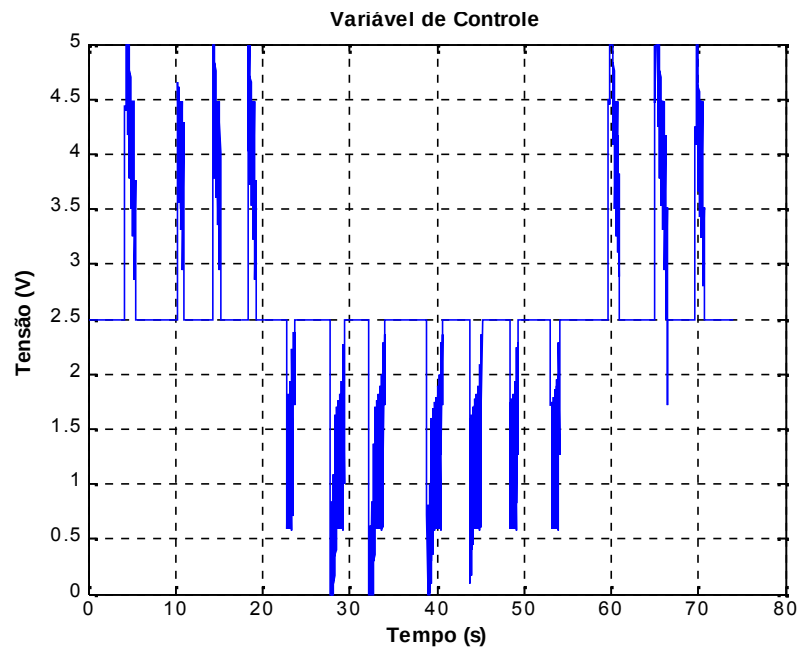


Figura 5.14 – Curva da variável de controle da base Y para referência degrau variável.

5.4 ACIONAMENTO DO SISTEMA COM SINAIS DO TIPO SENO E COSENO

Com a finalidade de testar o controlador quanto ao acompanhamento de trajetória, foram impostos acionamentos simultâneos da base X, por um sinal de referência cosenoidal, e da base Y, por um sinal senoidal. Nesse caso, a mesa não sofre

interrupção da sua movimentação ao atingir uma determinada posição, como no caso anterior, havendo, ao contrário, um movimento permanente, de acordo com a trajetória requerida.

O cosseno e o seno de referências de posição tiveram amplitudes de 30 mm e períodos T variáveis de 150 s, 40 s e 25 s. Ambos os sinais de referência das bases tiveram seus valores compostos, transformando as suas resultantes de coordenadas retangulares para coordenadas polares, através do programa implementado no LabVIEW®, para a obtenção de uma referência em forma de uma circunferência, com diâmetro de 60 mm, centrada no ponto (0,0) mm.

A seguir, são apresentadas as curvas de resposta aos acompanhamentos de trajetória de cada base aos sinais senoidal e cosenoidal; assim como, o acompanhamento à composição dos sinais das bases, devido ao acionamento concomitante delas, o que gerou uma movimentação circular no espaço de trabalho da mesa.

Primeiro, foram analisadas as características dos sinais para um período de 150 s. Na Figura 5.15, é mostrada a curva de resposta à excitação cosenoidal, na Figura 5.16, encontra-se a resposta senoidal obtida e, na Figura 5.17, é apresentada a curva de resposta à composição dos sinais de referência das bases.

Nesses gráficos do cosseno e do seno, é possível observar um bom desempenho nos acompanhamentos das saídas às trajetórias das referências. A Figura 5.17 permite verificar, a partir da composição dos dois sinais das bases, uma forma de onda da resposta bem aproximada da referência.

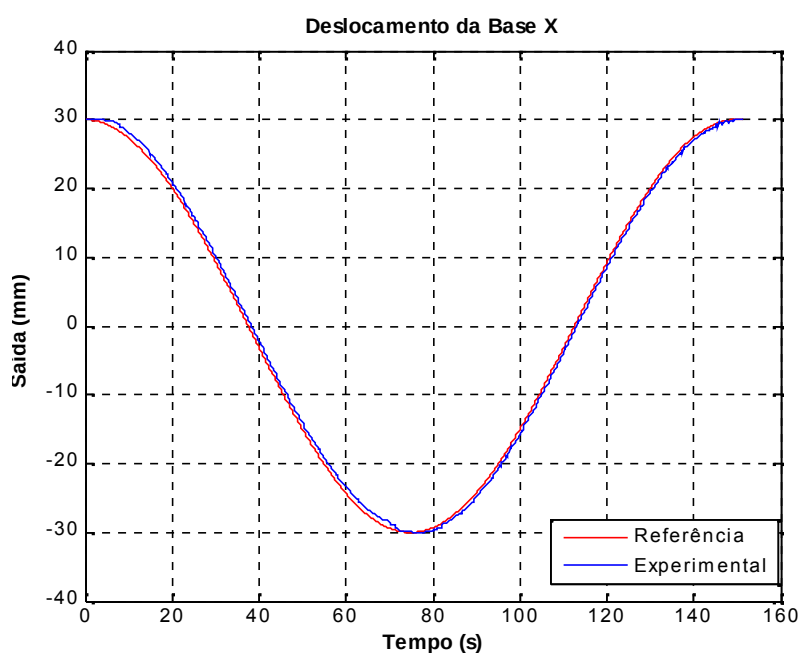


Figura 5.15 – Curvas de resposta e de referência cosenoidal da base X para $T=150$ s.

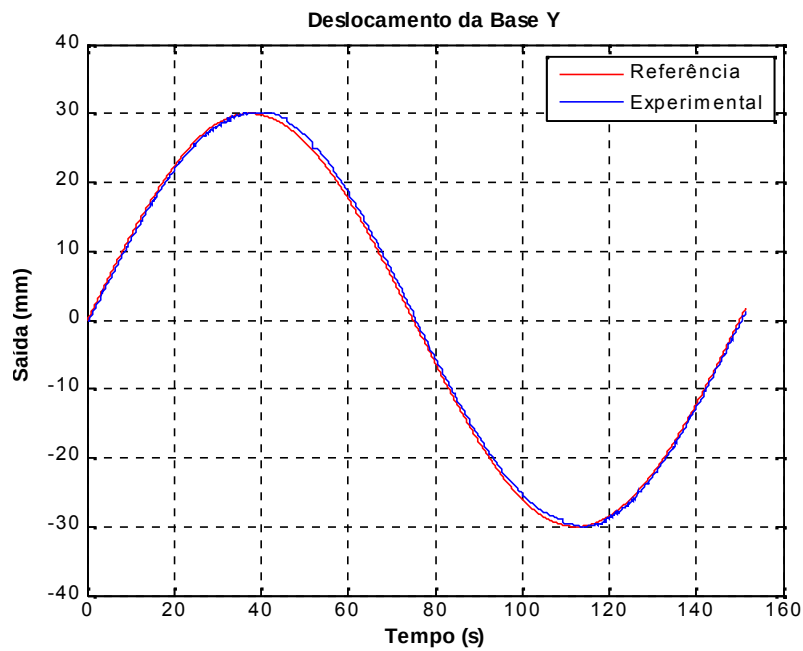


Figura 5.16 – Curvas de resposta e de referência senoidal da base Y para $T=150$ s.

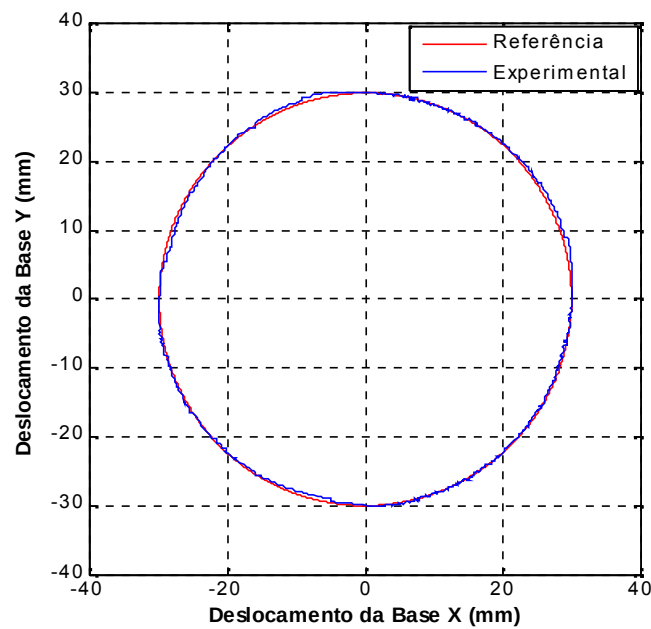


Figura 5.17 – Curvas de resposta e de referência, compostas pelas bases X e Y, para $T=150$ s.

Os seguimentos de trajetória às curvas de referência com período de 40 s estão apresentados a seguir. As Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 mostram os sinais de saída em relação, respectivamente, ao cosseno, ao seno e à composição desses sinais de referência.

Nas Figuras 5.18 e 5.19, nota-se que, apesar do acompanhamento às trajetórias de referências, as saídas cosenoidal e senoidal apresentam uma pequena defasagem em

relação as suas respectivas referências. Essas ocorrências resultaram, conseqüentemente, em uma composição da forma de onda da resposta um pouco menos aproximada a da referência, conforme Figura 5.20.

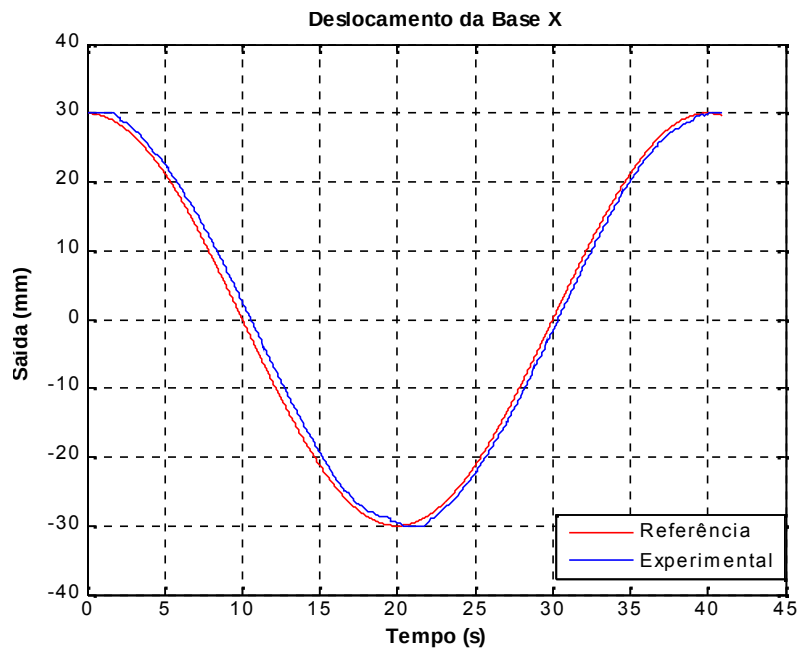


Figura 5.18 – Curvas de resposta e de referência cosenoidal da base X para $T=40$ s.

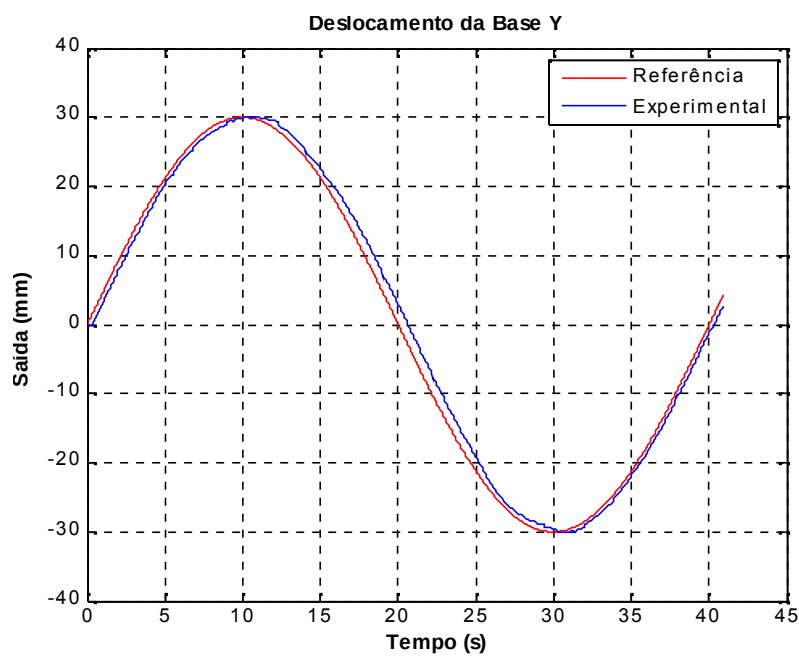


Figura 5.19 – Curvas de resposta e de referência senoidal da base Y para $T=40$ s.

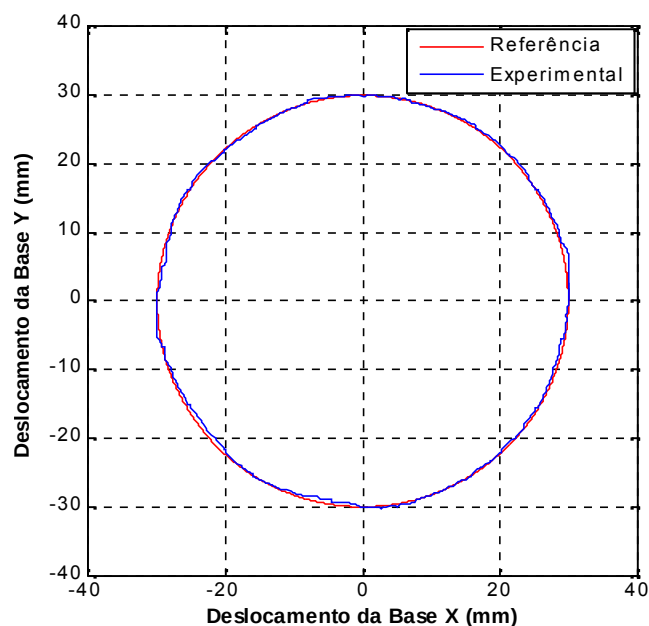


Figura 5.20 – Curvas de resposta e de referência, compostas pelas bases X e Y, para $T=40$ s.

Nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 estão mostrados os resultados correspondentes ao período de 25 s.

Ao analisar as Figuras 5.21 e 5.22, são verificadas, ainda, a tentativa de acompanhamento das curvas de resposta das bases X e Y aos sinais coseno e seno de referências, respectivamente, além de uma maior defasagem em relação às suas referências. Essas degradações de desempenhos no seguimento às trajetórias implicaram em uma forma de onda distorcida da saída em comparação à composição dos sinais de referência das bases, de acordo com a Figura 5.23.

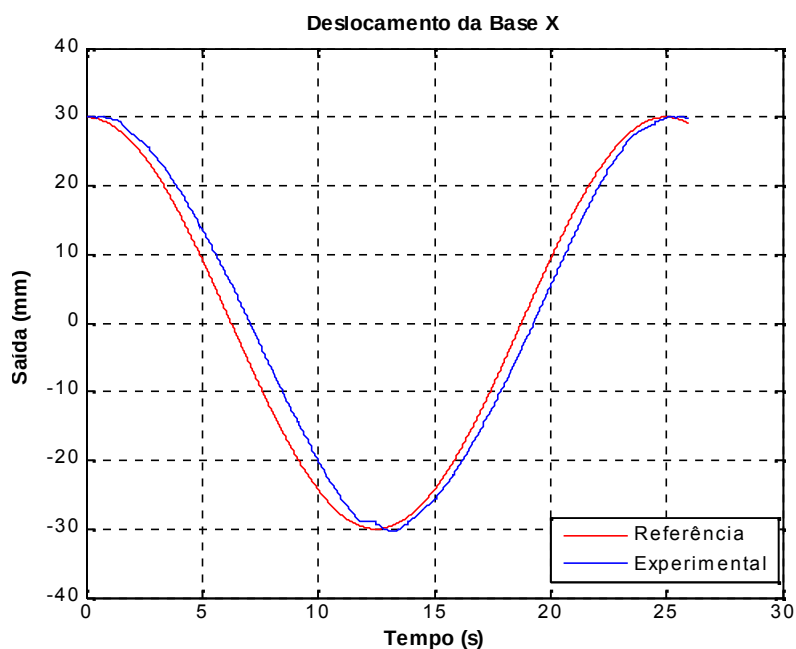


Figura 5.21 – Curvas de resposta e de referência cosenoidal da base X para $T=25$ s.

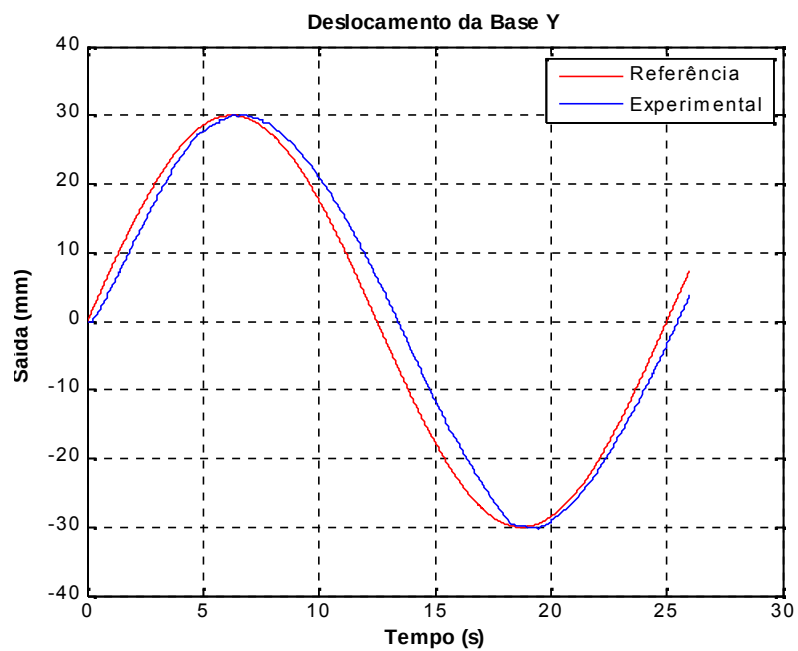


Figura 5.22 – Curvas de resposta e de referência senoidal da base Y para $T=25$ s.

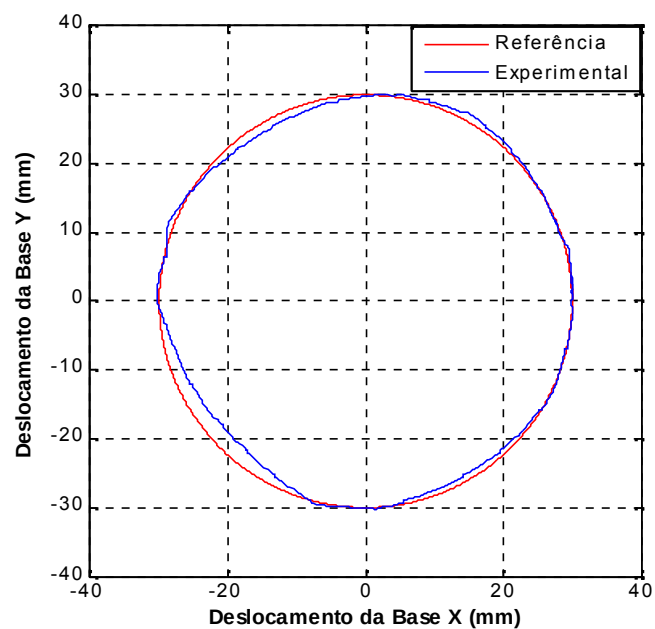


Figura 5.23 – Curvas de resposta e de referência, compostas pelas bases X e Y, para $T=25$ s.

5.5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo, foram apresentados os resultados experimentais obtidos no controle fuzzy do sistema.

Na análise das curvas de resposta ao degrau de referência, foram verificados desempenhos satisfatórios dos controladores fuzzy. Não houve erros de regime permanente, o único sobre-sinal ocorrido foi de 2,27%, entre as diversas determinações de controle de posicionamento por um sinal degrau variável, e o máximo tempo de assentamento foi de 8,84 s.

Os seguimentos às trajetórias dos sinais de referência senoidal, cosenoidal e da composição desses dois sinais apresentaram resultados esperados nos períodos de 150 s e 40 s, principalmente para $T=150$ s. Para períodos maiores que esse último, os acompanhamentos de trajetória apresentam desempenhos cada vez melhores, devido às menores frequências das formas de onda. Em contrapartida, a partir de período menor ou igual a 25 s (frequências mais elevadas), as curvas de saída senoidal e cosenoidal apresentaram aumentos da defasagem no tempo e, conseqüentemente, distorções na composição desses sinais de saída, conforme pode ser percebido nos resultados do ensaio para $T=25$ s. Nos três casos, os ruídos observados nas respostas do sistema foram causados pelo fato da mesa não conseguir atingir os valores fracionários da geração das referências senoidais, devido à limitação da resolução dos detectores de posição.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado o controle de posição e de acompanhamento de trajetória de uma mesa de coordenadas X-Y. O estudo desse servomecanismo proporcionou avaliar o desempenho dos controladores fuzzy do tipo Mamdani em sistemas de posicionamento acionados por motores de indução trifásicos.

A construção dos controladores fuzzy foi realizada experimentalmente, através da elaboração da base de regras e ajustes nas funções de pertinências, excitando-se a mesa com sinais do tipo degrau e analisando as saídas obtidas. A simplicidade e robustez desses controladores permitiram verificar a eficácia do controle inteligente pela técnica fuzzy, conforme pode ser observado nos resultados experimentais das curvas de resposta.

No caso do acionamento por sinais do tipo degrau, os valores de índices de desempenho obtidos das formas de onda das saídas proporcionaram os resultados esperados do sistema. Todos os erros de regime permanente apresentaram valores nulos. Além disso, o controlador mostrou-se eficiente no controle de posição na ocorrência de perturbações, não apresentando sobre-sinais e erros de regime permanente ao retornar à posição inicial.

Quanto ao acompanhamento de trajetória às curvas de referência senoidais, cosenoidais e da composição desses dois sinais, o sistema também apresentou um desempenho esperado. Nos três períodos analisados, a presença de ruídos nas saídas se deveu a limitação da resolução dos detectores de posição. O melhor seguimento à trajetória ocorreu para $T=150$ s, devido a uma menor frequência dos sinais de referência.

Como os resultados obtidos foram coerentes, em ambos os tipos de acionamentos, conclui-se que a modelagem dos controladores por lógica fuzzy, foi bastante eficaz, para um sistema de posicionamento acionado por motores de indução trifásicos.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõem-se os seguintes trabalhos como continuação desta pesquisa:

- Desenvolver controladores neuro-fuzzy;
- Desenvolver controladores pela técnica de redes neurais;
- Utilizar o método de controle vetorial, cuja atuação seria na saída resultante do funcionamento simultâneo das bases da mesa;
- Implementar o controle de posição por estimativa de posicionamento, sem o uso de detector de posição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTROM, K. J. & WITTENMARK, B., 1995. *Adaptive Control*. 2ª Ed., USA, Editora Addison Wesley.
- BEZERRA, S. T. M., 2009, *Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- BORDON, M. E., 2004, *Controlador Nebuloso de Arquitetura Simplificada. Estudo de Caso: Acionamento de Motor de Indução Trifásico*. Tese de D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- BRAGA, C. S., 2006, *Projetos de Controladores para uma Mesa de Coordenadas XY usando Técnicas de Alocação de Pólos*. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- BURGOS-ARTIZZU, X. P., RIBEIRO, A., SANTOS, M., 2007, “Controlador Borroso Multivariable para el Ajuste de Tratamientos en Agricultura de Precisión”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, v. 4, n. 2, pp. 64-71, Abr.
- CAMACHO, J. R., SALERNO, C. H., OLIVEIRA FILHO, A. S., 2003, “Controle de Velocidade do Motor de Indução Trifásico Utilizando Microcontroladores para Aplicações em Baixa Potência”. In: *III Seminário Nacional de Controle e Automação*, v. 1, pp. 105-110, Salvador, BA, Brasil.

- CAMARGO, L. F. S., 1988, *Mesa de Coordenadas XY para Aplicações em Microengenharia com CNC – Projeto e Análise*. Dissertação de M.Sc., UFSC, SC, Brasil.
- CAMBOIM, W. L. L., 2008, *Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água*. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- CAMPOS, M. M., SAITO, K., 2004, *Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora Ciência Moderna.
- CHEN, C. T., 1995, *Analog and Digital Control System Desing – Transfer-Function, State-Space & Algebraic Methods*. Oxford University, Press, Inc. New York, USA.
- DORF, R.C., BISHOP, R. H., 2001, *Sistemas de Controle Modernos*. 8ª ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora LTC.
- FERNANDES, R. T., 2005, *Supervisão de um Sistema Híbrido Eólico/Diesel Usando Lógica Fuzzy*. Dissertação de M.Sc., UFMS, Campo Grande, MS, Brasil.
- FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JR., C., KUSKO, A., 1975, *Máquinas Elétricas*, São Paulo, SP, Brasil, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda.
- GALDI, V., PICCOLO, A., SIANO, P., 2008, “Designing an Adaptive Fuzzy Controller for Maximum Wind Energy Extraction”. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v. 23, n. 2, pp. 559-569, Jun.
- HELD, C. M., ROY, R. J., 2000, “Hemodynamic Management of Congestive Heart Failure by Means of a Multiple Mode Rule-Based Control System Using Fuzzy Logic”. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 47, n. 1, pp. 115-123.
- HEMERLY, E. M., 1996, *Controle Por Computador de Sistemas Dinâmicos*. São Paulo, SP, Brasil, Ed.Edgard Blucher LTDA.

- JANG, J., ROGER, S., 1992, "Fuzzy Controller Design without Domain Experts". *International Conference on Fuzzy System*.
- JESUS, G. A. R., 1999, *Uma Contribuição para o Desenvolvimento e Controle de Sistemas de Posicionamento Submicrométricos*. Tese de D.Sc., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- KIRYU, T., SASAKI, I, SHIBAI, K., *et al.*, 2001, "Providing Appropriate Exercise Levels for the Elderly". *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, v. 20, n. 6, pp. 116-124.
- KOREN, Y., 1978, "Design of Computer Control for Manufacturing System". *American Society of Mechanical Engineers*. Nº 78- USA.
- KOVÁCS, Z. L., 1996, *Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações*, Edição Acadêmica, São Paulo, SP, Brasil.
- KUO, Y. P., LI, T. H. S., 1999, "GA-Based Fuzzy PI/PD Controller for Automotive Active Suspension System". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 46, n. 6, Dez.
- LACERDA, H. B., 1998. *Um Controlador de Erros de Contorno para Máquinas CNC de Alta Velocidade*. Tese de D.Sc., EEE-USP, São Carlos, SP, Brasil.
- LIN, C. T., HUNG, C. W., LIU, C. W., 2007a, "Fuzzy PI Controller for BLDC Motors Considering Variable Sampling Effect". In: *Proceedings of 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 1180-1185, Nov.
- MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S., 1974, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller". *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, pp. 1-13.

- MARIANO, V., 2005, *Controle Adaptativo Aplicado a um Eixo Posicionador de Mesa de Máquina-Ferramenta*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- MENDONÇA, G. L. F., 2008, *Aplicação da Técnica de Controle Fuzzy na Absorção de Vibrações em Estruturas Aporticadas*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- MENEZES FILHO, J. B., 2007, *Controlador Neural Adaptativo para Mesa de Coordenadas*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- NASCIMENTO, J. F. L., 2004, *Identificação do Modelo e Análise de Sistemas de controle para Compensação dos Erros de Posicionamento nas Máquinas-Ferramenta*. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- NASCIMENTO JÚNIOR, C. L., YONEYAMA, T., 2000, *Inteligência Artificial em Controle e Automação*. 1ª ed., São Paulo, SP, Brasil, Editora Edgard Blucher Ltda.
- NISE, N. S., 2002, *Engenharia de Sistemas de Controle*. 3ª ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora LTC.
- NOGUCHI, M. T. G., 2004, *Um Sistema Baseado em Regras Fuzzy para Classificação Supervisionada de Imagens Multiespectrais de Alta Resolução*. Dissertação de M.Sc., UFPR, Curitiba, PR, Brasil.
- OGATA, K., 2003, *Engenharia de Controle Moderno*. 4ª ed., São Paulo, SP, Brasil, Editora Prentice Hall.
- PARASKEVOPOULOS, P.N., 1995. *Digital Control Systems*. First Edition, Prentice Hall, USA.
- PARK, Y. J., CHO, H. S., CHA, D. H., 1995, "Genetic Algorithm-Based Optimization of Fuzzy Logic Controller Using Characteristic Parameters". In: *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, v. 2, pp. 831-836.

- PETROV, M., GANCHEV, I., TANEVA, A., 2003, “Fuzzy PID Control for Nonlinear Plant”. In: *Proceedings of the First Int. IEEE Symposium on Intelligent Systems*, v. 1, pp. 30-35.
- PHILLIPS, C. L. & HARBOR, R. D., 1997, *Sistemas de Controle e Realimentação.*, São Paulo, SP, Brasil, Editora Makron Books do Brasil.
- PRODANOV, W., PAGHI, C. E., SCHNEIDER, M. C., 2001, “Um Comparador de Corrente Schmitt-Trigger Digitalmente Programável. In: *VII Workshop Iberchip*, Montevideu, pp. 33-33.
- QIANG, G., RONGJIE, R., WEI, W., 2008, “Research on Fuzzy-PID Controller in Variable Frequency Air Conditioner System”. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, pp. 3879-3882, Mai.
- REYERO, R., NICOLÁS, C. F., 1995, *Sistemas de Control Basados em Lógica Borrosa: Fuzzy Control*, Omron Elettronics S.A., Espanha, (apud IVANQUI, 2005).
- RUBIO., J. C. C., 1998, “Um Estudo Comparativo de Estratégias de Controle para Sistemas Microposicionadores em Máquinas-Ferramenta”, In: *XII CBA*, v. 3, pp. 899-904, Uberlândia, MG, Brasil.
- RUBIO, J. C. C., DUDUCH, J. G., 2002, “Algoritmo Híbrido PI Difuso + D para Posicionadores de Ultraprecisão”, *II CONEM*, João Pessoa, PB, Brasil.
- RUFINO, F. A. O., 2008, *Desenvolvimento de um Robô Móvel Autônomo com Controle Fuzzy*. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- SHAHIAN, B., HASSUL, M., 1993, *Control System Design*. USA., Prentice Hall, USA.
- SHAW, I. S., SIMÕES, M. G., 2004, *Controle e Modelagem Fuzzy*. São Paulo, SP, Brasil, Editora Edgard Blucher Ltda.

- SHEN, Y., ZHONGXIANG, Z., ENRONG, M., 2007, “Double-Fuzzy Kalman Filter Based on GPS/IMU/MV Sensor Fusion for Tractor Autonomous Guidance”. In: *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 61-65, Ago.
- SHHEIBIA, T. A. A., 2001. *Controle de um Braço Robótico Utilizando uma Abordagem de Agente Inteligente*. Dissertação de M.Sc., UFPB, Campina Grande, PB, Brasil.
- SIMÕES, M. G., FRANCESCHETTI, N. N., 1999, “Fuzzy Optimisation Based Control of a Solar Array System”. *IEEE Proceedings on Electric Power Applications*, v. 146, n. 5, pp. 552-558.
- SKELLY, M. M., CHIZECK, H. J., 2001, “Real-time Gait Event Detection for Paraplegic FES Walking”. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v. 9, n. 1, pp. 59-68.
- SOUSA, F. M. G., 1998, *Controle de Fresadora para a Prototipagem de Circuitos Impressos*. Dissertação de M.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- TAKAGI, T., SUGENO, M., 1985, “Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modelling and Control”. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, v. SMC-15, n. 1, pp. 116-132.
- TANSCHKEIT, R., 1998, Fundamentos de Lógica Fuzzy e Controle Fuzzy. URL: <http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos/download/LN-Sistemas%20Fuzzy.pdf>. PUC-Rio, Acesso em Dezembro de 2008.
- VIEIRA, J. P. A., NUNES, M. V. A., BEZERRA, U. H., et al., 2007, “New Fuzzy Control Strategies Applied to the DFIG Converter in Wind Generation Systems”. *Revista IEEE America Latina*, v. 5, n. 3, pp. 142-149, Jun.
- WAI, R. J., DUAN, R. Y., WANG, W. H., et al., 2003, “Implementation of Artificial Intelligent Control in Single-Link Flexible Robot Arm”. In: *Proceedings IEEE*

International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, v. 3, pp. 1270-1275, Jul.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., *Motores Elétricos - Linhas de Produto, Características, Especificações, Instalações, Manutenções*, Catálogo, Dez, 2005, Brasil.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., *Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência PWM*, Guia Técnico, Mar, 2010, Brasil.

WEISS, H., XIAO, J., 2003, "Fuzzy System Control for Combined Wind and Solar Power Distributed Generation Unit". In: *IEEE International Conference on Industrial Technology*, v. 2, pp. 1160-1165, Dez.

WONG, CHING-CHANG & HER, SHYANG-MING, 1999, "A self-generatig method for fuzzy system design". *Fuzzy Sets and Systems*, Editora Elsevier.

YAGER, R. & FILEV, D., 1994, *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, Jonh Wiley and Sons. Inc.

YATIM, A. H. B. M., UTOMO, W. M., 2005, "Neuro-Fuzzy On-Line Optimal Energy Control for Variable Speed Compressor Motor Drive System". In: *International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, v. 1, pp. 776-780, Jan.

XAVIER FILHO, A. F., 2008, *Controlador Fuzzy Aplicado a um Sistema de Controle de Posição*. Dissertação de M.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

ZADEH, L. A., 1973, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetcs*, v. 3, pp. 28-44.

ZHANG, L., LI, H., CHUNLIANG E., *et al.*, 2008, "Pitch Control of Large Scale Wind Turbine Based on Fuzzy-PD Method". In: *Third International Conference on*

Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 2447-2452, Nanjing, China, Abr.

APÊNDICE A

PROGRAMAS EM LABVIEW

A.1 INTRODUÇÃO

Neste apêndice estão apresentados os programas para o controle da mesa de coordenadas X-Y em LabVIEW®.

A Figura A.1 mostra a implementação do programa de controle de posição para a aplicação de sinais de referência degraus.

A Figura A.2 mostra a implementação do programa de acompanhamento de trajetória para sinais de referência senoidais, cosenoidias e da composição desses dois sinais.

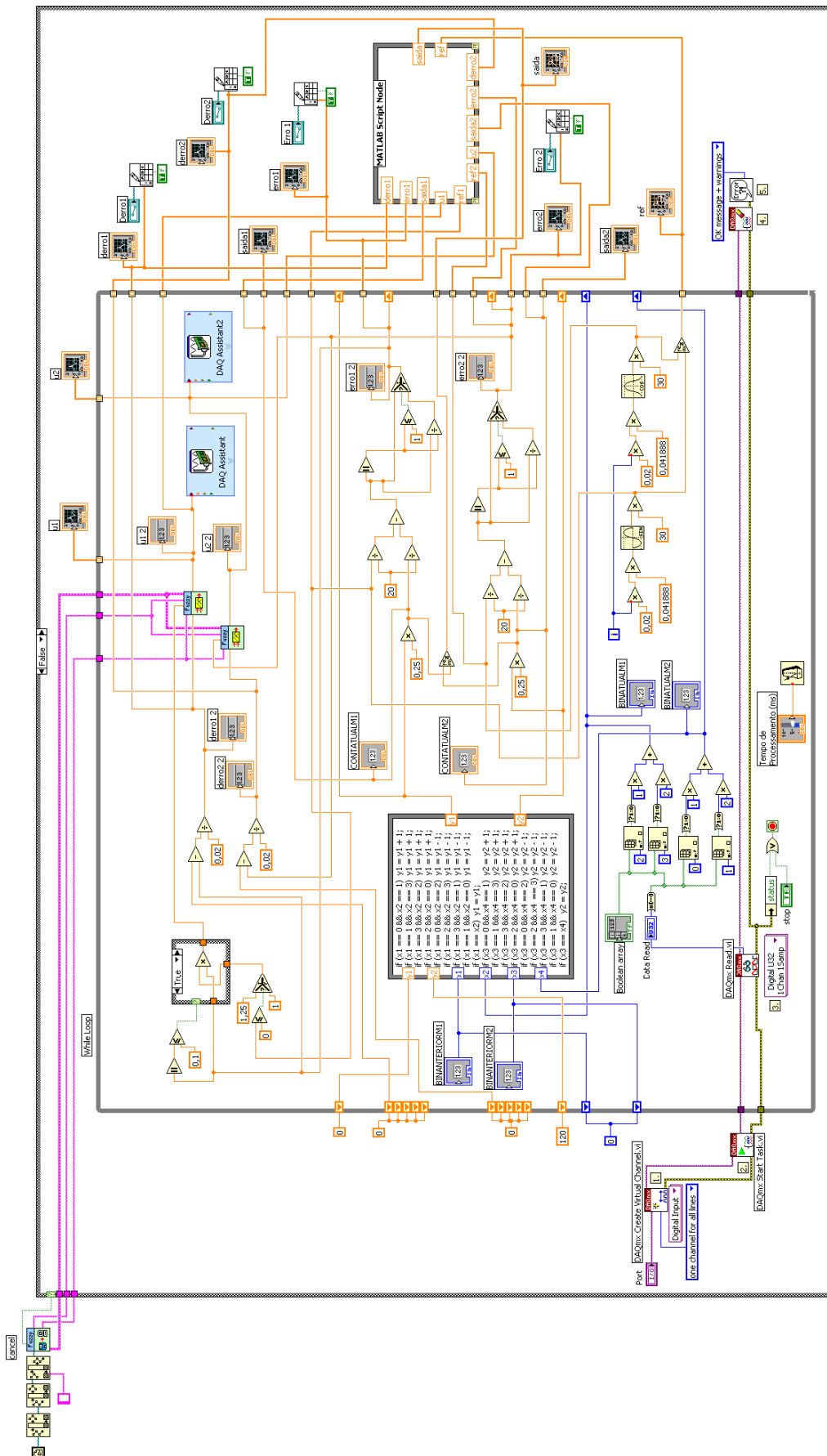


Figura A.2 – Programa de acompanhamento de trajetória.

APÊNDICE B

CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO

B.1 INTRODUÇÃO

Este apêndice mostra os circuitos de condicionamento do sistema e apresenta um breve comentário sobre eles. A seção B.2 contém o circuito de condicionamento de saída pertencente ao subsistema de medição de posição. Na seção B.3, encontra-se o circuito de condicionamento de entrada presente no subsistema de acionamento.

B.2 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SAÍDA

O circuito Shmitt Trigger é utilizado no condicionamento do sinal de saída desse projeto, por ser um restaurador de sinais digitais. Ele é um comparador que possui internamente uma realimentação positiva, que resulta em uma histerese, ou seja, em um “efeito memória”.

No seu princípio de funcionamento, quando o nível de tensão de entrada é maior que um limiar escolhido, a saída está em nível alto; quando a entrada está abaixo de outro limiar, a saída está em nível baixo; quando a entrada se encontra entre os dois limiares, a saída continua com o valor anterior até a entrada se alterar suficientemente para mudar o estado do trigger, caracterizando a histerese. Esse efeito da histerese estabiliza a saída contra uma comutação rápida devido a um ruído. A Figura B.1 mostra o exemplo de um comparador Schmitt Trigger com um determinado formato de onda na entrada e como seria a forma de onda na saída.

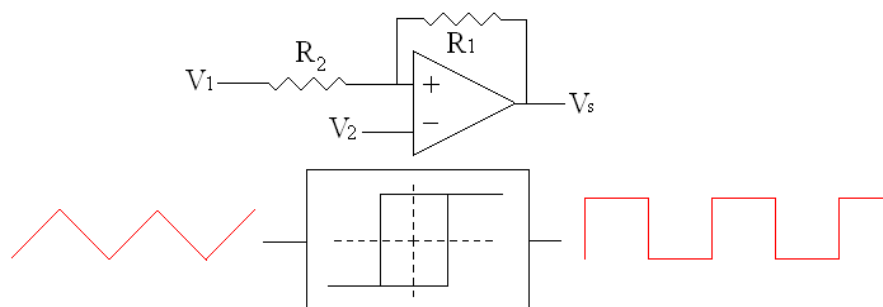


Figura B.1 - Princípio básico do Schmitt Trigger.

A Figura B.2 apresenta a interligação do circuito de condicionamento de saída, Schmitt Trigger, com o do acoplador óptico, utilizados nesse trabalho.

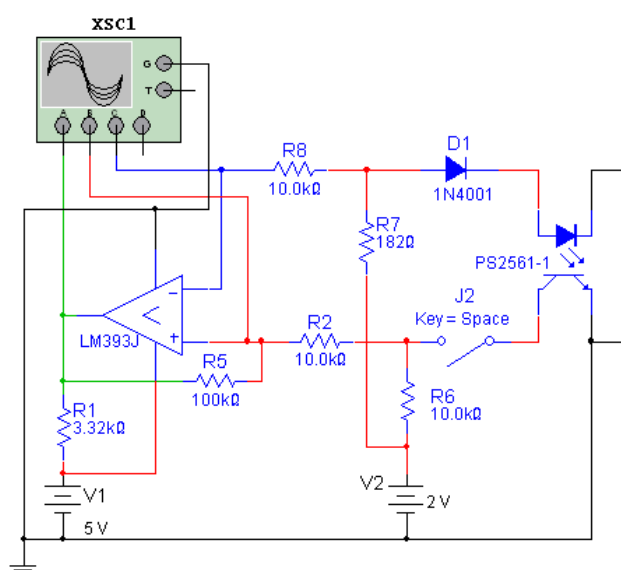


Figura B.2 – Circuitos de condicionamento de saída e do acoplador óptico.

B.3 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE ENTRADA

O circuito de condicionamento de entrada implementado foi utilizado para condicionar o sinal de controle, proveniente da placa, às especificações de tensão do inversor de frequência.

Conforme mostra a Figura B.3, esse circuito eletrônico consiste em 3 etapas: um circuito somador inversor e amplificador, um circuito retificador de precisão de onda completa e um circuito comparador. Na primeira etapa o sinal de controle variável de 0 V a 5 V é enviado ao somador inversor, do qual se obtém uma forma de onda com

picos de 2,5 V e -2,5 V, que em seguida é amplificado com um ganho de 4, resultando em um sinal com tensão máxima de 10 V e mínima de -10 V. No segundo circuito, é realizada uma retificação de onda completa, obtendo-se um sinal retificado com tensões variando de 0 V a 10 V. O terceiro circuito trata-se de um comparador de tensão, através do qual o sinal é comutado, chaveado, em 0 V ou 10 V.

Por meio da informação fornecida na Saída 1, retificada, variável de 0 V a 10 V, o inversor de frequência é alimentado e determina a velocidade de funcionamento do motor de indução. Enquanto que pelo chaveamento do sinal, na Saída 2, o inversor informa ao motor qual deve ser o sentido de rotação do seu eixo, 10 V implica em uma revolução anti-horária horária e 0 V em um giro no sentido horário.

Para uma maior precisão desse circuito de condicionamento, utilizaram-se 3 amplificadores operacionais com função de buffers e em 2 amplificadores foram realizados ajustes de offset, conforme se pode observar na Figura B.3.

APÊNDICE C

LÓGICA FUZZY

C.1 INTRODUÇÃO

Neste apêndice, apresenta-se um embasamento teórico sobre a lógica fuzzy. Na seção C.2, são abordadas as diferenças em entre a lógica convencional, booleana, e a lógica fuzzy; além de serem mostradas as formas das principais funções de pertinência fuzzy. A configuração básica de um controlador fuzzy é apresentada na seção C.3.

C.2 FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

Informações vagas, ambíguas, qualitativamente incompletas, imprecisas e expressões verbais são características humanas, que, a princípio, não são compreendidas pelos computadores, pois esses últimos processam os dados de forma exata, bivalente: 0 ou 1.

A teoria de conjuntos fuzzy é capaz de inferir conclusões e gerar respostas baseadas nessas informações ambíguas e qualitativamente mal-definidas, traduzindo os graus de verdade das afirmações de uma maneira que os computadores possam processá-las. Essa teoria retrata a noção clássica de conjuntos tradicionais.

Na lógica tradicional, booleana, um determinado elemento apresenta apenas duas possibilidades, pertencer ou não pertencer a um conjunto, isto é, pode possuir somente dois valores 0 ou 1, ou, simplesmente falso ou verdadeiro. Em contrapartida, a lógica fuzzy permite uma representação parcial de um elemento, um grau de possibilidade, que poderá ser um valor no intervalo de números reais $[0,1]$.

Uma noção básica da teoria de conjuntos é a pertinência de um elemento a um determinado conjunto. Assim, sendo x um elemento pertencente a um conjunto A , representa-se por $x \in A$. Uma forma de se indicar essa pertinência é expressa através da função de pertinência $\mu_A(x)$ (NOGUCHI, 2004).

Na lógica booleana, $\mu_A(x)$ é uma função bivalente, cujo valor indica se o elemento x pertence ou não ao conjunto A .

$$\mu_A(x) = 1 \text{ se e somente se } x \in A$$

$$\mu_A(x) = 0 \text{ se e somente se } x \notin A$$

No caso da lógica fuzzy, $\mu_A(x)$ associa para cada elemento x , pertencente a A , um número real $\mu_A(x)$ no intervalo $[0,1]$, indicando o grau de pertinência do elemento x ao conjunto A (SHAW e SIMÕES, 1999). Quanto mais o valor de $\mu_A(x)$ se aproximar de 1, maior será o grau de pertinência do elemento ao conjunto A (NOGUCHI, 2004).

$$0 < \mu_A(x) \leq 1 \text{ se e somente se } x \in A$$

$$\mu_A(x) = 0 \text{ se e somente se } x \notin A$$

A Figura C.1 apresenta como exemplo os conjuntos de idade de uma pessoa, conforme o conceito de conjuntos booleano e fuzzy, respectivamente. Observa-se, na abordagem booleana, que as transições entre os conjuntos *jovem* e *adulto*, e entre os conjuntos *adulto* e *idoso*, são bruscas. Uma pessoa ao completar 25 anos e um dia de vida não pertencerá mais à categoria de *jovem*, pois se torna integrante da categoria de *adulto*. Já na abordagem fuzzy, as transições são graduais. O indivíduo a partir dos 18 anos deixa de ser 100% *jovem* e começa a pertencer parcialmente aos conjuntos *jovem* e *adulto*, com seus respectivos graus de pertinência (BEZERRA, 2009). Essa representação de grau de pertinência compatibiliza a teoria fuzzy com a lógica de pensamento humano.

De maneira geral, um conjunto fuzzy A , definido no universo de discurso U , é representado por:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in U \}$$

onde $\mu_A(x)$ é a função de pertinência de x em A e é definida como o mapeamento de U no intervalo fechado $[0,1]$:

$$\mu_A(x) : U \rightarrow [0,1]$$

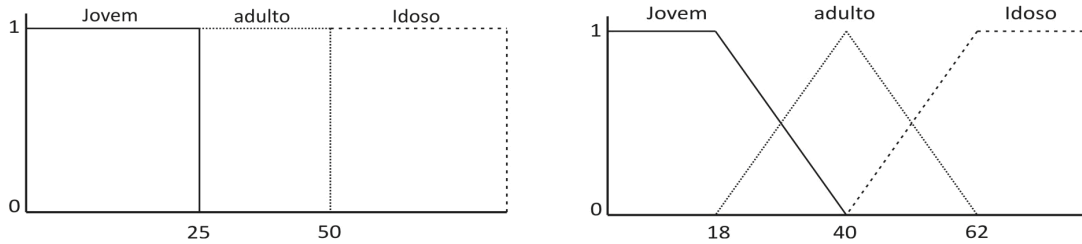


Figura C.1 - Conjuntos idade: (a) abordagem booleana e (b) abordagem fuzzy.

O universo de discurso U de uma variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que ela pode assumir.

Uma variável fuzzy u no universo de discurso U é definida em um conjunto de termos, nomes ou rótulos, $T(u)$, com cada valor definido em U . Por exemplo, a *velocidade* de um sistema pode ser uma variável fuzzy assumindo valores *baixa*, *média*, *rápida* (SHAW e SIMÕES, 2004). Nesse caso, pode-se dizer que a variável fuzzy *velocidade* é uma variável lingüística. Considerando que u é a *velocidade* de um sistema, então seu conjunto de termos $T(u)$ poderia ser:

$$T(velocidade) = \{baixa, média, rápida\}$$

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Os valores assumidos pela variável lingüística são representados por conjuntos fuzzy definidos por funções de pertinência (BEZERRA, 2009).

Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribuem valores de pertinência fuzzy para valores discretos de uma variável. De acordo com o conceito que se deseja representar, as funções de pertinência podem assumir diversos formatos. As principais formas delas são: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoidal, fuzzy-tom. Segundo SHAW e SIMÕES (2004) as funções mais utilizadas são as triangulares e trapezoidais, por serem de mais fácil implementação. A Figura C.2 apresenta um exemplo de funções de pertinência para uma variável chamada *erro*.

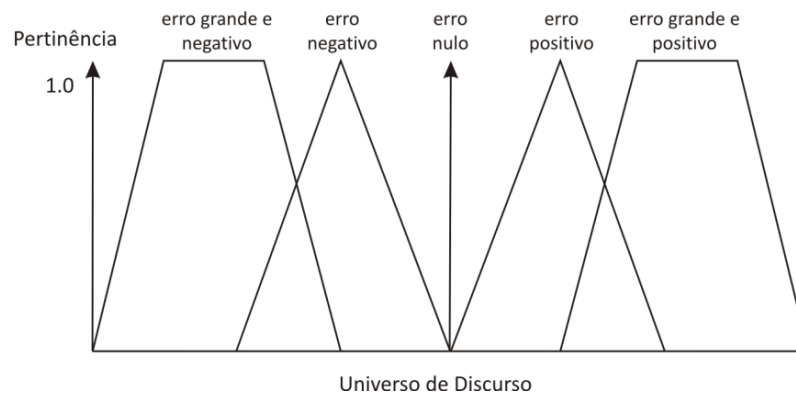


Figura C.2 - Funções de pertinência.

Para um conjunto fuzzy $A = \text{<baixo>}$, por exemplo, com universo de discurso $U = [0,10]$, alguns valores de uma função de pertinência poderiam ser:

$$\mu_A(0) = \mu_A(0,1) = 1 \text{ (pertinência total)}$$

$$\mu_A(0,5) = 0,9$$

$$\mu_A(4) = 0,1$$

$$\mu_A(7) = \mu_A(10) = 0 \text{ (não pertinência)}$$

C.3 SISTEMAS DE CONTROLE FUZZY

As técnicas de controle convencionais se aplicam a uma grande variedade de servomecanismos onde o processo é bem definido. Entretanto, essas técnicas não são capazes de resolver problemas reais, cuja modelagem matemática é impraticável (BORDON, 2004). Isso ocorre devido à complexidade em definir as expressões matemáticas (equações diferenciais, equações à diferença, funções de transferência), ou seja, as relações entre as variáveis da planta são desconhecidas ou inexatas.

Os controladores fuzzy são bastante eficientes em casos de difícil modelamento, tempo morto elevado e/ou zona morta alta. Eles não necessitam da modelagem matemática do processo; pois modelam o conhecimento do especialista, do usuário do sistema, utilizando para isso mecanismos de inferência baseados em regras de controle.

As regras de controle são estabelecidas a partir de um conjunto de condições **SE ENTÃO (IF THEN)**, que é uma estratégia de ação elaborada de acordo com o

desempenho do processo, e são constituídas por uma base de conhecimento. Através de uma base de conhecimento consistente é possível determinar uma relação precisa entre variáveis de entrada e ações de controle.

Um controlador fuzzy é basicamente composto dos seguintes blocos funcionais, representados na Figura C.3:

- Fuzzificação
- Inferência fuzzy
- Defuzzificação

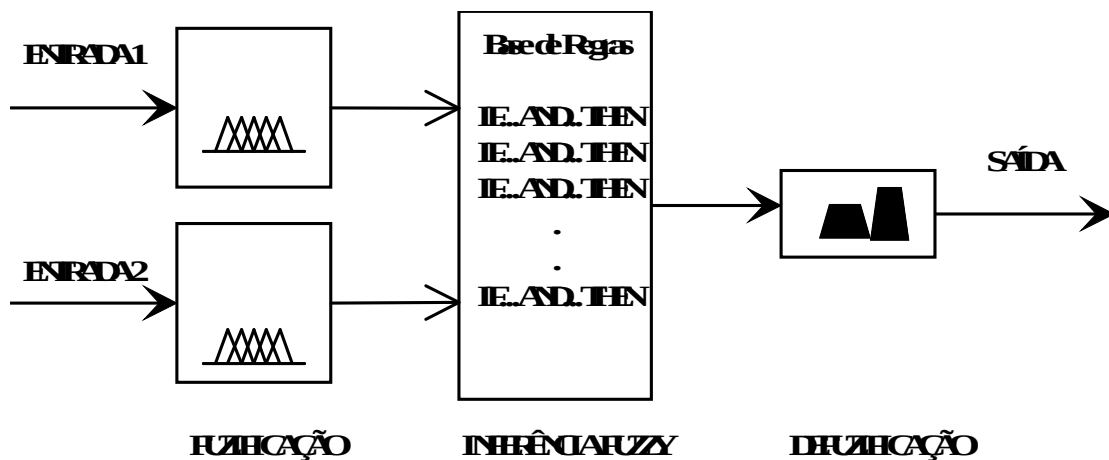


Figura C.3 – Esquema de um controlador fuzzy.

C.3.1. Fuzzificação

A fuzzificação é a conversão das variáveis de entrada, do domínio de números reais para o domínio fuzzy. É a atribuição de valores lingüísticos, graus de pertinência entre 0 e 1, aos sinais de entrada. A correspondência, entre os dados de entrada e os seus termos lingüísticos correspondentes, é a parte mais crítica da construção de um modelo fuzzy, devido à necessidade de escolher, adequadamente, o tipo de função de pertinência para cada conjunto fuzzy.

C.3.2. Inferência Fuzzy

As operações com os conjuntos fuzzy ocorrem na etapa de inferência. É

realizado o mapeamento de conjuntos fuzzy em conjuntos fuzzy e determinado como as regras de controle, condicionais **SE ENTÃO**, serão ativadas e combinadas (XAVIER, 2008).

Existem dois modelos de sistema de inferência fuzzy: Mamdani (MAMDANI e ASSILAN, 1974) e Takagi-Sugeno (TAKAGI e SUGENO, 1985), que diferem fundamentalmente em suas habilidades para representar diferentes tipos de informação.

O modelo Mamdani é constituído por métodos lingüísticos, ou seja, a base das regras é estritamente lingüística e baseia-se na utilização da linguagem natural para descrever o comportamento dos sistemas. Esse tipo de inferência apresenta como característica básica o fato de tanto os antecedentes como os conseqüentes serem mapeados por conjuntos lingüísticos. Para cada regra de controle, caso haja mais de uma variável de entrada, é necessário aplicar uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, a fim de que seja gerado um conjunto conseqüente. No caso de existirem “n” regras, serão gerados “n” conjuntos conseqüentes, que se combinarão.

Para uma variável de entrada no controlador fuzzy baseados em regras, os conjuntos fuzzy relacionam-se do seguinte modo:

SE <antecedente> **ENTÃO** <conseqüente>

SE erro = <pequeno> **ENTÃO** posição = <avance pouco>

A técnica mais comum na composição dos vários conjuntos fuzzy de entrada para cada regra é o método de inferência MAX-MIN. O “MIN” implica em um conectivo “E” e o “MAX” em um conectivo “OU”. O conectivo “E”, chamado de operação de agregação, resulta na interseção fuzzy dos termos de entrada. O conectivo “OU”, chamado de operação de composição, resulta na união dos termos de saída (BEZERRA, 2009). Assim, cada sentença **SE E ENTÃO** é modelada pela aplicação “MIN” e as relações entre as regras são modeladas pela aplicação “MAX” (MENDONÇA, 2008).

A Figura C.4 apresenta um exemplo de cálculo do valor discreto (crisp) da saída, pela defuzzificação por centro de gravidade, de um controlador fuzzy com cinco regras (MAX-MIN).

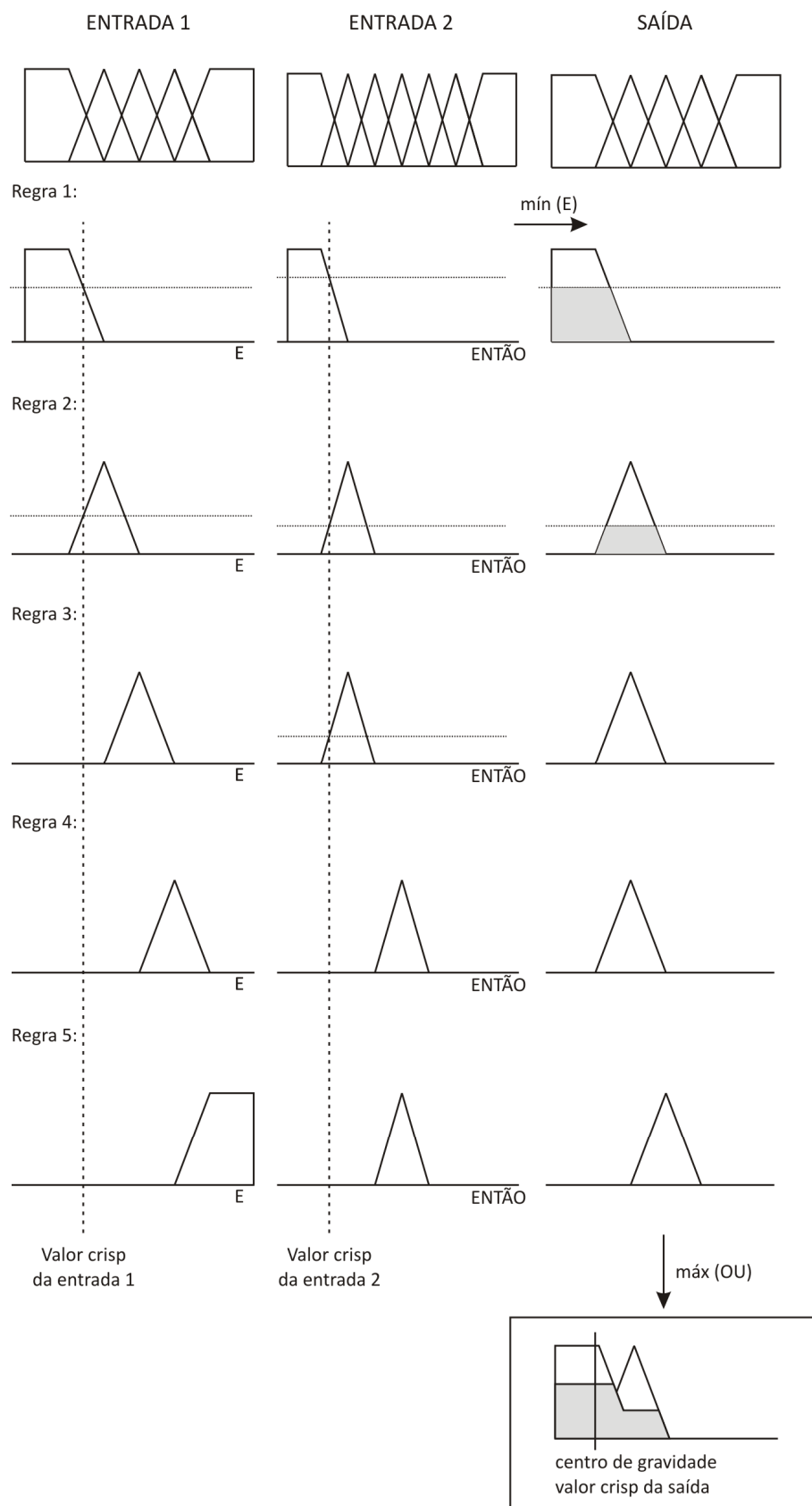


Figura C.4 - Exemplo de cálculo da saída discreta de um controlador fuzzy.

C.3.3. Defuzzificação

Na defuzzificação, o valor da variável lingüística de saída, inferida pelas regras fuzzy, será traduzido em um valor discreto. O objetivo é obter um único valor discreto que melhor represente os valores fuzzy inferidos da variável de saída. Assim, a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio fuzzy para o domínio discreto.

Para selecionar o método apropriado de defuzzificação, pode-se utilizar um enfoque baseado no centróide ou nos valores máximos que ocorrem na função de pertinência resultante. Os principais métodos são: Centro-da-Área (C-o-A), Centro-do-Máximo (C-o-M) e Média-do-Máximo (M-o-M).

O método Centro-da-Área, frequentemente chamado de Centro-de-Gravidade, calcula a saída discreta “x”, indicada na Figura C.5, pelo cálculo do centróide da área composta pelo termo de saída fuzzy. O centróide é um ponto que divide, em duas partes iguais, a área do termo de saída fuzzy. Esse termo de saída é formado pela união de todas as contribuições de regras.

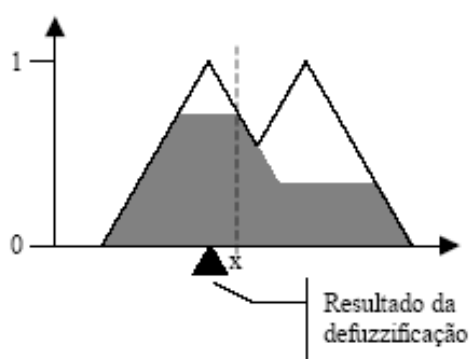


Figura C.5 – Defuzzificação pelo Centro-da-Área.

No método do Centro-do-Máximo, os picos das funções de pertinência representados no universo de discurso da variável de saída são utilizados na defuzzificação. Diferentemente do método do C-o-A, no C-o-M as áreas das funções de pertinência são ignoradas e apenas os máximos são usados. O C-o-M é conhecido também por defuzzificação pelas alturas.

Os valores não-nulos das funções de pertinência de saída são posicionados nos picos correspondentes (setas cinzas), representando pesos. Assim, a saída discreta

“x”, na Figura C.6, é o ponto de apoio no qual os pesos ficam equilibrados. Esse valor defuzzificado é calculado como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência fuzzy (SHAW e SIMÕES, 2004).

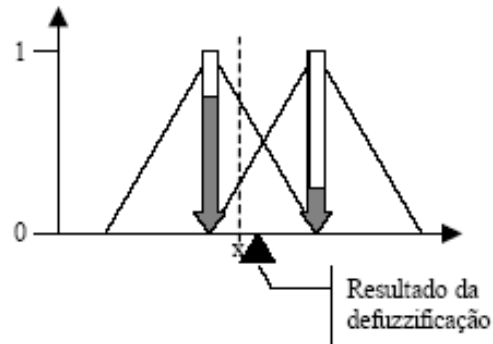


Figura C.6 – Defuzzificação pelo Centro-do-Máximo.

Na defuzzificação pela Média-do-Máximo, a saída é obtida calculando-se a média entre dois elementos, no universo de discurso, que correspondem aos maiores valores da função de pertinência da saída (XAVIER, 2008). Esse método não se aplica em funções que tenham mais de um máximo (NÓBREGA, 2008). A Figura C.7 mostra a saída discreta “x”, como resultado da defuzzificação pela M-o-M.

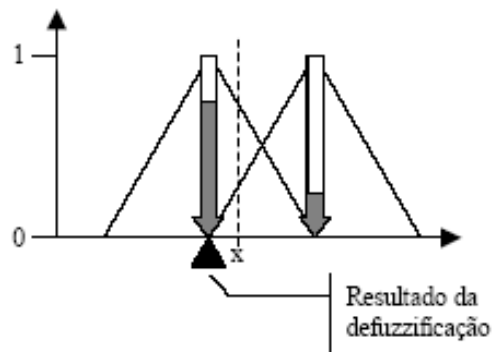


Figura C.7 – Defuzzificação pelo Média-do-Máximo.

APÊNDICE D

BASE DE REGRAS DOS CONTROLADORES FUZZY

D.1 INTRODUÇÃO

Neste apêndice, na seção D.2, consta a base de regras para o controle do sistema.

D.2 BASE DE REGRAS

A Tab. (D.1) apresenta as regras de controle que constituem a inferência fuzzy dos controladores da mesa de coordenadas.

Tabela D.1 - Base de regras dos controladores fuzzy do sistema.

Nº Regra	Regra
01	SE Erro é “NG” E Derro é “NG” ENTÃO Saída é “NG”
02	SE Erro é “NG” E Derro é “NP” ENTÃO Saída é “NG”
03	SE Erro é “NG” E Derro é “QZ” ENTÃO Saída é “NG”
04	SE Erro é “NG” E Derro é “PP” ENTÃO Saída é “NG”
05	SE Erro é “NG” E Derro é “PG” ENTÃO Saída é “NG”
06	SE Erro é “NM” E Derro é “NG” ENTÃO Saída é “NG”
07	SE Erro é “NM” E Derro é “NP” ENTÃO Saída é “NG”
08	SE Erro é “NM” E Derro é “QZ” ENTÃO Saída é “NM”
09	SE Erro é “NM” E Derro é “PP” ENTÃO Saída é “NM”
10	SE Erro é “NM” E Derro é “PG” ENTÃO Saída é “NG”
11	SE Erro é “NP” E Derro é “NG” ENTÃO Saída é “NG”
12	SE Erro é “NP” E Derro é “NP” ENTÃO Saída é “NM”
13	SE Erro é “NP” E Derro é “QZ” ENTÃO Saída é “NP”
14	SE Erro é “NP” E Derro é “PP” ENTÃO Saída é “QZ”

15	SE Erro é “NP” E Derro é “PG” ENTÃO Saída é “NG”
16	SE Erro é “QZ” E Derro é “NG” ENTÃO Saída é “NM”
17	SE Erro é “QZ” E Derro é “NP” ENTÃO Saída é “NP”
18	SE Erro é “QZ” E Derro é “QZ” ENTÃO Saída é “QZ”
19	SE Erro é “QZ” E Derro é “PP” ENTÃO Saída é “PP”
20	SE Erro é “QZ” E Derro é “PG” ENTÃO Saída é “PM”
21	SE Erro é “PP” E Derro é “NG” ENTÃO Saída é “PG”
22	SE Erro é “PP” E Derro é “NP” ENTÃO Saída é “QZ”
23	SE Erro é “PP” E Derro é “QZ” ENTÃO Saída é “PP”
24	SE Erro é “PP” E Derro é “PP” ENTÃO Saída é “PM”
25	SE Erro é “PP” E Derro é “PG” ENTÃO Saída é “PG”
26	SE Erro é “PM” E Derro é “NG” ENTÃO Saída é “PG”
27	SE Erro é “PM” E Derro é “NP” ENTÃO Saída é “PM”
28	SE Erro é “PM” E Derro é “QZ” ENTÃO Saída é “PM”
29	SE Erro é “PM” E Derro é “PP” ENTÃO Saída é “PG”
30	SE Erro é “PM” E Derro é “PG” ENTÃO Saída é “PG”
31	SE Erro é “PG” E Derro é “NG” ENTÃO Saída é “PG”
32	SE Erro é “PG” E Derro é “NP” ENTÃO Saída é “PG”
33	SE Erro é “PG” E Derro é “QZ” ENTÃO Saída é “PG”
34	SE Erro é “PG” E Derro é “PP” ENTÃO Saída é “PG”
35	SE Erro é “PG” E Derro é “PG” ENTÃO Saída é “PG”