



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**

**JOSÉ LEONARDO NUNES DA SILVA**

**PROJETO E REALIZAÇÃO DE CONTROLE FUZZY PARA MANIPULADOR  
INDUSTRIAL TIPO SCARA E SUA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO À LUZ DA  
NORMA ISO 9283**

**FORTALEZA**

**2016**

JOSÉ LEONARDO NUNES DA SILVA

PROJETO E REALIZAÇÃO DE CONTROLE FUZZY PARA MANIPULADOR  
INDUSTRIAL TIPO SCARA E SUA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO À LUZ DA  
NORMA ISO 9283

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas.

Prof. Dr. George André Pereira Thé

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S58p Silva, José Leonardo Nunes da.  
Projeto e realização de controle fuzzy para manipulador industrial tipo SCARA e sua avaliação de desempenho à luz da norma ISO 9283 / José Leonardo Nunes da Silva. – 2016.  
161 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. George André Pereira Thé.
1. Manipulador SCARA. 2. Controle fuzzy. 3. Acurácia. 4. Repetibilidade. 5. ISO 9283. I. Título.  
CDD 621.38
-

**JOSÉ LEONARDO NUNES DA SILVA**

**PROJETO E REALIZAÇÃO DE CONTROLE FUZZY PARA MANIPULADOR  
INDUSTRIAL TIPO SCARA E SUA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO À LUZ DA  
NORMA ISO 9283**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas.

Aprovada em: 08/07/2016.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. George André Pereira Thé (Orientador)

Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso

Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Arthur Plinio De Souza Braga

Universidade Federal do Ceará

Este trabalho é dedicado a toda minha família, e em especial ao meu filho Pedro, minha fonte de alegria e de esperança.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta o *retrofitting* e a avaliação de desempenho de um manipulador industrial tipo SCARA. Para atingir esse objetivo, foi desenvolvida a modelagem matemática do manipulador (Cinemática e Dinâmica) e um estudo teórico dos principais controladores utilizados nos atuais manipuladores industriais. A proposta de controlador deste trabalho é de um controlador de posição baseado em lógica *Fuzzy*. Diante disso, é apresentado um estudo teórico da lógica *Fuzzy* aplicada à robótica, ao projeto do controlador, desenvolvimento e análise de estabilidade do controlador *Fuzzy* de posição. Este controlador foi embarcado em um equipamento industrial tipo CLP e um sistema SCADA foi desenvolvido para permitir a operação e programação do manipulador. Por se tratar de um manipulador industrial, a avaliação de desempenho foi realizada à luz da norma ISO 9283 – “*Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Methods*” utilizada pelos fabricantes mundiais de manipuladores. Dentre os vários critérios da norma, foi adotada a acurácia de posição e a repetibilidade de posição. O controlador *Fuzzy* apresentou como resultado de sua avaliação de desempenho acurácia de posição 3,788 mm e repetibilidade de posição 8,805 mm, sendo superior ao controlador convencional PID que apresentou acurácia de posição 4,864 e repetibilidade de posição 13,232 mm. Com os valores de acurácia e repetibilidade encontrados, o manipulador SCARA, após o *retrofitting*, está apto a executar tarefas de manipulação de peças, paletização, fundição, colagem, montagens simples e soldagem a ponto.

**Palavras-chave:** Manipulador SCARA. Controle *Fuzzy*. Controle de Posição. Acurácia. Repetibilidade. ISO 9283.

## ABSTRACT

This paper presents the retrofitting and evaluation of performance of an industrial manipulator SCARA. To achieve this objective was developed the mathematical modeling of the manipulator (Kinematics and Dynamics) and a theoretical study of the major controllers used in current industrial manipulators. The proposal controller of this paper is a controller of position based on fuzzy logic. A theoretical study of logic Fuzzy applied in robotics, controller design, development and stability analysis of the Fuzzy controller position is displayed. This controller is embedded in an industrial equipment PLC and SCADA system was developed to allow the operation and programming of the manipulator. Because it is an industrial manipulator performance evaluation was carried out in the ISO 9283 standard - "Manipulating Industrial Robots - Performance Criteria and Related Methods" used by manufacturers worldwide manufactures. Among the various criteria of the standard was adopted the accuracy of position and repeatability of position. The fuzzy controller presented as a result of their performance evaluation accuracy of 3.788 mm and position repeatability of 8.805 mm position. It is superior to conventional PID controller that presented accurate position 4.864 mm and repeatability position 13.232 mm. With the values of accuracy and repeatability presented the SCARA manipulator after retrofitting is able to execute tasks like parts manipulating, palletizing, steel foundry, collage, simple assembly and spot welding.

**Keywords:** SCARA Manipulator. Control Fuzzy. Position Control. Accuracy. Repeatability. ISO 9283.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – O Robô Manipulador UNIMATE em 1962. ....	13
Figura 1.2 – Manipuladores Industriais. ....	14
Figura 1.3 – Principais aplicações dos robôs industriais na indústria mundial. ....	16
Figura 1.4 – Levantamento da IFR sobre o mercado mundial de robôs. ....	16
Figura 1.5 – Tipos de Trajetórias geradas para execução das tarefas industriais. ....	19
Figura 1.6 – Robô SCARA. ....	25
Figura 2.1 – Modelagem no CAD do elo 1. Vista lateral direita e vista em perspectiva isométrica do primeiro elo. ....	29
Figura 2.2 – Modelagem no CAD do elo 2. Vista lateral direita e vista em perspectiva isométrica do segundo elo. ....	29
Figura 2.3 – Propriedades Físicas do elo 1. ....	30
Figura 2.4 – Propriedades Físicas do elo 2. ....	30
Figura 2.5 – Transformações básicas da convenção D-H. ....	31
Figura 2.6 – Sistemas de coordenadas atrelados às juntas do manipulador. ....	32
Figura 2.7 – Tangente trigonométrica de uma diferença angular. ....	35
Figura 2.8 – Modelo de junta com acionamento indireto. ....	42
Figura 2.9 – Diagrama de blocos do modelo matemático da junta do manipulador com acionamento indireto. ....	43
Figura 2.10 – Diagrama de blocos do modelo matemático do manipulador com acionamento indireto sem distúrbio. ....	44
Figura 2.11 – Diagrama de Nyquist da equação 2.54 para frequências positivas.....	45
Figura 2.12 – Sistemas de transmissão das duas primeiras juntas do manipulador SCARA..	46
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do controle de torque calculado. ....	51
Figura 3.2 – Função de pertinência gaussiana. ....	56
Figura 3.3 – Função de pertinência trapezoidal. ....	56
Figura 3.4 – Função de pertinência triangular. ....	57
Figura 3.5 – Inferência Takagi-Sugeno. ....	59
Figura 3.6 – Controle Fuzzy direto. ....	63
Figura 3.7 – Controle Fuzzy paralelo. ....	64
Figura 3.8 – Controle refinado com lógico Fuzzy. ....	64
Figura 3.9 – Interface Fuzzy para controle Homem-Máquina. ....	64

Figura 3.10 – Sintonia de controladores usando lógica Fuzzy. ....	64
Figura 4.1 – Janela inicial para definição das entradas e saídas do controlador. ....	66
Figura 4.2 – Funções de pertinência Fuzzy da variável de entrada Erro. ....	67
Figura 4.3 – Constante da variável Fuzzy de saída TORQUE. ....	68
Figura 4.4 – Sistema de controle Fuzzy. ....	70
Figura 4.5 – Setor $[0, K)$ no plano $(m, e)$ . ....	71
Figura 4.6 – Resposta do controlador Fuzzy projetado neste trabalho. ....	72
Figura 4.7 – Interpretação gráfica do critério de Popov. ....	75
Figura 4.8 – Diagrama de Popov do modelo SISO da junta do manipulador SCARA com acionamento indireto. ....	76
Figura 4.9 – Estrutura do controlador PID do CLP Twido. ....	76
Figura 4.10 – Supervisório durante a sintonia dos controladores PID. ....	78
Figura 4.11 – Configuração do PID da junta 1 por meio de memórias internas do CLP escritas em tempo real. ....	78
Figura 5.1 – Sistema de acionamento e controle das juntas do manipulador SCARA.....	82
Figura 5.2 – Sistema de acionamento de cada junta (Inversor de frequência mais motor síncrono de ímã permanente). ....	83
Figura 5.3 – Torques de cada junta. ....	84
Figura 5.4 – Bancada desenvolvida para acionamento do manipulador. ....	87
Figura 5.5 – Ambiente de projeto do <i>Fuzzy Control++</i> da Siemens Automation. ....	88
Figura 5.6 – Ambiente de projeto do <i>Fuzzy Designer</i> da Rockwell Automation. ....	89
Figura 5.7 – Leitura da posição das juntas. ....	90
Figura 5.8 – Chamada dos controladores PID e seus parâmetros. ....	91
Figura 5.9 – Fim de curso na linguagem de programação Ladder. ....	91
Figura 5.10 – Tela principal do sistema SCADA desenvolvido. ....	92
Figura 5.11 – Suporte de fixação dos potenciômetros. ....	93
Figura 5.12 – Transdutor de posição (potenciômetro). ....	94
Figura 5.13 – Comportamento dos transdutores de posição das juntas. ....	94
Figura 5.14 – Escalas usadas para medição de ângulos das juntas. ....	96
Figura 6.1 – Representação da acurácia e da repetibilidade do posicionamento do efetuador. ....	98
Figura 6.2 – Sistemas de coordenadas e punho do manipulador. ....	100
Figura 6.3 – Ciclos definidos para avaliação de desempenho. ....	102
Figura 6.4 – Relatórios de ensaios. ....	105

Figura 6.5 – Acurácia e Repetibilidade de Posicionamento. ....	106
Figura 6.6 – Cubo de ensaio recomendado pela norma. ....	109
Figura 6.7 – Retângulo de ensaio adotado no plano XY. ....	109
Figura 6.8 – Planos de ensaio. Plano 3 adotado neste trabalho. ....	110
Figura 6.9 – Trajetória linear do manipulador SCARA no espaço cartesiano. ....	111
Figura 6.10 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação eixo a eixo. ....	111
Figura 6.11 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação simultânea de eixos. ....	112
Figura 6.12 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação coordenada de eixos. ....	113
Figura 6.13 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação coordenada de eixos realizada neste trabalho (quadrante positivo). ....	114
Figura 6.14 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação coordenada de eixos realizada neste trabalho (quadrante negativo). ....	114
Figura 7.1 – Comunicação via OPC. ....	117
Figura 7.2 – Localização dos cubos de ensaio inseridos no volume de trabalho do manipulador. ....	121
Figura 7.3 – Acurácia de posição dos controladores no quadrante positivo. ....	124
Figura 7.4 – Acurácia de posição dos controladores no quadrante negativo. ....	125
Figura 7.5 – Repetibilidade de posição dos controladores no volume de trabalho do manipulador. ....	125
Figura 7.6 – Erro de posição dos controladores no eixo X do quadrante positivo. ....	126
Figura 7.7 – Erro de posição dos controladores no eixo Y do quadrante positivo. ....	126
Figura 7.8 – Erro de posição dos controladores no eixo X do quadrante negativo. ....	127
Figura 7.9 – Erro de posição dos controladores no eixo Y do quadrante negativo. ....	127

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Adaptada do relatório da IFR sobre o mercado de robôs industriais e a previsão para 2018. ....	18
Quadro 2.1 – Parâmetros D-H do manipulador SCARA. ....	32
Quadro 2.2 – Dados do ensaio para medição da relação de transmissão das juntas. ....	45
Quadro 4.1 – Fórmulas de Ziegler-Nichols. ....	79
Quadro 4.2 – Ganhos dos controladores PID para o quadrante positivo. ....	79
Quadro 4.3 – Ganhos dos controladores PID para o quadrante negativo. ....	79
Quadro 7.1 – Pontos de passagem ensaio do quadrante positivo. Coordenadas no espaço cartesiano medidas em metros. ....	116
Quadro 7.2 – Pontos de passagem ensaio do quadrante negativo. Coordenadas no espaço cartesiano medidas em metros. ....	116
Quadro 7.3 – Pontos de passagem ensaio do quadrante positivo. Coordenadas no espaço das juntas medidas em graus. ....	117
Quadro 7.4 – Pontos de passagem ensaio do quadrante negativo. Coordenadas no espaço das juntas medidas em graus. ....	117
Quadro 7.5 – Pontos de passagem ensaio do quadrante positivo. Coordenadas convertidas para o valor digital. ....	118
Quadro 7.6 – Pontos de passagem ensaio do quadrante negativo. Coordenadas convertidas para o valor digital. ....	118
Quadro 7.7 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante positivo do controlador Fuzzy. ....	119
Quadro 7.8 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante negativo do controlador Fuzzy. ....	119
Quadro 7.9 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante positivo do controlador PID. ....	122
Quadro 7.10 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante negativo do controlador PID. ....	122

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	122
<b>1.1 Robótica de Manipuladores</b> .....	122
<b>1.2 Sistemas de Controle Baseados em Lógica Fuzzy</b> .....	18
<b>1.3 Objetivos do trabalho</b> .....	22
<b>1.4 Organização do Trabalho</b> .....	23
<b>2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MANIPULADOR SCARA</b> .....	28
<b>2.1 Introdução</b> .....	28
<b>2.2 Modelagem no sistema CAD do Manipulador</b> .....	28
<b>2.3 Cinemática Direta</b> .....	30
<b>2.4 Cinemática inversa</b> .....	34
<b>2.5 Dinâmica de Manipuladores</b> .....	36
<b>2.6 Modelagem das Juntas para o Sistema de Controle</b> .....	41
<b>3 CONTROLE DE MANIPULADORES ROBÓTICOS E LÓGICA FUZZY</b> .....	47
<b>3.1 Introdução</b> .....	47
<b>3.2 Controle Convencional de Manipuladores</b> .....	48
<b>3.2.1 Controle PID de Manipuladores Robóticos</b> .....	49
<b>3.2.2 Controle Torque Calculado de Manipuladores Robóticos</b> .....	51
<b>3.3 Conceitos de Lógica Fuzzy</b> .....	52
<b>3.4 Controladores baseados em Lógica Fuzzy</b> .....	54
<b>3.5 Inferência Mamdani e Inferência Takagi-Sugeno</b> .....	58
<b>3.6 Aplicações de Controladores baseados em lógica Fuzzy</b> .....	61
<b>4. PROJETO CONTROLADOR FUZZY</b> .....	65
<b>4.1 Projeto de Controlador Fuzzy</b> .....	65
<b>4.2 Estabilidade dos controladores baseados em lógica Fuzzy</b> .....	69
<b>4.3 Sintonia do Controlador PID do CLP Twido</b> .....	76
<b>4.4 Controle PID versus Controle Fuzzy</b> .....	79
<b>5 SISTEMA DE SUPERVISÃO E ACIONAMENTO DO MANIPULADOR SCARA</b> ..	81
<b>5.1 Introdução</b> .....	81
<b>5.2 Sistema de Acionamento das Juntas</b> .....	81
<b>5.3 Controlador Lógico Programável (CLP)</b> .....	85
<b>5.4 Programação do Controlador Lógico Programável (CLP)</b> .....	89

5.5 Sistema de aquisição de dados.....	91
<b>6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MANIPULADORES ROBÓTICOS.....</b>	<b>97</b>
6.1 Introdução.....	97
6.2 Avaliação de Desempenho de Manipuladores Robóticos.....	97
6.3 Normas de Avaliação ISO 9283.....	99
6.4 Características de Posição.....	104
6.4.1 Acurácia de posição ( $AP_p$ ).....	105
6.4.2 Repetibilidade de posição ( $RP_r$ ).....	107
6.5 Condições para os Ensaios.....	1088
<b>7 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MANIPULADOR SCARA.....</b>	<b>115</b>
7.1 Introdução.....	115
7.2 Resultados dos Ensaios de Posição com Controlador Fuzzy.....	116
7.3 Cálculo da Acurácia e da Repetibilidade de Posição com Controlador Fuzzy.....	118
7.4 Relatório de Ensaio de Posição Controlador Fuzzy.....	120
7.5 Resultados dos Ensaios de Posição com Controlador PID.....	121
7.6 Cálculo da Acurácia e da Repetibilidade de Posição com Controlador PID.....	122
7.7 Relatório de Ensaio de Posição Controlador PID.....	123
7.8 Comparação das avaliações de desempenho (Fuzzy x PID).....	124
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>128</b>
8.1 Contribuições do trabalho.....	128
8.1.1 Contribuições Científicas.....	128
8.1.2 Contribuições Tecnológicas.....	129
8.1.3 Contribuições Pedagógicas.....	130
8.2 Sugestões de trabalhos futuros.....	130
8.3 Conclusão do trabalho.....	131
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÃO DO CRITÉRIO DE POPOV.....</b>	<b>142</b>
<b>APÊNDICE B - BANCADA DE ACIONAMENTO E CONTROLE DO MANIPULADOR SCARA.....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICE C – CIRCUITOS ELÉTRICOS DE CONTROLE.....</b>	<b>147</b>
<b>APÊNDICE D – ENSAIO DE POSIÇÃO CONTROLADOR FUZZY.....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE E – ENSAIO DE POSIÇÃO CONTROLADOR PID.....</b>	<b>154</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Robótica de Manipuladores

Robótica é uma área complexa que envolve muitas disciplinas, como física, ciências dos materiais, eletrônica, controle, processamento de sinais, programação e manufatura. O estudo da robótica é dividido principalmente em duas frentes: a robótica móvel e a robótica fixa. A robótica móvel é a área da robótica que trabalha com mecanismos que podem se locomover pelo seu ambiente, não estando restritos a uma base fixa. A principal categoria de robôs móveis são os robôs terrestres, que se movimentam no solo utilizando dispositivos como rodas, esteiras e pernas. Dentre esses últimos, têm-se especialmente os robôs humanoides que tentam replicar a anatomia humana. Entretanto, existem também outras categorias como robôs aéreos (*unmanned aerial vehicles* - UAVs) e os robôs subaquáticos (*unmanned underwater vehicles* – UAVs). Diante disso, para a solução de problemas é comum à fusão entre essas áreas (FILIPESCU, 2012; AGUIRRE, 2007).

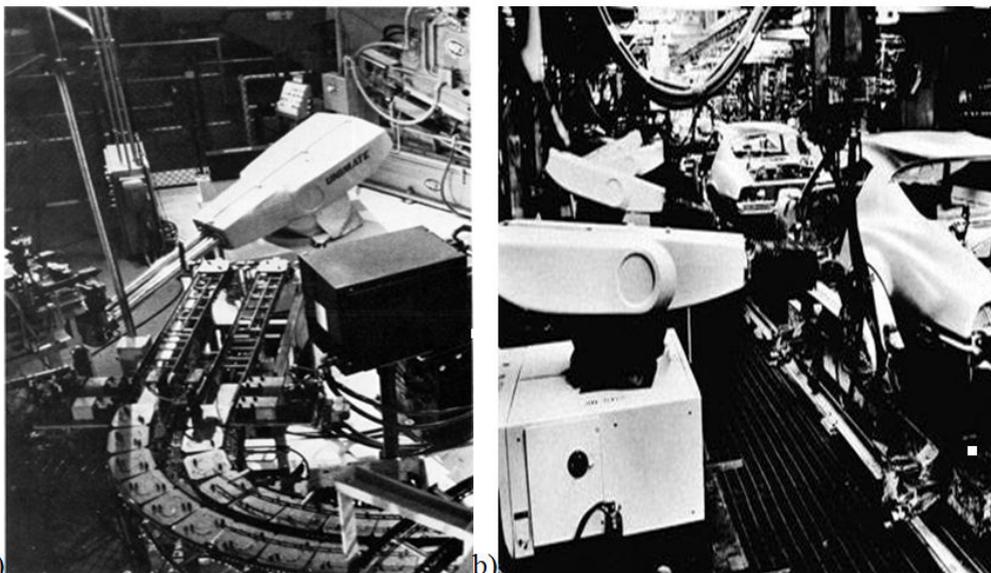
A robótica fixa trata dos braços robóticos ou robôs manipuladores que geralmente se encontram instalados em uma célula de produção industrial, e formam uma classe de robôs muito comum e familiar. Isso se deve ao fato de que as pessoas veem fotos e vídeos dos robôs manipuladores trabalhando nas fábricas fazendo tarefas como montagens, soldagem, tarefas manuais, fabricando desde automóveis até medicamentos, ou até mesmo em salas de cirurgias auxiliando os médicos. A robótica de manipuladores de todas as áreas da robótica é a mais pesquisada no mundo e a que apresenta resultados mais concretos para a humanidade, contando com mais de um milhão de unidades instaladas em todo o mundo (NIKU, 2014).

A robótica fixa ou robótica de manipuladores define que os robôs industriais são agentes físicos que executam tarefas manipulando efetadores no mundo real (MATARIC, 2014). Para isso, eles são equipados com efetadores (*end effector*) como ferramentas e garras. Os efetadores têm um propósito bem definido: exercer forças e torque sobre o ambiente e assim desenvolver suas tarefas. Os robôs manipuladores são equipados com sensores, que lhes permitem perceber as variáveis internas, como posição e torque das juntas, e variáveis externas como presença de obstáculo e temperatura do ambiente. Os manipuladores estão fisicamente ancorados (fixos) a seu local de trabalho, por exemplo, uma linha de montagem industrial ou na estação espacial internacional. É possível também a instalação de manipuladores em trilhos ou suspensos para aumentar o volume de trabalho. O

movimento do manipulador em geral envolve uma cadeia cinemática de articulações controláveis, permitindo que os efetadores alcancem a posição e a orientação desejada dentro do seu volume de trabalho. Os Manipuladores robóticos consistem normalmente em vários elos conectados por juntas e um efetador.

Os primeiros robôs manipuladores começaram a atuar há mais de 60 anos, em 1952, a primeira máquina CNC (Computer Numerical Control) foi construída no MIT (Massachusetts Institute of Technology), o CNC desenvolve o controle dos movimentos das máquinas por meio de algoritmos numéricos que empregam a cinética e a dinâmica das máquinas. Foi desenvolvido por causa da alta precisão exigida por certos equipamentos, como aeronaves e máquinas-ferramentas. Os CNCs são considerados os primeiros robôs porque eram máquinas programáveis e com um controlador dedicado, porém ainda não eram multifuncionais. Atualmente as máquinas CNCs são usadas para tarefas específicas como usinagem e injeção plástica (SILVA, 2002). Foi em 1961 que a patente americana U.S. 2.988.237 foi emitida a George Devol para “Transferência Programada de Artigos”, uma base para os robôs Unimate, os primeiros robôs programáveis e multifuncionais. Um ano depois a Unimation, primeira fabricante de manipuladores industriais, foi fundada nos Estados Unidos e os primeiros robôs industriais comerciais apareceram. A GM (General Motors) foi a primeira grande empresa a instalar um robô manipulador da Unimation na sua linha de produção, inicialmente apenas para controle de qualidade de peças manufaturadas e em seguida para montagem de carroceria (Figura 1.1).

Figura 1.1 - O Robô Manipulador UNIMATE em 1962. a) Realizando Controle de qualidade das peças dos automóveis. b) Montagem da carroçaria dos automóveis.

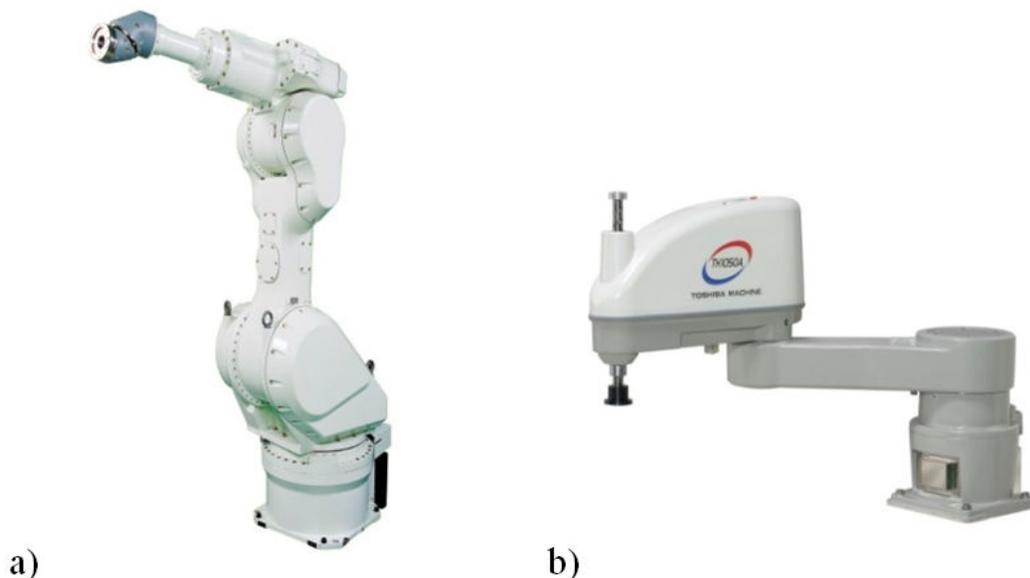


Fonte: (BARRIENTOS, 2007).

Em 1967, a Unimation lançou o robô Mark II. O primeiro robô a ser importado pelo Japão para aplicações de pintura por pulverização. A partir desse ano surgiram grandes fabricantes de manipuladores industriais no Japão e na Europa, isso porque a instalação dessas máquinas para aumento da produtividade, qualidade dos produtos e redução de custos da produção são fatores determinantes para existência das grandes indústrias de produtos manufaturados. Muitos produtos essenciais à vida humana hoje são montados, manufaturados ou apenas manipulados por robôs industriais em todo o mundo.

Desde a década de 1960, muitos tipos de robôs manipuladores foram criados para atender às necessidades dos processos produtivos industriais (Figura 1.2). Em 1978, a empresa Unimation desenvolveu o manipulador PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly). O PUMA foi um dos maiores sucessos comerciais de todos os tempos e ainda é usado em indústrias e laboratórios de pesquisa. Este manipulador foi a base do manipulador articulado vertical com 6 DOF (Degrees of Freedom), também conhecido como manipulador antropomórfico. Em 1979 o robô SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) foi criado pela empresa Sankyo do Japão e a IBM, o qual se trata de um robô articulado horizontal e cobre um grande volume de trabalho, por isso é ideal para tarefas de montagem de circuitos eletrônicos e peças de pequenas dimensões. Nessa perspectiva, este trabalho aborda um manipulador desta estrutura tipo SCARA.

Figura 1.2 – Manipuladores Industriais. a) Manipulador Antropomórfico com 6 DOF. b) Robô SCARA com 4 DOF.



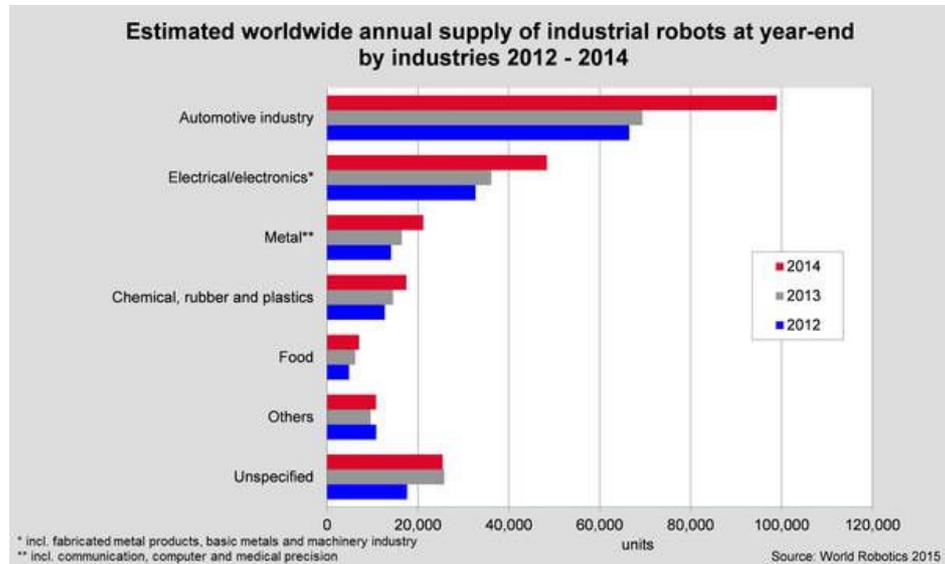
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na indústria automobilística, a robotização (automação do processo produtivo com robôs) é maior nas linhas de pintura e soldagem a ponto, em que a presença maciça de robôs praticamente dispensa a atuação humana. Soldagem a ponto (Spot Welding) é a soldagem de peças sobrepostas de metal em pequenos pontos pela aplicação de pressão e corrente elétrica por eletrodos posicionados em pontos especificados. Consiste na principal operação no processo de fabricação de um automóvel. E como os manipuladores são mais eficientes que os humanos nessa tarefa, as novas fábricas, segundo montadoras que finalizaram investimentos recentes, ainda conseguem reduzir em até 40% o custo com insumos como energia e água a cada automóvel que sai da linha de montagem. Somam-se a isso ganhos de ergonomia – dado o menor esforço braçal dos operários –, maior controle da produção e flexibilidade para interferências nas linhas de produção. As seções de soldagem e pintura das grandes montadoras americanas há muito são dominadas por robôs manipuladores, que realizam tarefas monótonas, perigosas ou de alta precisão, como a própria soldagem a ponto e trabalhos pesados de manipulação de cargas. Em Barrientos (2007) é mostrado, por meio de dados da Asociación Española de Robótica (AER), que 60% dos manipuladores robóticos fabricados estão na indústria automobilística e 55% estão realizando tarefas de soldagem nos mais variados segmentos. A Figura 1.3 extraída do relatório anual da IFR (*Internacional Federation of Robotics*) de 2015 mostra as principais aplicações dos manipuladores atualmente na indústria mundial.

Além disso, o mercado mundial de manipuladores tem uma expansão contínua com picos em períodos de grande crescimento econômico. Entre janeiro e março de 2005, mais de 5.300 robôs foram encomendados pelas empresas de fabricação norte-americanas, com um valor de US\$ 302 milhões. Em 2014, a China tornou-se o maior mercado mundial de robôs industriais, em termos de robôs comprados, superando o Japão pela primeira vez, de acordo com dados da IFR (IFR, 2016). No ano de 2014, foi atingido um recorde no número de vendas de manipuladores conforme mostrado na Figura 1.4 do relatório da IFR. Outros mercados asiáticos como Taiwan, Índia e Indonésia também estão crescendo muito, mas as vendas continuam pequenas em comparação ao Japão, Coreia do Sul, Estados Unidos e Alemanha, que juntos respondem por aproximadamente um terço das vendas mundiais. A IFR também estima que cerca de 95 mil robôs de serviços para uso profissional – como defesa e agricultura – poderão ser vendidos entre 2013 e 2016. A indústria automobilística, que foi pioneira na década de 1960, continua sendo o principal condutor da robotização no mundo.

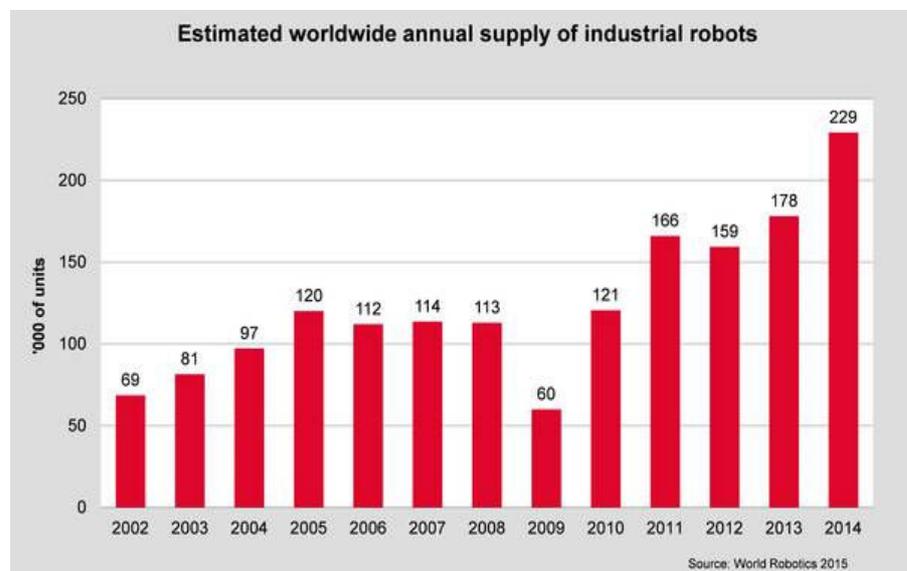
Segundo a IFR, o setor respondeu por 70 mil das vendas totais de mais de 178 mil robôs em 2013.

Figura 1.3 – Principais aplicações dos robôs industriais na indústria mundial.



Fonte: IFR, 2016.

Figura 1.4 – Levantamento da IFR sobre o mercado mundial de robôs.



Fonte: IFR, 2016.

No Brasil a indústria automobilista teve grandes investimentos nos últimos anos, por exemplo, na unidade da Hyundai em Piracicaba (SP) onde é montado o HB20, a automação chega a 100% no setor de soldagem a ponto, ocupado por robôs fabricados pela própria empresa coreana. Em outros setores da fábrica, as peças e os próprios veículos são

transportados em robôs manipuladores híbridos (manipuladores embarcados em robôs móveis) que seguem uma trilha magnética no chão da fábrica. Outro exemplo é a montadora Jeep no estado de Pernambuco que conta com 700 robôs manipuladores, sendo 650 na soldagem a ponto, 40 na pintura e dez na montagem. As montadoras nacionais também possuem um número relevante de manipuladores instalados em Camaçari na Bahia (Ford) e na região do ABC em São Paulo (Volkswagen, Fiat, Chevrolet). Apesar de pequena a participação do Brasil no mercado mundial, os dados da IFR e as previsões são animadores. O quadro 1.1 mostra o número de manipuladores robóticos comercializados em todo o mundo nos últimos anos e a previsão para o ano de 2018. Pelos números mostrados, o Brasil é atualmente o principal mercado da América Latina e, pelas previsões da IFR, até 2018 continuará crescendo.

A realidade do mercado mundial é que pequenas e médias indústrias não têm acesso à robótica industrial devido aos altos custos de aquisição dos manipuladores e suas ferramentas. E uma tendência do mercado é que grandes indústrias, principalmente montadoras, troquem manipuladores antigos com mais de vinte anos de uso por novos. Esses manipuladores antigos geralmente apresentam a mecânica em bom estado e não têm ocorrido grandes mudanças na mecânica nas últimas décadas. O problema dessas máquinas é a eletrônica embarcada e a arquitetura de controle antiga e muitas vezes sem funcionar; porém, podem ser atualizadas para a tecnologia atual. Esse processo é denominado *retrofitting* e é uma tendência no mercado de máquinas-ferramenta e manipuladores robóticos (MORAES, 2007; ROMANO, 2002)

De uma forma simples o *retrofitting* de uma máquina apresenta as seguintes etapas:

- Revisão Mecânica: nesta etapa é verificado o desgaste de peças móveis e fixas além do sistema de lubrificação, arrefecimento e propriedades estruturais. Para os manipuladores o principal ponto é a folga nos acoplamentos.
- Atualização Elétrica: geralmente consiste em substituição dos atuadores e de seus sistemas de acionamento. Neste trabalho foi realizada a instalação de um novo sistema de acionamento.
- Substituição do Sistema de Controle: Nesta etapa, a eletrônica é totalmente substituída. Primeiro a instrumentação formada pelos sensores e condicionadores de sinais. Em seguida, o controlador selecionado dentre as

tecnologias disponíveis e programado para a nova tarefa. Neste trabalho, foram instalados transdutores de posição das juntas, acionamento eletrônico para os atuadores das juntas e um controlador industrial programável. Este último programado com um algoritmo de controle baseado em lógica Fuzzy. Outro ponto importante é que o sistema de controle passa a ser de *Arquitetura Aberta*, ou seja, o usuário do manipulador poderá alterar os parâmetros do controlador ou, até mesmo, embarcar outro algoritmo de controle.

Quadro 1.1 – Adaptada do relatório da IFR sobre o mercado de robôs industriais e a previsão para 2018.

<b>País</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2018</b>
<b>América</b>	<b>30317</b>	<b>32616</b>	<b>36200</b>	<b>48000</b>
Brasil	1398	1266	1000	3000
América do Norte (Canadá, México, USA)	28668	31029	35000	44000
Demais países da América	251	321	200	1000
<b>Ásia/Austrália</b>	<b>98807</b>	<b>139344</b>	<b>169000</b>	<b>275000</b>
China	36560	57096	75000	150000
Índia	1917	2126	2600	6000
Japão	25110	29297	33000	40000
Coreia	21307	24721	29000	40000
Taiwan	5457	6912	8500	12000
Tailândia	3221	3657	4200	7500
Demais países da Ásia/Austrália	5235	15535	16700	19500
<b>Europa</b>	<b>43284</b>	<b>45559</b>	<b>49500</b>	<b>66000</b>
República Tcheca	1337	1533	1900	3500
França	2161	2944	3200	3700
Alemanha	18297	20051	21000	25000
Itália	4701	6215	6600	8000
Espanha	2764	2312	2700	3200
Reino Unido	2486	2094	2400	3500
Demais países da Europa	11538	10410	11700	19100
<b>África</b>	<b>733</b>	<b>428</b>	<b>650</b>	<b>1000</b>
Países não especificados	4991	11314	8650	10000
<b>Total</b>	<b>178132</b>	<b>229261</b>	<b>264000</b>	<b>400000</b>

Fonte: IFR, 2016.

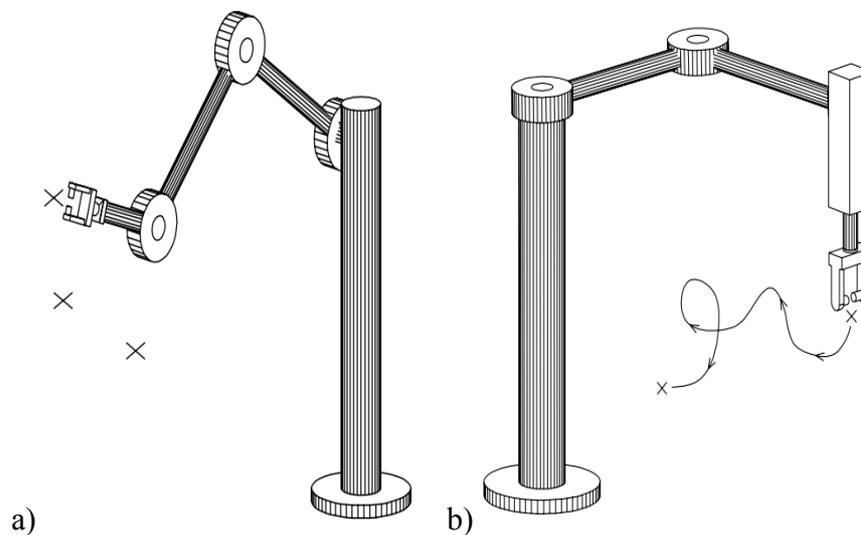
## 1.2 Sistemas de Controle Baseados em Lógica Fuzzy

Robôs industriais vêm sendo largamente empregados, devido à sua capacidade de se adaptarem a situações diversas, serem programáveis e possibilidade de colaboração com humanos. Contudo, para assegurar que a presença do robô seja verdadeiramente satisfatória,

faz-se necessária uma boa estratégia de controle. Essa estratégia deve garantir o desempenho desejado para execução da tarefa e a segurança no ambiente de trabalho. O controle de robôs manipuladores compreende as etapas de geração de trajetória, em que a posição da ferramenta é especificada para cada instante de tempo e o controle do seguimento de trajetórias, na qual uma malha de controle fechada garante que a tarefa seja realizada.

É importante observar que essas trajetórias, dependendo da tarefa a ser executada, podem ser definidas por meio de pontos de passagem obrigatória da ferramenta (Figura 1.5a) ou definidas por funções contínuas no espaço (Figura 1.5b). O primeiro caso é denominado controle de posição para trajetória ponto a ponto, em que a interpolação entre os pontos de passagem é realizada no espaço das juntas. A segunda estratégia denominada controle de trajetória contínua consiste na interpolação entre os pontos no espaço cartesiano, geralmente consiste de linhas e arco (SICILIANO, 2009). O controle de posição é ideal para tarefas como soldagem a ponto e montagem, o controle de trajetória é ideal para tarefas como acabamento de superfície e soldagem a arco elétrico (processo de soldagem no qual a união de dois metais ocorre com a deposição linear e contínua de um metal de adição na fusão).

Figura 1.5 - Tipos de Trajetórias geradas para execução das tarefas indústrias. a) Trajetória ponto a ponto b)Trajetória contínua.



Fonte: SICILIANO, 2009.

O controle do seguimento da trajetória (ponto a ponto ou contínua) está relacionado com o projeto de controladores, que fornecem sinais de comando para fazer o efetuator final seguir a trajetória desejada. A partir da segunda metade do século XX, com o crescente avanço da automação industrial, tem sido cada vez maior a atenção dispensada ao

controle automático de seguimento de trajetórias. Durante esse período, várias técnicas de controle têm sido desenvolvidas, como controle robusto, controle ótimo, controle adaptativo, controle não linear, controle inteligente, entre outros.

Como alternativa ao controle convencional e com o objetivo de desenvolver robôs inteligentes, nos tempos atuais, utilizam-se técnicas de controle baseada em inteligência artificial. A inteligência Artificial (IA) é definida, neste trabalho, como uma ampla área de pesquisa que se subdivide em diversas subáreas, cada uma delas adotando diferentes abordagens e tratando variados problemas que, em geral, são de alta complexidade e para os quais ainda não há soluções convencionais satisfatórias. A IA atualmente consiste de três grandes abordagens (AGUIRRE, 2007): sistemas especialistas baseados em conhecimento, controle por lógica Fuzzy e computação bioinspirada. Sendo esta última muito vasta incluindo Redes Neurais Artificiais (RNA), computação evolutiva, inteligência coletiva e algoritmos genéticos (AG). Os avanços tecnológicos em sensores, atuadores, poder computacional, inteligência e visão artificial estão tornando os robôs mais sensíveis, flexíveis, precisos e autônomos. Isso significa que os robôs manipuladores poderão ser empregados em outras áreas além da produção industrial, como cuidados com a saúde de idosos, laboratórios, logística, agricultura e, até mesmo, no setor de serviços.

Os controladores baseados em inteligência artificial apresentam um desempenho superior aos controladores convencionais nas condições da simulação para sistemas não lineares e multivariáveis (LOPES, 2014). Portanto, essa é uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle que são desenvolvidos via modelagem matemática das plantas, derivando os parâmetros a serem controlados em função do estado do processo (SHHEIBIA, 2001). Nos últimos anos, o potencial de manuseio de incertezas e de controle de sistema complexos e/ou não lineares tem-se tornado possível pela Lógica Fuzzy, e estão sendo combinados com RNA, que, por sua vez, possuem características de adaptação e aprendizagem.

O controle baseado em Lógica Fuzzy incorpora a maneira de pensar do homem em um sistema de controle (SHAW, 2007). Por meio da tecnologia Fuzzy, pode-se capturar a experiência de operadores humanos, que controlam processos e plantas industriais, e projetar controladores computadorizados com desempenho idêntico ou melhor que o humano. 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 linguísticos, ou seja, descrições verbais. Além disso, os controladores Fuzzy tratam

igualmente sistemas lineares e não lineares, e são capazes de controlar sistemas multivariáveis complexos, executando estratégias de tomadas de decisão nos mais variados tipos de plantas.

Uma das áreas com maior número de aplicações da lógica Fuzzy é a de controle e automação de processos. Um controlador Fuzzy é um sistema de controle baseado em regras que interpolam suavemente o comportamento desejado para o sistema. Todas essas regras são avaliadas e a saída do controlador é obtida interpolando-se as ações recomendadas por cada regra. A vantagem do controle Fuzzy é que ele pode reduzir consideravelmente o tempo de desenvolvimento de um controlador não linear para um sistema complexo. Isso é decorrente do fato de que esse controlador é, na realidade, uma função não linear entre as entradas e as saídas do sistema, que reflete os conhecimentos que os operadores e projetistas possuem do processo. Dessa forma, essa tecnologia pode tirar vantagem dos conhecimentos já existentes de como se deve controlar e automatizar o processo. Outras vantagens do controle Fuzzy decorrem do fato de ser uma tecnologia fácil de ser implementada em tempo real, de ser comprovadamente robusta em aplicações práticas e de ser capaz de controlar processos complexos (SHAW, 2007).

Esses sistemas Fuzzy para controle de processos nasceram da observação de que o operador humano é capaz de controlar sistemas complexos, de uma maneira satisfatória e respeitando objetivos muitas vezes contraditórios, com apenas uma imagem mental do processo. Essa linguagem é um modelo qualitativo, experimental e adaptativo do sistema que ele cria, de forma a gerar as ações de controle adequadas a uma situação particular de operação. Portanto, a teoria denominada lógica Fuzzy permitiu representar estes conhecimentos sobre operação dos processos, que são muitas vezes complexos, evolutivos, incertos e contraditórios de uma maneira sistemática e lógica em um sistema de controle. O controle Fuzzy tenta reproduzir o operador humano se baseando em uma representação descritiva e experimental do processo. Dessa forma, ele tenta produzir as ações de controle desejadas baseando-se em modelos da operação do sistema, ao invés de utilizar modelos do próprio processo como em outras técnicas clássicas de controle.

Não é necessário conjunto de dados históricos ou modelos matemáticos como outros controladores considerados inteligentes, por exemplo, RNA e AG. Em Nunes (2007) é apresentado o controle no espaço das juntas de um manipulador planar 3 DOF com controle no espaço das juntas usando uma técnica de AG para gerar trajetórias e resolver a cinemática inversa. Em Passold (2003) é apresentado um controle de posição e de força para um manipulador tipo SCARA, utilizando RNA. E apesar do nome Fuzzy (difuso, nebuloso), esta

teoria se apoia em um conjunto de axiomas e regras precisas e rigorosas, que permitem um encadeamento ou um raciocínio lógico de proposições. O adjetivo Fuzzy decorre da aptidão dessa teoria a exprimir e a representar noções do cotidiano que são, muitas vezes, incertas e subjetivas (NASCIMENTO, 2000).

Nessa perspectiva, a proposta deste trabalho é preencher duas lacunas encontradas na revisão bibliográfica mostrada acima. A primeira consiste no desenvolvimento de um controlador baseado em Lógica Fuzzy para o controle de posição de um manipulador robótico industrial e a segunda lacuna é embarcar este controlador inteligente em um hardware comercial acessível à indústria. O hardware com essa característica é o Controlador Lógico Programável (CLP do inglês *Programmable Logic Controller* PLC).

### 1.3 Objetivos do trabalho

Neste trabalho é apresentada a modelagem matemática e o projeto de um controlador inteligente para um robô manipulador tipo SCARA. O manipulador usado neste trabalho passou por um processo de atualização tecnológica (*retrofitting*), ou seja, passou por uma atualização da eletrônica embarcada e do sistema de controle, porém sua estrutura mecânica e seus motores elétricos foram mantidos. A parte eletrônica de controle e a parte de potência para acionamento das juntas foram projetadas e instaladas com equipamentos comerciais e acessíveis no mercado local. Portanto a partir de peças recondicionadas foi projetada uma nova célula de manufatura robotizada com controlador baseado em Lógica Fuzzy. Foi necessário o desenvolvimento de um sistema supervisor para aquisição de dados, operação e programação das tarefas do manipulador.

Os objetivos deste trabalho são divididos em principais e secundários, são eles:

Objetivos principais:

- Desenvolver um novo controlador baseado em Lógica Fuzzy para o controle de posição do manipulador SCARA. A escolha pela Lógica Fuzzy tem três grandes razões: primeira, o baixo poder computacional do controlador industrial adotado; segunda, o bom desempenho desta técnica no controle de posição de máquinas e equipamentos; e terceira, base matemática desta técnica que permite projetar o controlador com especificações de desempenho e garantir sua estabilidade absoluta (Capítulo 3 e Capítulo 4);

- Realizar avaliação de desempenho para controle de posição. Nesta avaliação, analisar principalmente a acurácia e a repetibilidade do manipulador SCARA;
- Desenvolver e validar a modelagem matemática da cinemática e da dinâmica do manipulador;
- Projetar e executar o *retrofitting* de um manipulador tipo SCARA.

Objetivos secundários:

- Realizar revisão bibliográfica sobre controle Fuzzy;
- Desenvolver um sistema de acionamento dos motores das juntas;
- Desenvolver um sistema de aquisição de dados para registrar posições;
- Desenvolver um sistema de programação e operação para tarefas de manipulação;
- Desenvolver, em um controlador industrial tipo CLP, um algoritmo baseado em lógica Fuzzy para controle de posição;
- Elaborar relatório de ensaio da acurácia, repetibilidade e do desempenho dinâmico do manipulador SCARA;
- Analisar os parâmetros em todo o volume de trabalho do manipulador;
- Seguir a norma ISO 9283;
- Desenvolver uma solução completa de manipulador industrial para aplicação imediata na indústria.

## 1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos, com os seguintes conteúdos. No primeiro capítulo, é apresentada uma introdução da robótica, mais especificamente a robótica de manipuladores e a tecnologia denominada Sistemas de Controle baseados em Lógica Fuzzy. Isso se faz necessário porque este trabalho é uma aplicação da Lógica Fuzzy no controle de posição de robôs manipuladores. No Capítulo 1 também é apresentado um resumo da história desses robôs, um panorama do mercado, principais aplicações, bem como é mostrado como eles estão presentes em várias indústrias mudando as relações de trabalho, os produtos manufaturados e estrategicamente selecionados.

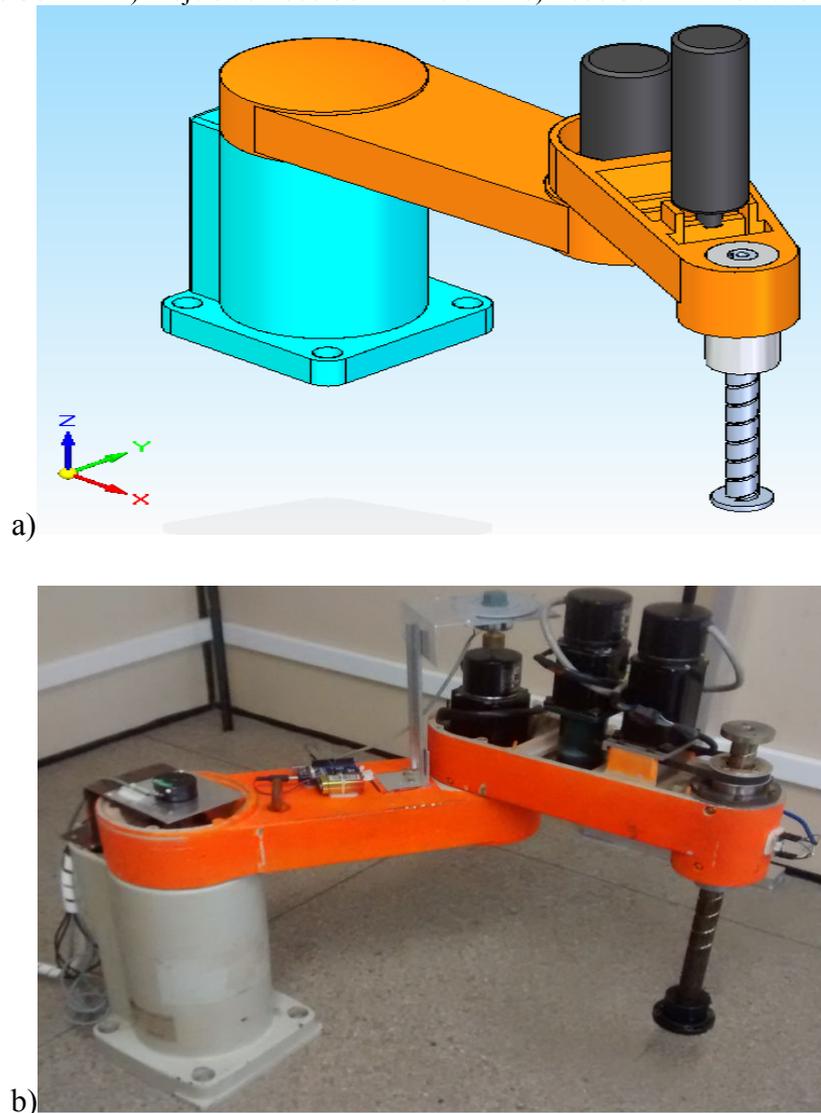
No Capítulo 2, é tratada a modelagem matemática do manipulador que inclui a cinemática direta, cinemática inversa e a dinâmica. Por ser um robô tipo SCARA 4 DOF, as

duas primeiras juntas são de rotação em torno de eixos verticais, os quais trabalham, portanto, num plano horizontal (plano XY), como se fosse um robô 2 DOF planar. A terceira junta é de translação, também chamada prismática permitindo deslocamentos no sentido vertical, ao longo do eixo  $z$ . E a quarta junta, de rotação, permite definir a orientação (ângulo  $\theta$ ) da ferramenta do manipulador em relação ao eixo  $Z$ . A modelagem, principalmente a dinâmica, é necessária para que possa ser selecionado um controlador e planejador de trajetória. A metodologia adotada neste capítulo foi um exame da geometria da estrutura do manipulador e sua construção em um sistema CAD (Figura 1.6a). Em seguida, serão pontuadas a aplicação do algoritmo de Denavit-Hartenberg para solução da cinemática direta e a solução geométrica da cinemática inversa. Por fim, a aplicação da mecânica de Lagrange para modelar a dinâmica do manipulador que é fundamental no momento de desenvolver o controlador Fuzzy e dimensionar o sistema de acionamento das juntas.

No Capítulo 3 são apresentados os dois tipos de controladores mais utilizados na robótica de manipuladores, denominados controladores convencionais, o controle PID independente por junta (*single input-single output*, SISO) e o controle de torque calculado (*multiple input-multiple output*, MIMO). Em seguida, uma breve introdução sobre Lógica Fuzzy, controladores baseados em lógica Fuzzy e as principais aplicações destes controladores para indústria. São comparados os dois tipos principais de controladores Mamdani e Takagi-Sugeno, assim como uma comparação entre o controle convencional PID e o controle baseado em lógica Fuzzy. Por fim, é apresentada a metodologia de desenvolvimento destes controladores.

No Capítulo 4, é desenvolvido o controlador Fuzzy que será embarcado no PLC e realizará o controle de posição do manipulador. O controlador Fuzzy desenvolvido e implementado neste trabalho é conhecido como “Controlador Sugeno de Ordem Zero” (FARROQ, 2011), sua estrutura é semelhante ao controlador Mamdani e a diferença está na etapa de defuzzificação. No Mamdani, geralmente a defuzzificação é realizada usando o centro de área de funções de pertinência, no controlador Sugeno de Ordem Zero a defuzzificação é realizada usando a média ponderada dos máximos das funções *singleton* (impulso). É mostrado no projeto do controlador que usando funções simétricas em relação à origem e com sobreposição de 50%, o sinal de controle gerado atende às especificações da tarefa (FARROQ, 2011; SHAW, 2007). O capítulo encerra com a análise de estabilidade deste controlador que atende ao critério de estabilidade de Popov para controladores não lineares.

Figura 1.6 – Robô SCARA. a) Projeto do Robô SCARA no CAD b) Robô SCARA Instalado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Capítulo 5 trata da célula de manufatura desenvolvida neste trabalho que consiste no sistema formado pelos sistemas de supervisão e de robótico. Este último passou pelo processo de *retrofitting*, que consiste na prática de reforma de equipamentos industriais obsoletos, a fim de aumentar sua vida útil por meio da incorporação de melhorias tecnológicas e atualmente está instalado no Laboratório CENTAURO da UFC (Figura 1.6b). Sua principal característica é ser de arquitetura aberta, ou seja, possibilita a programação e implementação de algoritmos de controle e não somente a programação de trajetórias e sequências de comandos como na maioria dos robôs industriais de arquitetura fechada. O sistema de supervisão desenvolvido para o controle e acionamento do manipulador consiste em um sistema SCADA (Controle Supervisório e Aquisição de Dados, do inglês *Supervisory Control*

*and Data Aquisition*), parametrização de inversores de frequência e programação de um CLP (controlador Lógico Programável, do inglês *Programmable Logic Controller*) com algoritmo de controle baseado em Lógica Fuzzy embarcado. A célula desenvolvida neste capítulo, além de poder ser replicada na indústria, é um equipamento pedagógico para o ensino da robótica em todos os níveis, alunos de cursos técnicos, graduação e pós-graduação porque é um sistema aberto e multifuncional.

No Capítulo 6, será tratada a avaliação de desempenho de um manipulador industrial, a qual tem como objetivo verificar a capacidade do robô desenvolver as funções para as quais foi construído. Após definir os parâmetros (acurácia, repetibilidade e desempenho) utilizados para quantificar a eficácia com que um robô executa uma tarefa, destaca-se a importância e a utilização da avaliação de desempenho. A ISO estabelece que a avaliação de desempenho deve ser realizada de acordo com a norma ISO 9283 – “*Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Methods*”. A acurácia, a repetibilidade e o desempenho dinâmico de um robô determinam se ele é adequado à execução de uma tarefa e são adotados neste trabalho. Ou seja, por meio destes parâmetros obtidos na avaliação de desempenho, pode-se verificar a adequação de um robô para a realização de uma tarefa industrial. Como citado, este trabalho trata do controle de posição, portanto apenas os ensaios relacionados à posição são abordados neste trabalho, a norma também trata dos ensaios para avaliação do controle de trajetória contínua.

No Capítulo 7, são apresentados os ensaios realizados e os seus resultados. Em função da aquisição de apenas dois inversores de frequência, serão acionadas apenas as duas primeiras juntas do manipulador e, por isso, foi realizado apenas os ensaios da acurácia e da repetibilidade de posição, ou seja, os ensaios concretizados segundo a norma ISO 9283 para avaliar a acurácia, a repetibilidade e o desempenho dinâmico do manipulador. Além disso, é apresentado o gerador de trajetória e sua integração com o sistema SCADA via OPC (*OLE for Process Control*). Os ensaios são realizados nas mesmas condições com um controlador convencional PID que teve seus ganhos sintonizados para o controle de posição do manipulador SCARA. Para efeito de comparação com o controlador Fuzzy projetado neste trabalho, o capítulo encerra com o relatório dos ensaios realizados.

No Capítulo 8, são apresentadas as contribuições científicas, tecnológicas e pedagógicas deste trabalho. Uma avaliação dos objetivos alcançados e propostas de trabalhos futuros. Além disso, é realizada uma avaliação dos relatórios dos ensaios. É mostrada a superioridade do controlador Fuzzy na tarefa de controle de posição em relação ao

controlador PID, quando adotado os parâmetros acurácia e repetibilidade de posição recomendados pela norma ISO 9283. Diante do que foi apresentado, o autor entende que deste trabalho outras pesquisas poderão ser realizadas como a geração de trajetórias livres de colisão e inteligência artificial para equipamentos industriais.

## 2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MANIPULADOR SCARA

### 2.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentada a modelagem do manipulador. Inicialmente é exposta a modelagem tridimensional usando um sistema CAD (*Computer Aided Design*). Em seguida é apresentada a modelagem da cinemática direta e inversa. Depois, a modelagem da dinâmica. O capítulo encerra com o cálculo da relação de transmissão de cada junta e a modelagem do sistema de controle independente por junta. Dessa forma, o manipulador pode então ser tratado como dois sistemas SISO (*Single Input- Single Output*) no espaço das juntas para realização do controle de posição.

A modelagem de robôs manipuladores é geralmente dividida em modelagem da cinemática e da dinâmica. A cinemática de um robô refere-se à relação entre o movimento das juntas e o movimento da ferramenta sem considerar as forças/torques que geraram esse movimento. A cinemática é necessária para resolver problemas de geração de trajetória, análise de trajetórias no espaço cartesiano e no espaço das juntas.

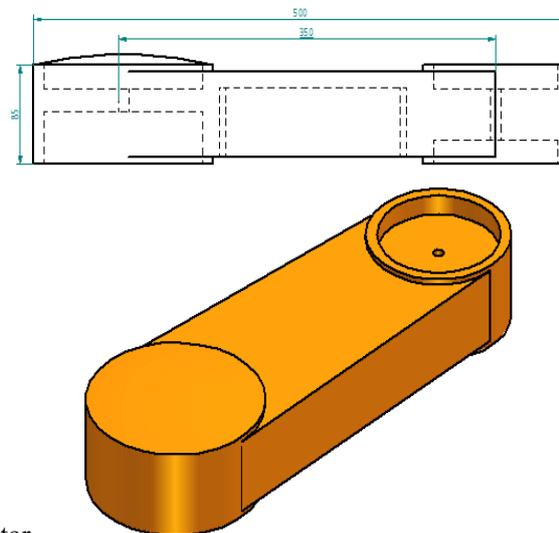
O modelo dinâmico descreve a relação entre as forças generalizadas (torques) atuando sobre o robô e o movimento da estrutura governado por acelerações, velocidades e posições das juntas. O modelo dinâmico é útil para projetos mecânicos de estruturas, escolha de atuadores, determinação de estratégias de controle, e simulação do movimento do manipulador.

### 2.2 Modelagem no sistema CAD do Manipulador

Antes de iniciar a modelagem matemática do manipulador é necessário analisar sua estrutura física. Para obter as propriedades físicas dos elos da cadeia aberta que formam o manipulador foi utilizado um software de tecnologia CAD (*Computer Aided Design*). Criando o manipulador em 3D (Figura 1.6a) no software foi possível obter as propriedades físicas de cada elo como a distância entre as origens dos sistemas de coordenadas das juntas, a massa de cada elo, o centro de massa de cada elo e o momento de inércia. Essas propriedades são difíceis de serem calculadas sem um modelo 3D devido a sua forma complexa e assimétrica. Esses dados são fundamentais para a modelagem da dinâmica do manipulador.

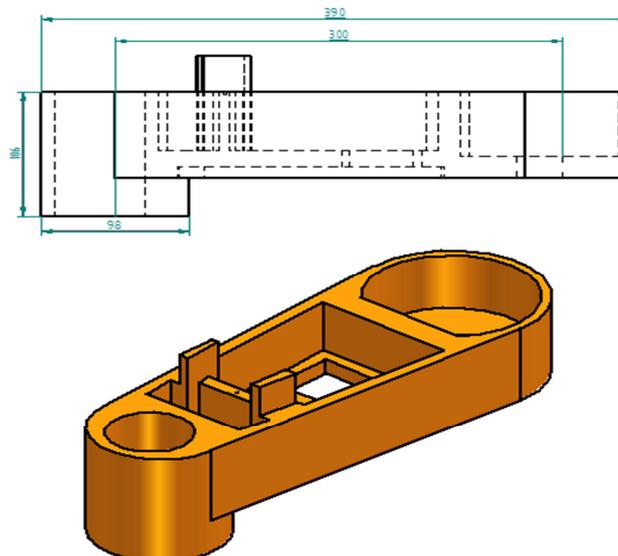
As Figuras 2.1 e 2.2 mostram, respectivamente, a modelagem no sistema CAD dos elos das juntas 1 e 2. O material usado para fabricação do manipulador foi uma liga de alumínio 1060 por meio do processo de fundição em molde de areia e usinagem convencional para retirar rebarbas e acabamento. Como esse material faz parte do banco de dados do software, foi possível calcular as propriedades mecânicas de cada elo. As Figuras 2.3 e 2.4, respectivamente, mostram essas propriedades dos elos 1 e 2. Elas mostram que os comprimentos das duas primeiras juntas são, respectivamente,  $l_1 = 350\text{mm}$  e  $l_2 = 300\text{mm}$  e as massas dos elos dessas juntas são respectivamente  $m_1 = 7.872\text{Kg}$  e  $m_2 = 4.277\text{Kg}$ .

Figura 2.1 – Modelagem no CAD do elo 1. Vista lateral direita e vista em perspectiva isométrica do primeiro elo.



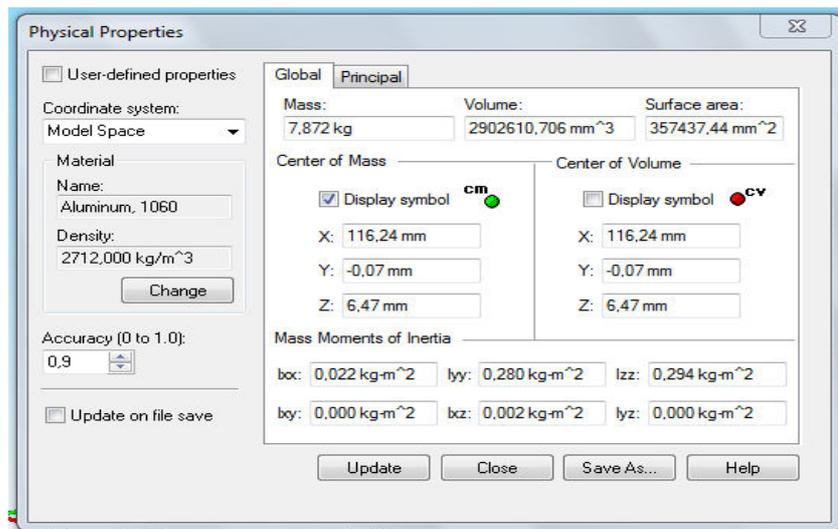
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.2 – Modelagem no CAD do elo 2. Vista lateral direita e vista em perspectiva isométrica do segundo elo.



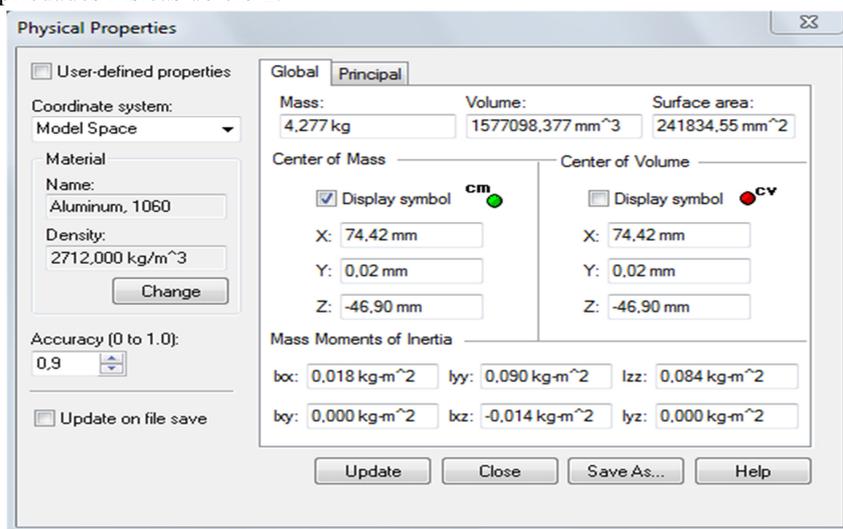
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.3– Propriedades Físicas do elo 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.4 – Propriedades Físicas do elo 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.3 Cinemática direta

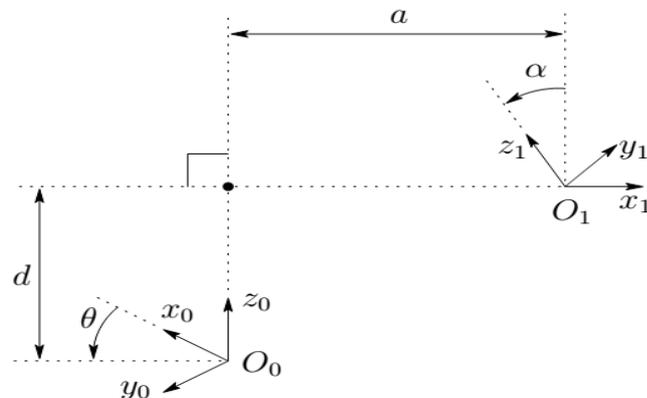
Jacques Denavit e Richard Hartenberg introduziram os conceitos fundamentais da cinemática de manipuladores com elos em série e como relacionar os sistemas de coordenadas das juntas em 1955 no trabalho de Denavit e Hartenberg (1955), e depois, em seu artigo clássico, “*Kinematic Synthesis of Linkages*” Hartenberg e Denavit (1964) apresentaram as bases para seu desenvolvimento em computadores digitais e até hoje denominada de convenção de Denavit-Hartenberg para modelar cinemática direta de manipuladores robóticos.

Nessa convenção, cada matriz de transformação homogênea dos sistemas de coordenadas é composta por quatro transformações básicas (duas rotações e duas translações). Dessa forma, mediante a escolha adequada dos sistemas de coordenadas, de forma que certos cancelamentos ocorram, são necessários somente quatro parâmetros  $(\alpha, a, d, \theta)$  para descrever a cinemática de cada elo do manipulador (Paul, 1981) (Craig, 2012).

$$A = Rot_{x,\alpha} Trans_{x,a} Trans_{z,d} Rot_{z,\theta} \quad (2.1)$$

A expressão tem como resultado uma matriz de transformação homogênea que relaciona dois sistemas de coordenadas. As transformações básicas são rotação em torno do eixo X com valor de  $\alpha_i$ , translação ao longo do eixo X de módulo  $a_i$ , translação ao longo do eixo Z de módulo  $d_i$  e rotação em torno do eixo Z com valor de  $\theta_i$ . Em que i indica o número da junta que está sendo modelada. Essas transformações podem ser visualizadas na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Transformações básicas da convenção D-H.



Fonte: Spong, 2006.

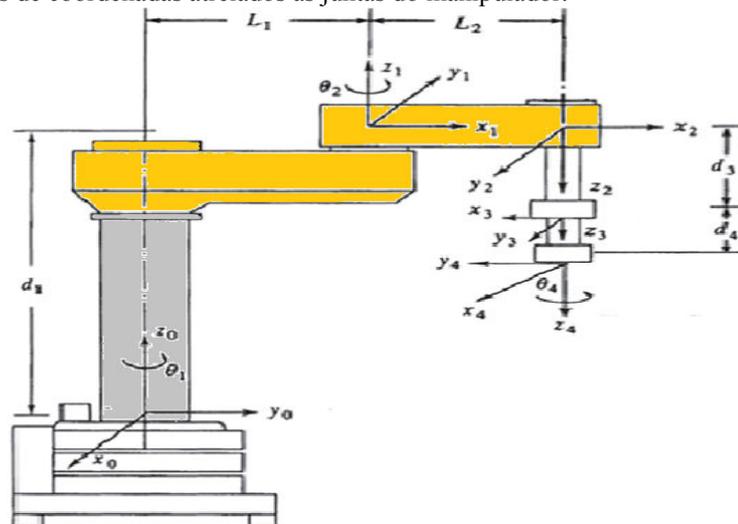
Para desenvolver a cinemática direta do manipulador SCARA, neste trabalho, foi adotada a convenção de Denavit-Hartenberg na forma modificada como apresentada em Spong (2006), Mittal (2011) e Liu (2014). Essa forma modificada simplifica os cálculos.

$$A = Rot_{z,\theta} Trans_{z,d} Trans_{x,a} Rot_{x,\alpha} \quad (2.2)$$

$${}_{n-1}^n A = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Os parâmetros estruturais do robô foram selecionados obedecendo aos critérios definidos por Denavit-Hartenberg (D-H), assim como, os sistemas de coordenadas foram atrelados às juntas como mostrado na Figura 2.6. As equações da cinemática direta levam em consideração que as juntas 1,2 e 4 são juntas rotacionais e a junta 3 é do tipo prismática (Linear). No Quadro 2.1 são mostrados os parâmetros de cada junta. A equação matricial (2.3) deve ser interpretada como uma representação geométrica da orientação e posição, as três primeiras colunas representam orientação e a última coluna a posição como mostrado na equação (2.4).

Figura 2.6 – Sistemas de coordenadas atrelados às juntas do manipulador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 2.1- Parâmetros D-H do Manipulador SCARA. Fonte: Autor.

Número do Eixo	Ângulo de Junta $\theta_i$	Offset do Elo $d_i$	Comprimento do Elo $a_i$	Ângulo de Rotação $\alpha_i$
1	$\theta_1$	$d_1=0.32$	$L_1=0.35$	0
2	$\theta_2$	0	$L_2=0.30$	$\Pi$
3	0	$d_3$	0	0
4	$\theta_4$	$d_4$	0	0

$$A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

As matrizes de transformação homogênea obtidas pelo algoritmo de D-H são as seguintes:

$${}^1_0 A = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & l_1 C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & l_1 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$${}^2_1 A = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & l_2 C_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$${}^3_2 A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$${}^4_3 A = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Em que  $S_1 = \text{sen}\theta_1$ ,  $C_1 = \text{cos}\theta_1$ ,  $S_4 = \text{sen}\theta_4$  e  $C_4 = \text{cos}\theta_4$ . Depois de calculada a matriz de transformação de cada junta, é calculada a matriz de transformação homogênea que indica a localização do elemento final do robô, a ferramenta, em relação ao sistema de referência da base.

$$T = {}^1_0 A_1 {}^2_1 A_2 {}^3_2 A_3 {}^4_3 A_4 = {}^4_0 A \quad (2.9)$$

$${}^4_0 A = T = \begin{bmatrix} S_4 S_{12} + C_4 C_{12} & S_4 C_{12} + C_4 S_{12} & 0 & l_1 C_1 + l_2 C_{12} \\ S_4 C_{12} + C_4 S_{12} & -S_4 S_{12} + C_4 C_{12} & 0 & l_1 S_1 + l_2 S_{12} \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_3 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Em que  $S_{12} = \text{sen}(\theta_1 + \theta_2)$  e  $C_{12} = \text{cos}(\theta_1 + \theta_2)$ . Observando a matriz de transformação homogênea do manipulador (Equação 2.10) e comparando com sua forma geométrica (Equação 2.4). A posição do elemento final do robô pode ser encontrada no espaço de tarefa a partir das coordenadas no espaço das juntas como observado nas equações 2.11 a 2.13.

$$P_x = 0.35C_1 + 0.30C_{12} \quad (2.11)$$

$$P_y = 0.35S_1 + 0.30S_{12} \quad (2.12)$$

$$P_z = d_1 - 0.42 \quad (2.13)$$

As equações 2.11 a 2.13 consistem na solução do problema da cinemática direta de posição para o manipulador SCARA. Esse conjunto de equações é fundamental para toda a pesquisa, porque a partir dele será construído o modelo da dinâmica do manipulador e um gerador de trajetórias tanto no espaço cartesiano quanto no espaço das juntas para execução dos experimentos e avaliação de desempenho do manipulador.

## 2.4 Cinemática inversa

Como as posições e trajetórias definidas para avaliação de desempenho do manipulador são definidas no espaço cartesiano, é necessária uma solução para cinemática inversa dos pontos de passagens definidos. Com a solução da cinemática inversa, é possível determinar o valor do ângulo de cada junta, a fim de colocar o manipulador na posição e a partir de então gerar trajetórias no espaço das juntas. Para resolver o problema da cinemática inversa é adotado o método geométrico (NIKU, 2014; CRAIG, 2012; MITTAL, 2011; SPONG, 2006).

Partindo das equações da cinemática direta (2.11) e (2.12), elevando ambos os membros das duas expressões ao quadrado e somando-os temos:

$$P_x^2 + P_y^2 = l_1^2 C_1^2 + l_1^2 S_1^2 + l_2^2 S_{12}^2 + l_2^2 C_{12}^2 + 2l_1 l_2 C_1 C_{12} + 2l_1 l_2 S_1 S_{12} \quad (2.14)$$

Aplicando as identidades trigonométricas:

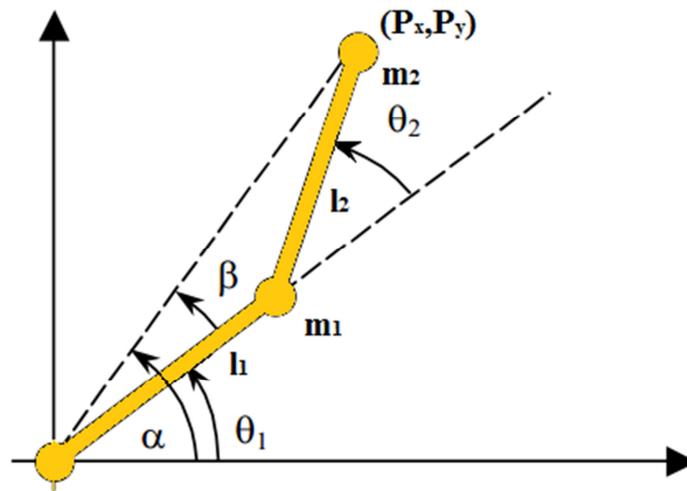
$$P_x^2 + P_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 C_2 \quad (2.15)$$

Isolando a variável  $\theta_2$  pode-se escrever:

$$\theta_2 = \pm \arccos\left(\frac{P_x^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (2.16)$$

A determinação de  $\theta_1$  não é tão direta como  $\theta_2$ , e a solução adotada neste trabalho passa pelo uso da tangente trigonométrica de uma diferença angular (ver Equação 2.17), como pode ser observado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Tangente Trigonométrica de uma diferença angular para  $\theta_1$ .



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\tan(A - B) = \frac{\tan A - \tan B}{1 + \tan A \tan B} \quad (2.17)$$

Na Figura 2.3 é mostrado que  $\theta_1 = \alpha - \beta$ , sendo:

$$\tan \beta = \frac{l_2 S_2}{l_1 + l_2 C_2} \quad (2.18)$$

$$\tan \alpha = \frac{P_y}{P_x} \quad (2.19)$$

Aplicando a identidade mostrada na equação (2.17) para  $\theta_1$ , temos:

$$\tan(\theta_1) = \tan(\alpha - \beta) \quad (2.20)$$

Fazendo as substituições adequadas  $\theta_1$  é dado por:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{P_y(l_1 + l_2 C_2) - P_x l_2 S_2}{P_x(l_1 + l_2 C_2) + P_y l_2 S_2}\right) \quad (2.21)$$

Para a junta três a solução é apenas isolar a variável  $d_3$  :

$$d_3 = 0.42 - P_z \quad (2.22)$$

As equações (2.16) e (2.21) encontradas para resolver o problema da cinemática inversa do manipulador SCARA serão usadas para conduzir o controle de posição durante a avaliação de desempenho. No entanto, é importante observar que essas soluções para cinemática inversa geram múltiplas soluções para a mesma posição da ferramenta no espaço cartesiano. Para evitar este problema, a solução implementada foi realizada usando a função arco tangente com dois argumentos ( $\text{Atan2}(a,b)$ ) com o objetivo de selecionar a solução positiva.

## 2.5 Dinâmica de manipuladores

A dinâmica estuda o movimento de um sistema levando em consideração as forças que produzem o movimento. A dinâmica de um manipulador rígido de  $n$  elos é convenientemente descrita pela formulação Lagrangiana (MITTAL, 2011). No enfoque Lagrangiano, as variáveis de juntas  $\theta$  são um conjunto adequado de coordenadas generalizadas. Sendo assim, a dinâmica do manipulador SCARA é modelada usando a mecânica Lagrangiana no espaço das juntas. É importante explicar que devido a restrições orçamentárias o *retrofitting* foi realizado apenas nas duas primeiras juntas, por isso no modelo da dinâmica e na parte experimental deste trabalho foram utilizadas também apenas as duas primeiras juntas.

Com o objetivo de projetar e simular um controlador, é necessário ter um modelo matemático que revele as propriedades dinâmicas do sistema e principalmente um modelo que auxilia no dimensionamento e seleção dos atuadores das juntas. Nesta etapa, são derivadas equações dinâmicas do movimento para o manipulador. Primeiro, são equacionadas a energia cinética e a energia potencial do manipulador e, em seguida, aplicada a equação de Lagrange para o movimento.

A energia cinética de um manipulador é dada por (SPONG, 2006):

$$K(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \quad (2.23)$$

Em que a matriz de inércia  $M(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é simétrica e positiva definida, isto é,  $M(\theta) = M^T(\theta) > 0$  para todo  $\theta \in \mathbb{R}^n$ . Por outro lado, no caso de robôs rígidos, a energia potencial, devido à gravidade, é definida pela função diferenciável  $P = g(\theta)$ ,  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ . Desta forma, a formulação baseada no Lagrangiano do sistema mecânico é definida como,

$$L(\theta, \dot{\theta}) = K(\theta, \dot{\theta}) - P(\theta) \quad (2.24)$$

E as equações de movimento do sistema são dadas por:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (2.25)$$

Em que  $\tau \in \mathbb{R}^n$  são os torques (forças) aplicados nas juntas. Assim, considerando a energia cinética do manipulador, a equação dinâmica do manipulador pode ser escrita em forma simplificada como:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (2.26)$$

Em que  $C \in \mathbb{R}^n$  é a matriz que descreve as forças centrípetas e de Coriolis, e  $G = \frac{\partial g}{\partial \theta} \in \mathbb{R}^n$  é o vetor de gravidade. O valor adotado para aceleração da gravidade neste trabalho foi  $g = 9,8m/s^2$ . Os efeitos do atrito nas juntas e de forças externas no efetuador podem ser incluídos no modelo dinâmico do manipulador:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + F(\theta)\dot{\theta} + G(\theta) = \tau - f_{ext} \quad (2.27)$$

Em que  $f_{ext}$  é uma força externa aplicada no efetuador e  $F(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  representa os efeitos das forças de atrito dinâmico e estático nas juntas. Esse vetor também representa os distúrbios e dinâmicas não modeladas como folgas nos acoplamentos e transmissões mecânicas. Em função do manipulador adotado neste trabalho ser uma máquina com mais de dez anos de uso o atrito existente nas juntas é função de muitas variáveis. Portanto requer uma pesquisa de identificação para ser modelado e isso seria uma forma de refinar o modelo dinâmico. Devido a essa dificuldade de modelagem do atrito e também em função do seu baixo módulo comparado com o momento de inércia, neste trabalho, o atrito será desconsiderado. Em Thanok (2014) é proposto um controlador adaptativo para compensar essas incertezas no modelo dinâmico de um robô SCARA, no entanto vale registrar que o manipulador utilizado neste trabalho é um equipamento fabricado no começo da década de

1990 e já apresenta um desgaste natural, o que torna mais difícil a modelagem do atrito e das forças externas.

Observe Figura 2.7, nela assumimos que a massa de cada elo está concentrada na sua extremidade, sendo  $m_1$  a massa do elo 1 e  $m_2$  a massa do elo 2. As massas da terceira e quarta juntas afetam o movimento das duas primeiras juntas atuando como uma carga, enquanto a quarta junta seria responsável apenas pela orientação da ferramenta no volume de trabalho. Observando os resultados obtidos na solução da cinemática inversa fica claro que  $\theta_4$  não afeta a posição da ferramenta, pode-se desprezá-lo na avaliação de desempenho de posição.

### a) Energia cinética

A energia cinética total do manipulador com acionamento das duas primeiras juntas é dada por:

$$K = K_1 + K_2 \quad (2.28)$$

A energia cinética do primeiro elo será:

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.29)$$

Para calcular  $K_2$ , primeiro encontramos a posição da massa do segundo elo no espaço cartesiano, que é dada pelas equações (2.11) e (2.12) e, em seguida, é calculada sua derivada temporal para obter a velocidade:

$$\dot{P}_x = -l_1 S_1 \dot{\theta}_1 - l_2 S_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.30)$$

$$\dot{P}_y = l_1 C_1 \dot{\theta}_1 + l_2 C_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.31)$$

Sabendo que  $v^2 = \dot{P}_x^2 + \dot{P}_y^2$ , temos:

$$v^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2l_1 l_2 C_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \quad (2.32)$$

Então, a energia cinética para a massa do segundo elo será:

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 C_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \quad (2.33)$$

E a energia cinética total do manipulador é encontrada substituindo as equações (2.29) e (2.33) na (2.28):

$$K = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2l_1l_2C_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) \quad (2.34)$$

### b) Energia potencial

Partindo das definições da mecânica clássica de ponto de referência (zero de energia potencial) a energia potencial do elo 1 é expressa por:

$$P_1 = m_1gl_1S_1 \quad (2.35)$$

A energia potencial do elo será dada por:

$$P_2 = m_2gl_1S_1 + m_2gl_2S_{12} \quad (2.36)$$

A energia potencial total do manipulador com as restrições será:

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.37)$$

Substituindo as equações (2.35) e (2.36) na (2.37):

$$P = (m_1 + m_2)gl_1S_1 + m_2gl_2S_{12} \quad (2.36)$$

Importante citar que o manipulador com o acionamento apenas das duas primeiras juntas realizará tarefas somente no plano horizontal, portanto sem apresentar variações na sua energia potencial. As equações da energia potencial são formalidade da mecânica de Lagrange, sendo as mesmas reduzidas a zero no momento do cálculo das derivadas parciais.

### c) Equação de Lagrange

Aplicando a formulação de Lagrange (2.24), o lagrangiano para o sistema será:

$$L = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2l_1l_2C_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) - (m_1 + m_2)gl_1S_1 - m_2gl_2S_{12} \quad (2.37)$$

A equação do movimento do manipulador a partir da formulação de Lagrange é obtida pelas derivadas parciais do lagrangiano (Equação 2.37). A seguir as derivadas parciais para o primeiro elo do manipulador:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2)l_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + 2m_2l_1l_2C_2\dot{\theta}_1 + m_2l_1l_2C_2\dot{\theta}_2 \quad (2.38)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2C_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2C_2]\ddot{\theta}_2 - 2m_2l_1l_2S_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_2l_1l_2S_2\dot{\theta}_2^2 \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2)gl_1C_1 - m_2gl_2C_{12} \quad (2.40)$$

Da equação (2.25), a primeira equação de movimento que descreve o torque da junta 1 será:

$$\tau_1 = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2C_2]\ddot{\theta}_1 + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2C_2]\ddot{\theta}_2 - 2m_2l_1l_2S_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_2l_1l_2S_2\dot{\theta}_2^2 + m_2gl_2C_{12} + (m_1 + m_2)gl_1C_1 \quad (2.41)$$

Da mesma forma, as derivadas parciais para o segundo elo do manipulador:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2l_2^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2l_1l_2C_2\dot{\theta}_1 \quad (2.42)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2l_2^2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2l_1l_2C_2\ddot{\theta}_1 - m_2l_1l_2S_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2l_1l_2S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) - m_2gl_2C_{12} \quad (2.44)$$

Da equação (2.25), a primeira equação de movimento que descreve o torque da junta 2 será:

$$\tau_2 = (m_2l_2^2 + m_2l_1l_2C_2)\ddot{\theta}_1 + m_2l_2^2\ddot{\theta}_2 + m_2l_1l_2S_2\dot{\theta}_1^2 + m_2gl_2C_{12} \quad (2.45)$$

Substituindo os valores de  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  e  $g$  em (2.41) e (2.45) temos:

$$\tau_1 = [1,873 + 0,898C_2]\ddot{\theta}_1 + [0,384 + 0,449C_2]\ddot{\theta}_2 - 0,769S_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - 0,384S_2\dot{\theta}_2^2 + 12,574C_{12} + 41,671C_1 \quad (2.46)$$

$$\tau_2 = [0,384 + 0,449C_2]\ddot{\theta}_1 + 0,384\ddot{\theta}_2 + 0,449S_2\dot{\theta}_1^2 + 12,574C_{12} \quad (2.47)$$

#### d) Dinâmica do manipulador forma matricial

Escrevendo as equações (2.41) e (2.45) na forma padrão matricial (2.26) temos:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2C_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2C_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2C_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & -m_2l_1l_2S_2 \\ m_2l_1l_2S_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2S_2 & -m_2l_1l_2S_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)gl_1C_1 + m_2gl_2C_{12} \\ m_2gl_2C_{12} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Na equação (2.48), os termos  $\ddot{\theta}$  estão relacionados com as acelerações angulares dos elos, os termos  $\dot{\theta}^2$  são acelerações centrípetas, e os termos  $\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2$  são as acelerações de Coriolis. Nesse manipulador, o primeiro elo funciona como um referencial rotativo (não inercial) para o segundo elo e, portanto, a aceleração de Coriolis está presente.

## 2.6 Modelagem das Juntas para o Sistema de Controle

Os sistemas de controle dos manipuladores podem ser modelados como sistemas monovariável (SISO) ou multivariáveis (MIMO). Porém o que norteará a escolha do projetista do sistema de controle será a estrutura mecânica do manipulador, mais precisamente o sistema de acoplamento do atuador à junta.

Alguns manipuladores que possuem acionamento direto com atuadores hidráulicos ou motores elétricos produzem forças ou torques muito grandes com cursos de curta duração. Isso significa que o atuador pode ser movido ligeiramente enquanto entrega toda a sua força ou torque. Como resultado, não há necessidade de usar trens de engrenagem de redução para aumentar o torque que produzem e para retardá-lo a velocidades controláveis. Por essa razão, os atuadores hidráulicos podem ser conectados diretamente aos elos, o que simplifica o projeto, reduz o peso, custo e a inércia rotativa das articulações, reduz a folga, aumenta a confiabilidade do sistema devido a um projeto mais simples e com menos peças, e reduz o ruído. Porém, pequenas variações na carga e perturbações causadas pelo movimento das demais juntas será sentido diretamente no atuador (NIKU, 2014). Portanto, o sistema de controle indicado para este caso é o MIMO.

Por outro lado, manipuladores com acionamento indireto utilizam motores elétricos que giram em altas velocidades, até muitos milhares de rotações por minuto, e usam um sistema de transmissão mecânica com engrenagens de redução para aumentar seu torque e diminuir a sua velocidade, já que não é desejável que o manipulador robótico gire a

velocidades tão altas. Naturalmente, isso aumenta o custo, o número de peças, a folga, a inércia do corpo rotativo, e assim por diante, mas também aumenta a resolução do sistema, já que é possível girar o elo de um pequeno ângulo. Como será mostrado, acionamentos indiretos com altas relações de transmissão implicam no fato de que os efeitos inerciais de carga podem realmente ser ignorados e cada junta ser controlada de forma independente (MITTAL, 2002). Portanto, o sistema de controle indicado para este caso é o SISO.

Considere a junta com acionamento indireto mostrada na Figura 2.8; conforme descrito em Batista (2014), os motores elétricos do manipulador são do tipo ímã permanente de 4 polos e seu torque ( $\tau_m$ ) é dado por:

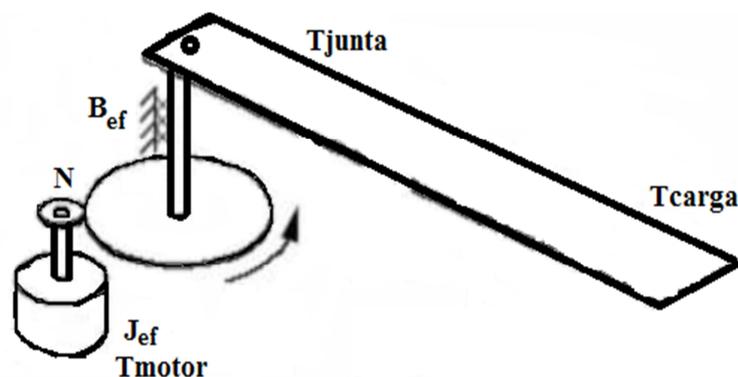
$$\tau_m = K_m i_a \quad (2.49)$$

Em que  $K_m$  é a constante de torque expressa em N.m/amp e  $i_a$  é a corrente elétrica de armadura do motor. A relação entre o torque desenvolvido no motor elétrico e o torque apresentado na junta do manipulador é dada por (MITTAL, 2011; PADOIN, 2010; SPONG, 2006):

$$\tau_m = \eta \tau_{junta} \quad (2.50)$$

Em que  $\tau_{junta}$  é o torque desenvolvido na junta e  $\eta$  é a relação de transmissão da junta.

Figura 2.8 – Modelo de Junta com acionamento indireto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mostrado em Spong (2006), Niku (2014) e Mittal (2002), junta robótica com acionamento indireto, apresenta o seguinte modelo matemático:

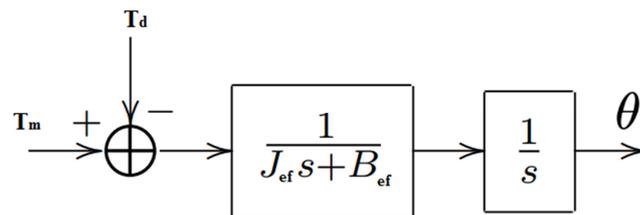
$$J_{ef} \ddot{\theta} + B_{ef} \dot{\theta} = \tau_m - \tau_d \quad (2.51)$$

Em que  $J_{ef}$  representa a inércia efetiva da junta, medida em  $\text{Kg.m}^2$ , que representa a soma da inércia do motor elétrico com a inércia do sistema de transmissão mecânica e  $B_{ef}$  representa o amortecimento efetivo gerado pelo atrito no motor elétrico e do sistema de transmissão mecânica (CRAIG, 2012).  $\tau_d$  é o distúrbio que representa o torque gerado pela carga na extremidade do elo  $\tau_{carga}$  e o torque gerado pelo movimento das demais juntas  $\tau_{\text{Demais juntas}}$  do próprio manipulador dividido pela relação de transmissão.

$$\tau_d = \frac{\tau_{carga} + \tau_{\text{Demais juntas}}}{\eta} \quad (2.52)$$

O diagrama de blocos da equação 2.51 é mostrado na Figura 2.9 no domínio de Laplace.

Figura 2.9 – Diagrama de blocos do modelo matemático da junta do manipulador com acionamento indireto.



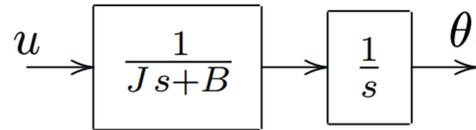
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mostrado em Niku (2014) e Spong (2006), os manipuladores robóticos com acionamento indireto por meio de trem de engrenagens podem ser considerados como um conjunto de sistemas SISO desde que a relação de transmissão (taxa de redução)  $\eta$  esteja entre 20 e 100. Essa consideração pode ser entendida observando a equação 2.52. A mesma mostra que quando  $\eta$  é muito maior que 1, o torque  $\tau_d$  pode ser desprezado. O modelo da junta passa a ser escrito no domínio do tempo da seguinte maneira, já desprezando o distúrbio em função da alta relação de transmissão:

$$J \ddot{\theta}(t) + B \dot{\theta}(t) = u(t) \quad (2.53)$$

Em que  $J = J_{ef}$ ,  $B = B_{ef}$  e  $u(t) = \tau_m$ . O diagrama de blocos do modelo da junta para o controle SISO é mostrado na Figura 4.3.

Figura 2.10 – Diagrama de blocos do modelo matemático da junta do manipulador com acionamento indireto sem distúrbio.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, para o projetista do sistema de controle optar pelo controle independente por junta, controlando cada junta como um sistema SISO, ele deverá conhecer as relações de transmissão de cada junta. A função de transferência de cada junta obtida a partir da equação (2.53) é:

$$G(s) = \frac{1}{s(Js + B)} \quad (2.54)$$

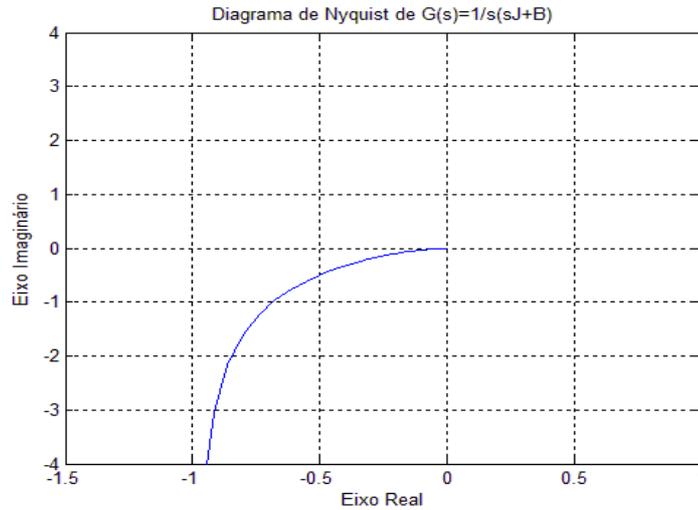
Em que a inércia efetiva da junta é  $J > 0$  e o amortecimento efetivo da junta  $B > 0$ . Aplicando o critério da estabilidade de Routh-Hurwitz, considera-se que o sistema é estável por apresentar todos os coeficientes da equação característica positivos. Apresenta um polo na região estável e um polo na origem do plano complexo. Outra maneira de verificar a estabilidade do modelo da junta como sistema SISO é adotando o critério da estabilidade de Nyquist e analisar no domínio da frequência. Para isso a equação 2.54 é escrita da seguinte maneira (LEONARDI, 2011):

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega(j\omega J + B)} = -\frac{J}{B^2 + \omega^2 J^2} - j\frac{B}{\omega(B + \omega^2 J^2)} \quad (2.55)$$

A Figura 2.11 mostra o diagrama de Nyquist de  $G(j\omega)$  para frequências positivas. Como essa função de transferência apresenta um integrador, a forma geral do diagrama difere dos diagramas da função de transferência de segunda ordem que não têm integrador. No entanto, o modelo atende ao critério de estabilidade de Nyquist.

Para o manipulador SCARA deste trabalho foi realizado o ensaio para calcular as relações de transmissões das juntas. Este ensaio de bancada consistiu em fazer cada junta girar  $90^\circ$  (1/4 de volta) com a frequência do inversor de frequência (driver de acionamento do motor elétrico) constante e igual a 3 Hz. Além disso, é importante saber que os motores elétricos são do tipo ímãs permanentes e não apresentam escorregamento e que o tempo necessário neste descolamento em cada junta foi medido e foi calculado o número de voltas de cada motor elétrico usando a seguinte equação (FRANCHI, 2007):

Figura 2.11 – Diagrama de Nyquist da equação 2.54 para frequências positivas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$N = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.56)$$

Em que  $f$  é a frequência de 3 Hz e  $p$  é o número de polos, neste caso igual a 4, de acordo com essa equação a velocidade de cada motor elétrico é de 90 RPM (Rotações por minuto). O Quadro 2.2 mostra os dados deste ensaio. O módulo da relação de transmissão da junta é dado por:

$$\eta = \frac{\text{número de voltas do motor}}{\text{número de voltas da junta}} \quad (2.57)$$

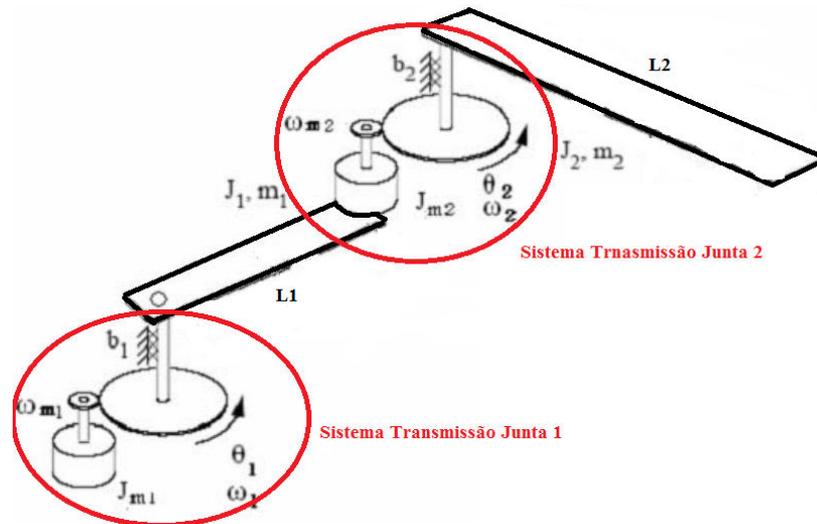
Portanto, as relações de transmissão  $\eta_1$  da junta 1 e  $\eta_2$  da junta 2 apresentam valores que justificam a adoção de sistemas de controle independentes por juntas. Considerando cada junta como um sistema SISO, foi projetado um controlador *fuzzy* tipo Sugeno de ordem zero para cada junta. Essa consideração também é válida para o controlador PID. A Figura 2.12 mostra o manipulador SCARA e a relação de transmissão das duas primeiras juntas com acoplamento indireto.

Quadro 2.2 – Dados do Ensaio para medição da relação de transmissão das juntas.

Junta	Tempo de deslocamento (s)	Número voltas do motor	Número de voltas da junta	Relação de transmissão ( $\eta$ )
1	13,35	20,025	0,25	$\eta_1 = 80,1$
2	8,6	12,897	0,25	$\eta_2 = 51,6$

Fonte: Elaborado autor.

Figura 2.12 – Sistemas de transmissão das duas primeiras juntas do Manipulador SCARA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um ponto importante para esclarecer é que o objetivo desta parte do trabalho não é encontrar um modelo matemático para as juntas do manipulador, visto que o controle Fuzzy não precisa deste modelo da planta a ser controlada. Porém, como o controlador Fuzzy foi projetado e simulado antes de ser embarcado no controlador industrial, um modelo aproximado que mostre as principais características do manipulador é fundamental para o desenvolvimento de um bom projeto. Outro ponto que se faz necessário conhecer a função de transferência do modelo da junta é na análise de estabilidade pelo critério de Popov mostrado no item 4.2 deste trabalho.

### 3 CONTROLE DE MANIPULADORES ROBÓTICOS E LÓGICA FUZZY

#### 3.1 Introdução

O controlador convencional de um manipulador robótico envia um sinal de controle (corrente ou tensão) a um dos atuadores fazendo-o acelerar em direção à próxima posição desejada. Mesmo que um sinal de realimentação seja ajustado para medir e parar o movimento, logo que a junta atinge a posição desejada, a junta pode ultrapassar e ir além da posição desejada, exigindo que um sinal de controle no sentido contrário seja enviado ao atuador para voltar e talvez esse movimento de vai-e-vem continue até que a posição desejada seja atingida com a precisão aceitável. Na pior das hipóteses, com um sistema instável, as oscilações podem se tornar maiores e não menores, e eventualmente destruir o sistema. Isso acontece principalmente porque o elo do manipulador e o atuador possuem, além dos limites físicos (saturação do sinal de controle e saturação da potência dos atuadores elétricos), uma inércia efetiva como descrito no item 2.6 deste trabalho.

Obviamente, deve ser possível diminuir o sinal de controle para o atuador e retardá-lo quando se aproxima da posição desejada, a fim de evitar sobressinal (*overshoot*). Mas quão cedo, e em que velocidade, o controlador deve fazer isso? Como ele faz para que o sistema não se torne instável? O controlador pode forçar o atuador a chegar ao destino mais rápido que o especificado sem sobressinal? Em caso afirmativo, quais as consequências? Todas essas são questões básicas que são respondidas por meio da seleção e projeto do sistema de controle do manipulador para se comportar como especificado. É importante citar que para os manipuladores industriais o desejável é que eles apresentem um comportamento criticamente amortecido (sem sobressinal) e um erro em estado estacionário aceitável para a tarefa executada (NIKU, 2014).

Para responder a estas questões, as técnicas de controladores convencionais (Proporcionais-Integrativos-Derivativos (PID) e Torque Calculado) são os que encontraram maior aceitação e aplicação na indústria de manipuladores nas últimas décadas em função de sua simplicidade, robustez e desempenho satisfatório nas tarefas da indústria. À medida que os processos industriais foram se tornando mais complexos, passando a exigir uma flexibilidade maior na especificação de parâmetros e menores custos, os projetistas começaram a considerar outras técnicas de controle que não somente as convencionais. Entre estas técnicas, as baseadas em IA são as mais promissoras. Diante disso, os controladores

baseados na denominada Lógica Fuzzy já estão sendo utilizados industrialmente, principalmente nos casos em que técnicas de controle convencionais são difíceis de aplicar (PASSOLD, 2003).

Neste capítulo, são apresentados os controladores chamados convencionais da robótica de manipuladores; em seguida, para introduzir os controladores com IA baseados em lógica Fuzzy, são apresentados os conceitos de Lógica Fuzzy e a metodologia de desenvolvimento de projeto de controladores Fuzzy. Também são apresentadas as inferências Mamdani e Takagi-Sugeno. O capítulo é encerrado com uma revisão bibliográfica das aplicações de controladores Fuzzy, embora pareça estranha revisão bibliográfica ao final do capítulo, mas o autor entende que depois de apresentadas características dos controladores Fuzzy é mais fácil entender as aplicações e suas contribuições.

### **3.2 Controle Convencional de Manipuladores**

O uso de técnicas de controle linear é válido somente quando o sistema controlado pode ser modelado por equações diferenciais lineares. Por isso o controle linear de robôs manipuladores é basicamente uma aproximação, visto que a dinâmica do manipulador é descrita por equações não lineares e acopladas como mostrado no segundo capítulo deste trabalho. As estratégias de controle linear apresentam bom desempenho para manipuladores com alta relação de transmissão (entre 20 e 100) e baixo escorregamento nas juntas. A maioria dos robôs manipuladores comercializados apresentam estas características. A maioria dos grandes fabricantes de manipuladores industriais pelas razões citadas acima e para reduzir custos opta por um controle PID independente por junta (NAGANNA, 2006).

Embora os controladores PID e o controlador de Torque Calculado sejam relativamente antigos, os mesmos representam o estado da arte da indústria de manipuladores. Eles são os controladores mais utilizados e denominados na robótica de manipuladores de controladores convencionais ou clássicos. Técnicas de controle avançadas como controle ótimo, adaptativo e robusto apresentam bons resultados, porém suas restrições matemáticas para o modelo matemático do manipulador e seu alto custo computacional inviabilizam sua aplicação em grande escala (MATARIC, 2014; NIKU, 2014; MITTAL, 2011; PRECUP, 2011; BARRIENTOS, 2007).

Os controladores convencionais necessitam do modelo dinâmico do manipulador. Para aplicar o PID, é realizada uma linearização por série de Taylor para considerar cada junta

independente e, assim, uma malha fechada de controle de posição em que a realimentação é apenas a posição da junta. Para aplicar o controle tipo torque calculado, é utilizado o modelo dinâmico inverso na realimentação da malha fechada, dessa forma as não linearidades são canceladas. O custo computacional deste último é muito maior e é necessário estimar ou medir a aceleração e a velocidade das juntas (MITTAL, 20011; CRAIG, 2012; SICILIANO, 2009).

O controle independente por junta consiste em considerar cada junta independente das demais para efeitos de controle. Ou seja, projeta-se um controlador para cada junta, ignorando os efeitos de acoplamento entre elas; em outros termos, o manipulador não é mais tratado como um conjunto de equações diferenciais acopladas. Para realizar este controle é conveniente ter um modelo SISO da junta a ser controlada e grande relação de transmissão entre o movimento do atuador e o deslocamento da junta. É importante registrar que o acionamento das demais juntas será tratado como perturbação para as demais malhas.

### 3.2.1 Controle PID de Manipuladores Robóticos

A lei de controle usada nesta estratégia é dada por:

$$\tau_{PID} = K_D \frac{de}{dt} + K_P e + K_I \int edt \quad (3.1)$$

Em que  $e$  é o erro atual na malha de controle fechada e  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  são matrizes de ganho do controlador.  $\tau_{PID}$  é o vetor de torque das juntas. É possível alcançar o desempenho desejado do sistema pela escolha correta dos valores dos parâmetros do controlador PID. O controle de um sistema robótico não pode apresentar oscilações.

O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é assim chamado devido à sua estrutura, composta de três ações básicas de controle, denominadas de ação proporcional, ação integral e ação derivativa. Devido a esta estrutura simples e da existência de ferramentas práticas para ajuste de seus ganhos, este controlador ganhou, ao longo do tempo, vasta aplicabilidade no controle de processos industriais adquirindo o status de controlador padrão e seu comportamento é uma referência para controladores novos. Os controladores PID são encontrados no ambiente industrial sob a forma de equipamento de uma entrada e uma saída, ou seja, equipamentos dedicados especificamente à execução de um algoritmo PID em uma malha de controle fechada de uma variável.

O PID é capaz de eliminar erros em regime permanente, por meio da ação integral, bem como antecipar o comportamento do processo, graças à ação derivativa. A ação proporcional, por sua vez, faz com que o sistema reaja ao erro presente, conferindo ao sistema uma reação imediata e rápida à ação de perturbações ou variações de referência. Algumas observações práticas para estes ganhos são:

- A ação proporcional é recomendada para melhorar a precisão do sistema, ou seja, com esta ação o erro pode ser diminuído com o aumento do ganho, entretanto nunca será possível anular completamente o erro. Observa-se que quanto maior o ganho, mais oscilatório tende a ficar o comportamento transitório do sistema. Na maioria dos processos, o aumento excessivo do ganho proporcional pode levar o sistema à instabilidade;
- A ação integral é recomendada para melhoria da precisão do sistema em regime permanente. Entretanto, seu aumento tende a tornar a resposta do sistema mais lenta e a torná-lo instável. Por esse motivo, esta ação de controle, em geral, não é aplicada de maneira isolada;
- A ação derivativa é recomendada para a obtenção de respostas transitórias mais rápidas, ou seja, para a melhora do comportamento dinâmico do sistema em malha fechada. Quando o sinal de erro em regime permanente é constante, a ação derivativa será nula, ou seja, esta ação atua apenas durante a resposta transitória, não tendo efeito em regime permanente.

Outro aspecto do controlador PID é o processo de selecionar os ganhos do controlador que garantam uma dada especificação de desempenho desejada. Esse processo é conhecido como sintonia do controlador. Existem muitas técnicas de sintonia, porém a técnica de Ziegler-Nichols baseada na resposta experimental ao degrau é a mais utilizada pela praticidade e pelo fato que na maioria das aplicações industriais quem faz a sintonia do controlador não tem acesso ao modelo matemático da planta que será controlada. Usando esta técnica é encontrado um conjunto de três valores  $K_p$ ,  $K_I$  e  $K_D$  que vão proporcionar uma operação estável da planta (LEONARDI, 2011).

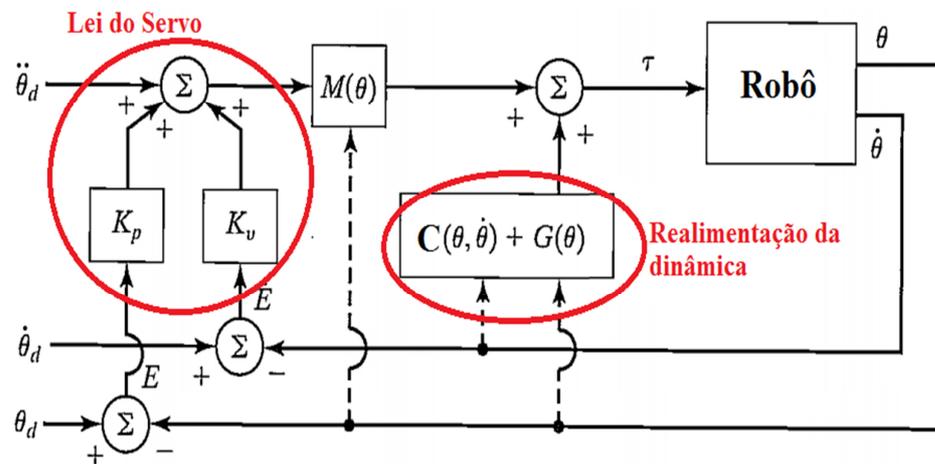
No entanto, a malha de controle resultante poderá apresentar um sobressinal alto como resposta ao degrau que geralmente é inaceitável. Nesse caso, é necessária uma série de sintonias finas até que uma resposta aceitável seja atingida. De fato, a técnica de Ziegler-

Nichols fornece estimativas dos valores dos ganhos e proporciona um ponto de partida na sintonia fina, e não os valores definitivos de  $K_p$ ,  $K_I$  e  $K_D$  logo na primeira tentativa.

### 3.2.2 Controle Torque Calculado de Manipuladores Robóticos

O controle de torque calculado é uma técnica de controle não linear que consiste em uma realimentação usando o modelo da dinâmica do próprio manipulador, cancelando assim as não linearidades (CRAIG, 2012). A Figura 3.1 mostra um diagrama de blocos do controle de torque calculado. O torque é calculado da seguinte maneira:

Figura 3.1 – Diagrama de blocos do controle de torque calculado.



Fonte: Adaptado de Craig, 2012.

$$\tau_{CRC} = M(\theta) \left[ \ddot{\theta} + K_v \dot{e} + K_p e \right] + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) \quad (3.2)$$

A lei de controle de linearização aplica o modelo da dinâmica do manipulador controlado, ou seja, atualizando as matrizes de Coriolis e Gravidade. As não linearidades da dinâmica direta cancelam as do modelo realimentado. Isso, junto com a lei do servo que tenta corrigir o sinal de erro, resulta em um sistema de controle linear de malha fechada. Obviamente, para fazer esse cancelamento, temos de conhecer os parâmetros e a estrutura do sistema não linear. Esse é com frequência o problema na aplicação prática dessa estratégia de controle, em que são realizadas várias aproximações.

O controle por torque calculado é uma estratégia de linearização por realimentação, em que a qualidade da linearização depende da aproximação entre os parâmetros do modelo e os parâmetros reais do manipulador robótico. Essa técnica de

controle necessita do uso do modelo dinâmico do robô. Embora a estrutura do modelo seja bem conhecida, os parâmetros não o são, pois varia em função da carga do manipulador, depreciação, temperatura de operação, condições de lubrificação etc. Utilizando-se controle adaptativo, técnicas de otimização e técnicas de inteligência artificial como lógica Fuzzy, procura-se compensar as variações e incertezas nestes parâmetros (CHEN, 2012). Portanto, se o modelo da dinâmica do manipulador é conhecido com precisão, o controle de torque calculado apresenta desempenho e estabilidade satisfatória. Outro ponto é o alto custo computacional deste sistema de controle que obriga os fabricantes a venderem os manipuladores industriais com computadores industriais dedicados, tornando-os mais caros e fechados.

### 3.3 Conceitos de Lógica Fuzzy

Lotfi Zadeh, professor da Universidade da Califórnia em 1965 (ZADEH, 1965), introduziu a ideia de conjuntos Fuzzy, que são uma forma de representar o conhecimento como uma generalização da teoria de conjuntos. Também definiu a lógica Fuzzy como uma matemática que podia representar incertezas. Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis na época eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento por meio da lógica computacional fundamentada na lógica booleana.

De acordo com a lógica Fuzzy de Zadeh, uma variável pode pertencer a um número qualquer de conjuntos em diferentes níveis de pertinência. Pode-se dizer que um conjunto Fuzzy  $A$  é definido como o par ordenado  $A = \{x, \mu_A(x)\}$ , em que  $x \in A$  e  $0 < \mu_A(x) < 1$ . Em que  $\mu_A(x) = 0$ , significa que o elemento  $x$  não pertence ao conjunto  $A$  e  $\mu_A(x) = 1$ , significa que o elemento pertence integralmente ao conjunto. A função de pertinência  $\mu_A(x)$  descreve o grau a que o objeto  $x$  pertence ao conjunto  $A$ . Para fundamentar a lógica Fuzzy também foram definidas as operações básicas realizadas com conjuntos Fuzzy: complemento, união e interseção (NASCIMENTO, 2000; SHAW, 2007). Sistemas de controle baseados em lógica Fuzzy podem ser utilizados para controle de manipuladores como uma solução para lidar com as não linearidades e as incertezas nos parâmetros. Consiste em usar IA nas aplicações em que os sistemas de controle convencionais são inadequados ou difíceis de usar.

Os modelos matemáticos de um processo real e complexo serão sempre uma simples representação da realidade. Os conhecimentos que nós dispomos de um sistema qualquer como um manipulador robótico, por exemplo, serão sempre incompletos e com diversas fontes de incertezas. As origens dessas imperfeições são principalmente devido a duas razões. A primeira decorre da maneira como esses conhecimentos são obtidos do mundo real. Essa etapa envolve observações por meio de instrumentos ou do próprio ser humano. Dessa forma, essas observações estarão sempre sujeitas a erros de incerteza. A outra origem das imperfeições decorre da maneira como esses conhecimentos do sistema real são representados em um modelo por meio da própria linguagem natural, de uma lógica formal ou de uma formulação matemática qualquer. Por isso, qualquer modelo matemático sempre será incompleto em função das simplificações necessárias à sua construção, seja na forma de função de transferência ou espaço de estados. Portanto, a observação, a aquisição e a representação dos conhecimentos irão conduzir inevitavelmente a uma perda de informações em relação ao sistema real, que será tanto maior quanto mais complexo for esse sistema.

Os modelos matemáticos baseados em lógica Fuzzy também são uma simplificação do processo real. Entretanto, no caso do controle de processos, esses sistemas Fuzzy permitiram mudar o paradigma clássico da teoria de controle. Isso é, ao invés de se procurar obter um modelo matemático para o processo e a partir dele projetar um controlador com um desempenho razoável, os sistemas Fuzzy tentam modelar diretamente como o ser humano controla esse processo (TEIXEIRA, 2000). O controle Fuzzy não necessita da modelagem do processo, e sim, da modelagem das ações a partir de um conhecimento de um especialista ou de uma especificação de desempenho, como uma trajetória gerada no espaço de tarefa considerando a cinemática e os limites da dinâmica de um manipulador. Essa é, portanto, uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle de processos, pois eles são desenvolvidos via modelagem matemática dos processos de modo a derivar as ações de controle como função do estado do processo.

Outro ponto importante da lógica Fuzzy é sua combinação com outras técnicas de IA como AG e RNA. Sendo os primeiros chamados de sistemas Fuzzy genéticos e os segundos de sistemas Neuro-Fuzzy. Os sistemas Fuzzy genéticos foram utilizados para controle de manipuladores robóticos em trabalhos como (SUN, 2004; OSMIC, 2008). Um sistema Neuro-Fuzzy é uma rede neural que aprende a classificar dados usando regras e conjuntos Fuzzy. Um sistema Neuro-Fuzzy apresenta vantagens em relação a outros sistemas Fuzzy e RNA tradicionais: uma RNA tradicional é geralmente descrita como uma caixa preta,

no sentido de que uma vez que seja treinada, será muito difícil entender porque uma determinada resposta é dada a um conjunto de entradas. Isso pode ser uma desvantagem quando RNA são usadas em tarefas de missão crítica, em que é importante saber por que um determinado componente falha no sistema de controle. Sistemas Fuzzy e sistemas Neuro-Fuzzy não apresentam essa desvantagem. Uma vez que um sistema Fuzzy tenha sido estabelecido é muito fácil ver quais regras ativaram e, então, porque ele deu uma resposta particular a um conjunto de entradas. De modo semelhante, com um sistema Neuro-Fuzzy é possível verificar quais regras foram desenvolvidas pelo sistema e essas regras podem ser examinadas por especialistas para garantir que tratem o problema corretamente (MBEDE,2003).

Em linhas gerais, esses são os fundamentos da denominada Lógica Fuzzy que é a técnica de IA utilizada neste trabalho. Para maiores esclarecimentos sobre conjuntos Fuzzy e suas operações ver (KOSKO, 1992; ENGELBRECHT, 2007; SHAW, 2007).

### **3.4 Controladores baseados em Lógica Fuzzy**

O grande impulso das aplicações industriais da lógica Fuzzy aconteceu nos anos 1980 no Japão. Essa tecnologia se mostrou uma ferramenta poderosa para o tratamento de informações e foi utilizada em numerosos casos industriais e científicos, tais como:

- Controle de centrais termonucleares;
- Funcionamento automático de trens;
- Controle de processos químicos;
- Sistemas inteligentes para eletrodomésticos (filmadoras, máquinas de lavar, forno microondas etc.);
- Sistemas de controle na indústria aeroespacial;

Desenvolver um controlador para um determinado processo consiste em adotar um algoritmo que levará o processo controlado a estados desejados dentro de critérios definidos. O desenvolvimento de controladores baseados em lógica Fuzzy possui uma metodologia simples que consiste em passos bem definidos e fundamentais para otimizar o desempenho do controlador ainda na fase de projeto. É possível analisar a resposta do controlador em função do erro sem realizar a simulação com modelos da planta apenas com o

sinal das entradas. Conhecendo a resposta do controlador em função do erro também é possível analisar a sua estabilidade.

Essa metodologia historicamente também é chamada de inferência Fuzzy de Mamdani. A inferência Fuzzy de Mamdani foi criada pelo professor Ebrahim Mamdani (MAMDANI, 1975) e foi usada por ele para controlar uma combinação de um mecanismo a vapor e um aquecedor. A inferência Fuzzy permite a um sistema de controle Fuzzy converter valores de entrada reais em variáveis Fuzzy e, então, raciocinar sobre estas variáveis, resultando em uma saída real aplicável ao processo (SHAW, 2007). A seguir, serão descritas as etapas do desenvolvimento do controlador baseado em lógica Fuzzy.

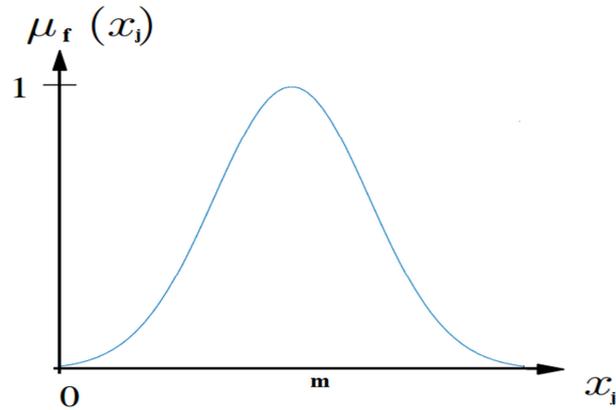
**Fuzzificação** é o processo de conversão de valores de entrada reais em variáveis Fuzzy por meio de funções de pertinência. O resultado da fuzzificação é um conjunto de variáveis e gráficos que descrevem o grau de pertinência de diferentes valores em diferentes variáveis Fuzzy. Para fuzzificar uma variável, a sua gama de valores possíveis é dividida em vários conjuntos, cada um descrevendo uma parte específica do intervalo. Posteriormente, cada intervalo é representado por uma equação ou um gráfico que descreve o grau de verdade ou pertinência de cada valor dentro do intervalo.

O número de conjuntos, o intervalo que cada conjunto representa, e o tipo de representação são uma escolha do projetista do sistema de controle. Esses parâmetros do controlador Fuzzy podem ser modificados e melhorados quando o sistema é simulado e analisado até apresentar um desempenho satisfatório. Várias possíveis representações estão disponíveis para cada conjunto. O projetista pode criar seu próprio sistema nebuloso, usar uma representação que ache mais apropriada. Em Silva (2012) são utilizadas funções de pertinências trapezoidais e triangulares. As funções de pertinência a seguir são comuns em sistemas comerciais para desenvolvimento de sistemas Fuzzy (MATLAB, 2012, NIKU, 2014; LOPES, 2014):

- Função de pertinência gaussiana, mostrada na Figura 3.2 é definida como:

$$\mu_f = e^{-\frac{(x_j - m)^2}{a^2}} \quad (3.3)$$

Figura 3.2 – Função de pertinência gaussiana.



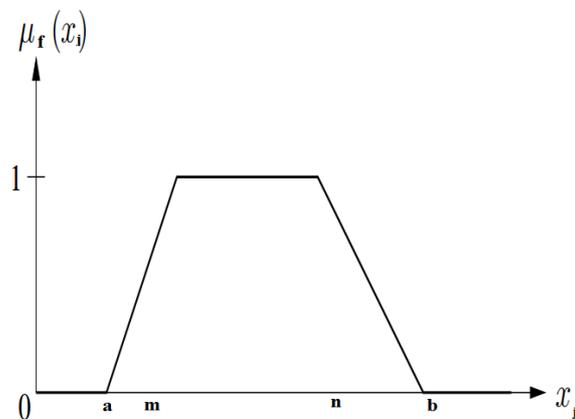
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em que o parâmetro  $m$  determina a posição do centro do pico e  $\alpha$  controla a largura do sino da função gaussiana.

- Função de pertinência trapezoidal, mostrada na Figura 3.3 e definida como:

$$\mu_f = \begin{cases} 0, & \text{se } x_j < a; \\ \frac{x_j - a}{m - a}, & \text{se } x_j \in [a, m]; \\ 1, & \text{se } x_j \in [m, n]; \\ \frac{b - x_j}{b - m}, & \text{se } x_j \in [n, b]; \\ 0, & \text{se } x_j > b; \end{cases} \quad (3.4)$$

Figura 3.3 – Função de pertinência trapezoidal.

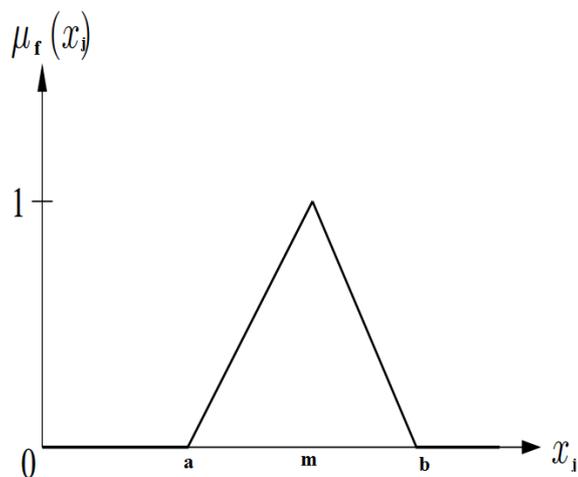


Fonte: Elaborada pelo autor.

- Função de pertinência triangular, mostrada na Figura 3.4 e definida como:

$$\mu_f = \begin{cases} 0, & \text{se } x_j < a; \\ \frac{x_j - a}{m - a}, & \text{se } x_j \in [a, m]; \\ \frac{b - x_j}{b - m}, & \text{se } x_j \in [m, b]; \\ 0, & \text{se } x_j > b; \end{cases} \quad (3.5)$$

Figura 3.4 – Função de pertinência triangular.



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Base de regras** (Inferência Fuzzy) é a parte do controlador do sistema e é baseada em uma tabela verdade ou conjunto de regras. A base de regras é um conjunto de regras relacionadas com os conjuntos nebulosos, as variáveis de entrada, e as variáveis de saída, e se destina a permitir que o sistema possa decidir o que fazer em cada caso. Geralmente, leva uma das seguintes formas, dependendo do número de variáveis de entrada e de saída:

- Se < condição > então < consequência >;
- Se < condição 1 > e (ou) < condição 2 > então < consequência >;
- Se < condição 1 > e (ou) < condição 2 > então < consequência 1 > e (ou) < consequência 2 >;

Com uma dessas definições, o sistema pode verificar todas as regras para os dados de entrada e calcular a saída correspondente. O sistema de lógica que então verifica as regras e encontra a saída correspondente é chamado de inferência Fuzzy (SHAW, 2007). As regras

Fuzzy podem ser empregadas para controle direto, supervisão ou assistência ao operador. Neste trabalho, é dedicada maior atenção ao controle direto, uma vez que é a modalidade que apresenta maiores diferenças em relação aos sistemas convencionais.

**Defuzzificação** é a conversão de uma variável de saída Fuzzy em variável real equivalente para uso direto no processo, geralmente um sinal de tensão ou corrente elétrica. Quando as regras Fuzzy são avaliadas e os valores correspondentes são calculados, o resultado será um número relacionado com os valores de pertinência correspondentes para diferentes conjuntos nebulosos de saída. A saída do controlador Fuzzy é um conjunto Fuzzy no universo da saída. Como o manipulador neste trabalho requer um sinal não Fuzzy (real) em sua entrada, deve-se fazer a defuzzificação deste conjunto Fuzzy. Essa interpretação pode ser feita por meio de vários métodos matemáticos, como Média dos Máximos (MOM), Centro de Gravidade (COG) e média ponderada (NASCIMENTO, 2000; ENGELBRECHT, 2007; SHAW, 2007).

O comportamento e o desempenho de sistemas de inferência Fuzzy dependem de aspectos relacionados à sua estrutura e implementação, tais como: número de conjuntos Fuzzy associados a cada variável de entrada definidos na etapa de fuzzificação, formas das funções de pertinência, operadores utilizados na criação de regras para a inferência, quantidade de regras, método de defuzzificação, saturação nos sinais de entrada e saída, fatores de escala para implementação em controladores digitais e quando necessária a normalização das variáveis reais.

### **3.5 Inferência Mamdani e Inferência Takagi-Sugeno**

A metodologia de projeto de controladores Fuzzy adotada neste trabalho é apenas uma recomendação não necessariamente uma regra, embora a maioria das aplicações siga esta metodologia que tem sua origem no trabalho de Mamdani (1975), que usou o centro de gravidade na etapa de defuzzificação. O próprio Mamdani em (Mamdani, 1977) também deu origem ao que é hoje denominado controlador Fuzzy baseado em tabela. Existem outras metodologias de projeto de controladores que surgiram a partir de Mamdani como o controlador baseado em tabela e o controlador Takagi-Sugeno (ENGELBRECHT, 2007).

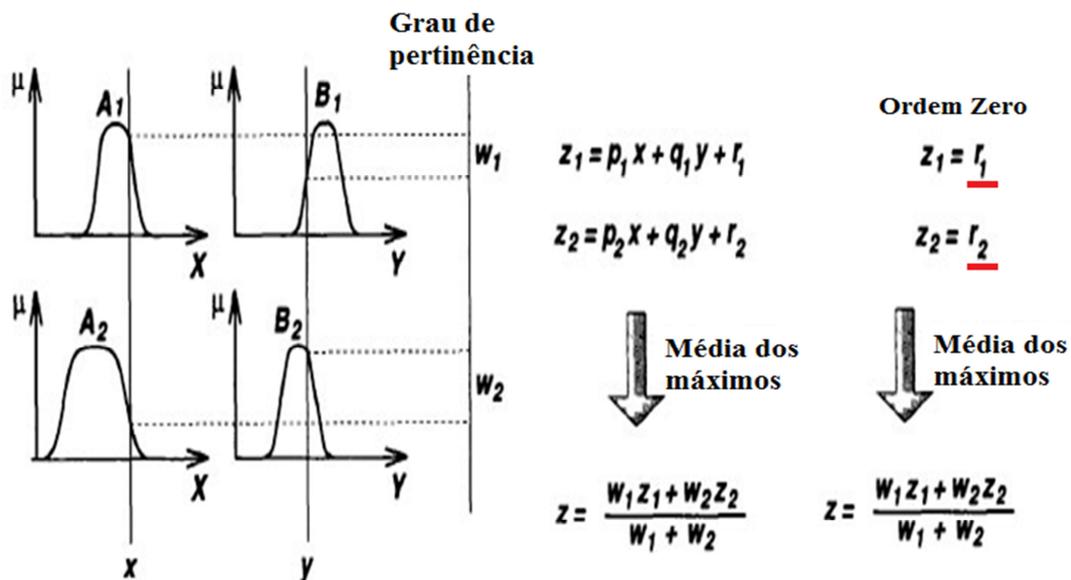
Takagi e Sugeno (1985) (T-S) introduziram uma ferramenta para modelagem de sistemas baseada na teoria Fuzzy. No mesmo artigo, os autores também discutem duas aplicações industriais: Uma relacionada ao tratamento de água e outra com respeito à

produção de ferro. A Figura 3.5 mostra como foi definida a defuzzificação T-S no trabalho original de 1985, por meio de funções lineares que tinham como variáveis, as variáveis de entrada e seus respectivos graus de pertinência. Portanto cada regra está associada a uma função.

As regras Fuzzy de Takagi-Sugeno são da seguinte forma: SE  $A_i$  é  $x$  e  $B_i$  é  $y$ , ENTÃO  $z = z_i(x, y, \dots, r_i)$ , em que  $A, B$  são conjuntos Fuzzy dos antecedentes enquanto que o conseqüente é uma função das variáveis de entrada. O resultado de cada regra é, portanto, um valor numérico (não um conjunto Fuzzy), que assume como peso o valor da pertinência resultante do processamento do antecedente da regra. A resposta final do controlador é obtida pela média ponderada das respostas das regras individuais.

O valor de  $z_i$  pode também ser definido como um valor constante, que pode ser interpretado como um conjunto Fuzzy com a característica especial de apresentar um único valor com pertinência igual a um e todos os demais com pertinência zero. Este tipo de conjunto Fuzzy é denominado *singleton* (degrau), e o seu emprego permite a definição de regras com valores de saída que representam uma classificação da resposta do controlador, sem alterar a forma simplificada da determinação da resposta final do controlador (Ver Figura 3.5).

Figura 3.5 - Inferência Takagi-Sugeno



Fonte: Elaborada pelo autor.

A metodologia T-S possui aplicações em diversas áreas incluindo: automação e controle, robótica, previsão de séries temporais, reconhecimento de padrões e matemática teórica. Porém é importante ressaltar que, diferente da inferência Mamdani que foi concebida como controlador, o que chamamos hoje de controlador Fuzzy T-S foi concebido como uma ferramenta de modelagem e identificação de plantas. Em trabalhos como Souza (2006) e Mozeli (2008) é clara a metodologia de modelagem e controle não linear multivariável usando controlador Fuzzy T-S. Em Farooq (2011) é realizada a comparação entre o controlador Fuzzy Sugeno de ordem zero e o controlador Fuzzy tipo Mandani na tarefa de realizar a navegação livre de obstáculo de um robô móvel.

Em Xu (2012) é desenvolvido um controlador Fuzzy para um robô móvel, esse controlador é denominado tipo T-S; no entanto, as funções de pertinência adotadas na defuzzificação não são *singleton* e nem tampouco são usados modelos funcionais do comportamento do robô. Embora as funções adotadas sejam polinomiais no formato S, o cálculo da saída é realizado simplesmente usando a média ponderada. Ainda na robótica móvel (STOIAN, 2008) é apresentado um trabalho pioneiro na descrição de controladores baseados em lógica Fuzzy com campos potenciais artificiais para desvio e navegação na vizinhança de obstáculos.

A ideia desses modelos também conhecidos como modelos funcionais Fuzzy (AGUIRRE, 2007) consiste na descrição aproximada de um sistema não linear como combinação de certo número de modelos lineares invariantes no tempo locais, que descrevem aproximadamente o comportamento do sistema em diferentes pontos do seu espaço de estados. Dessa forma, pode-se interpretar a técnica tradicional de linearização em apenas um ponto de operação como um caso particular dos modelos Fuzzy T-S, consistindo apenas em um modelo local. Essa classe de modelos de projeto permite que o projetista utilize o seu conhecimento sobre o sistema que será controlado na definição do número dos modelos locais e dos pontos ou regiões, nas quais esses modelos locais serão definidos.

No controle de sistemas Fuzzy T-S, a ideia mais utilizada é que, para cada modelo linear local, seja projetado um controle de realimentação linear. O regulador global resultante, que é não linear em geral, é uma combinação Fuzzy de cada regulador linear individual. Dessa forma, as análises de estabilidade e problemas de projetos de sistemas de controle são descritas por meio de Desigualdades Matriciais Lineares (em inglês, Linear Matrix Inequalities (LMIs)), que podem ser resolvidas eficientemente por técnicas de programação convexa (SOUZA, 2006; MOZELI, 2008). Para análise de estabilidade de sistemas de

controle Fuzzy usando a teoria de Lyapunov, a função candidata também deve ser uma função Fuzzy e a planta modelada por modelos locais (funcionais) Fuzzy (FARIA, 2010; ESTEVES, 2011; AGUIRRE, 2007). O problema desta metodologia é o seu alto custo computacional, pois se faz necessário resolver LMIs para garantir a estabilidade.

### **3.6 Aplicações de Controladores baseados em lógica Fuzzy**

Este trabalho não tem por objetivo esclarecer todos os pontos da teoria dos sistemas de controle baseados em Lógica Fuzzy. No entanto, o autor considera importante apresentar os principais tipos de controladores, como feito antecipadamente, e citar as principais aplicações desses controladores ressaltando que, das principais técnicas de IA, a Lógica Fuzzy é a que apresenta maior estágio de desenvolvimento. Diante disso, grandes fabricantes de controladores industriais já possuem em seus catálogos alguns algoritmos Fuzzy.

Existem aplicações de controladores Fuzzy em quase todas as áreas da tecnologia. Em Rubio (1995) é apresentada uma aplicação de controle Fuzzy para uma usina de energia solar, trabalho pioneiro na área de energia solar com IA. Em Sahoo (2000) é apresentada uma aplicação da lógica Fuzzy para controlar diretamente a saída de torque de um motor de relutância comutada por um esquema de modulação de corrente. Em Sindorf (2005), a lógica Fuzzy foi utilizada para fornecer um sinal de realimentação de força à alavanca de controle de uma cadeira de rodas para um usuário cego. Quando a cadeira de rodas se aproxima de um obstáculo ou um desnível, o controle Fuzzy auxilia a tomada de decisão.

Em Diogo (2012) é apresentado o controle em malha fechada, por meio de estimulação elétrica funcional, para o movimento da perna de um paciente paraplégico. Isso é feito utilizando modelos Fuzzy tipo Takagi-Sugeno, os quais resolvem classes de sistemas não lineares. O problema é descrito por desigualdades matriciais lineares (LMI) atendendo a especificações, tais como estabilidade segundo o teorema de Lyapunov, taxa de decaimento e restrição no sinal de entrada. Esse controle foi projetado para variar o ângulo de articulação do joelho na faixa de 0° a 45°. Em Mauer (1995), é apresentada uma aplicação de controlador baseado em lógica Fuzzy para controle do sistema de freio com ABS (Anti-Blocking System) para a indústria automobilística. Em Yinhan (2010) é apresentada a aplicação de um controlador baseado em lógico Fuzzy em um sistema de suspensão automotiva com dois

graus de liberdade. Este trabalho, por meio de simulação computacional, evidencia a melhoria no conforto dos passageiros e na dirigibilidade do veículo.

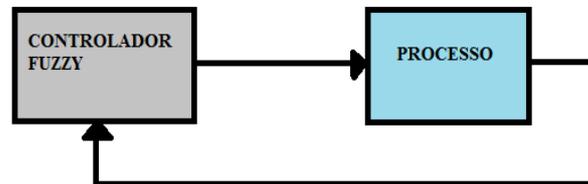
Na área da robótica tem-se os seguintes trabalhos: o controle de manipuladores baseado em lógica Fuzzy teve início na década de 1990 com trabalhos teóricos como o realizado por Erbatur (1995). Nesse trabalho, o autor demonstrou que o controle Fuzzy direto no espaço das juntas apresenta bons resultados, mas ressalta que ajustar os parâmetros do controlador é o desafio. Em Velagio (2005) é mostrada a simulação computacional de um controle de posição da primeira junta de manipulador planar. Nesse trabalho, são usadas como entradas para o controlador o erro de posição e a corrente elétrica do atuador, a saída é o torque a ser aplicado. Em Mbede (2000) um controlador Fuzzy tipo Takagi-Sugeno é utilizado para acionar um manipulador robótico em um ambiente dinâmico com obstáculos, para geração de trajetória e evitar as colisões foi utilizada a técnica de campos potenciais artificiais (SILVA, 2014). Como variáveis de entrada para o controlador foram adotados o erro de posição (ERROR) e a distância (DISTANCE) entre a ferramenta do manipulador e o obstáculo mais próximo e como variável de saída o torque da junta

Em Silva (2014) e Farooq, (2011) é apresentado o controlador Fuzzy do robô móvel com tração diferencial para seguimento de trajetória e desvio de obstáculo respectivamente. Ainda na robótica móvel outra aplicação clássica é projetar um robô para terrenos acidentados. Um sistema de controle de lógica Fuzzy pode ser usado para melhorar o controlador do robô para decidir que atitude tomar, dependendo da velocidade do robô, do terreno, da potência do robô, e assim por diante (ROSELI, 2014). Nestes, e inúmeros outros exemplos semelhantes, a lógica Fuzzy pode ser a melhor escolha para incorporar a inteligência necessária para realizar a tarefa. Além disso, muitos dispositivos periféricos são integrados com robôs ou trabalham com um robô por meio de seu próprio controlador (ROMANO, 2002). Nesses casos, também, a lógica Fuzzy pode ser incorporada ao processador para um melhor desempenho.

O trabalho de Precup (2011) é uma revisão das aplicações dos controladores Fuzzy. Sua principal contribuição foi mostrar como a indústria está aplicando os controladores nas suas malhas de controle. São citadas cinco estratégias de controle, a primeira (adotada neste trabalho) é o controle Fuzzy direto em que o sinal da defuzzificação é enviado ao processo como sinal de controle (Figura 3.6). A segunda estratégia de controle é o controle Fuzzy em paralelo com um controlador convencional (Figura 3.7). Essa estratégia também é conhecida como *Fuzzy Switching PID* (FS-PID) e tem por característica selecionar

que controlador, o Fuzzy ou o PID, enviará o sinal de controle em cada instante em função das condições de operação e do regime transitório ou estacionário da planta (JIA, 2006).

Figura 3.6 – Controle Fuzzy Direto.

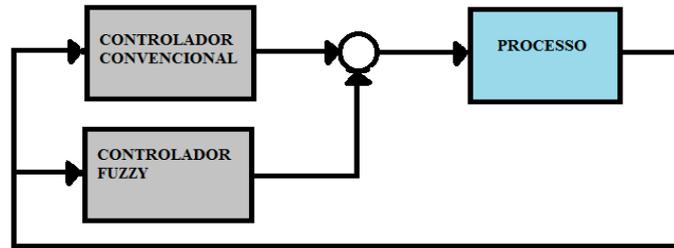


Fonte: Elaborada pelo autor.

A terceira estratégia de controle é denominada controle refinado com lógica Fuzzy. Nela, o controlador Fuzzy é alimentado com o sinal de erro e com a saída do controlador convencional gerando um sinal de controle mais preciso e na mesma direção do controlador convencional (Figura 3.8). A quarta estratégia de controle consiste numa interface Fuzzy para interação homem-máquina. Nesse tipo de aplicação, o operador envia comandos para o controlador Fuzzy que também é realimentado com as saídas do processo. Em seguida, ele envia ao controlador convencional não só o sinal de erro, mas também parâmetros do controlador em função do estado do sistema. Portanto, trata-se de um controle adaptativo e uma sintonia automática do controlador pela lógica Fuzzy (Figura 3.9).

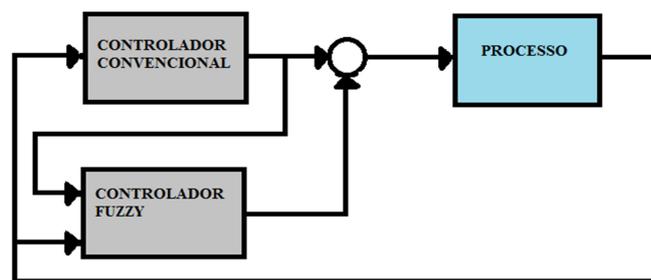
A quinta estratégia de controle é a mais utilizada, porque resolve um problema clássico da indústria “sintonia de controladores convencionais”. Nela, são aplicados todos os conceitos do controle clássico, porém os ganhos do controlador convencional serão ajustados de forma automática pela lógica Fuzzy (Figura 3.10). Portanto, variações no processo como mudança de ponto de operação, mudanças na própria planta serão compensadas. Vale lembrar que, nessa estratégia de controle, quem envia o sinal de controle para planta ainda é o controlador convencional e não um controlador baseado em lógica Fuzzy. Qual a relevância disso? Nessa estratégia, tem-se apenas um controlador convencional com ganhos adaptativos e podem ser aplicadas ferramentas como o critério de Lyapunov para análise de estabilidade.

Figura 3.7- Controle Fuzzy Paralelo.



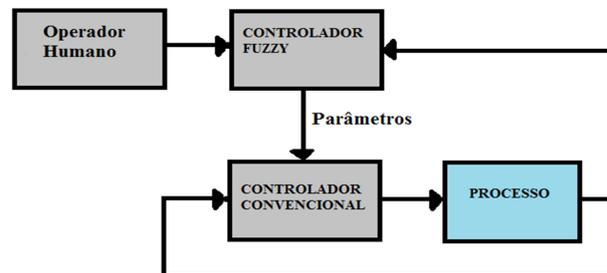
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.8 - Controle refinado com lógica Fuzzy.



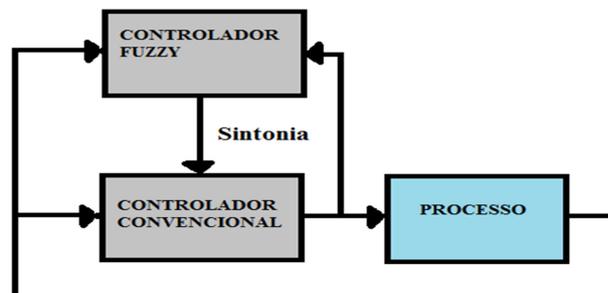
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.9 – Interface Fuzzy para controle Homem-Máquina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.10 – Sintonia de Controlador usando Lógica Fuzzy.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4 PROJETO CONTROLADOR FUZZY

O controlador Fuzzy desenvolvido neste trabalho é uma versão do modelo proposto por Takagi-Sugeno (TAKAGI, 1985) denominado Sugeno de ordem zero e seguiu a metodologia apresentada no Capítulo 3. Este capítulo inicia com a apresentação das etapas do projeto do controlador Fuzzy e comentários sobre as escolhas tomadas, são descritas as entradas e saídas do controlador Fuzzy T-S de ordem zero desenvolvido neste trabalho. Em seguida é feita uma análise da estabilidade do controlador Fuzzy utilizando o critério de Popov, isto porque temos um controlador não linear e uma planta linear considerando controle independente por junta. Em seguida é apresentado o controlador PID do CLP Twido utilizado e seu processo de sintonia para controle de posição do manipulador SCARA. O Capítulo encerra com uma breve comparação do controle Fuzzy com o convencional PID. Portanto, neste capítulo é atingido o primeiro objetivo principal deste trabalho que é o desenvolvimento do controlador de posição baseado em Lógica Fuzzy para o manipulador SCARA.

### 4.1 Projeto de Controlador Fuzzy

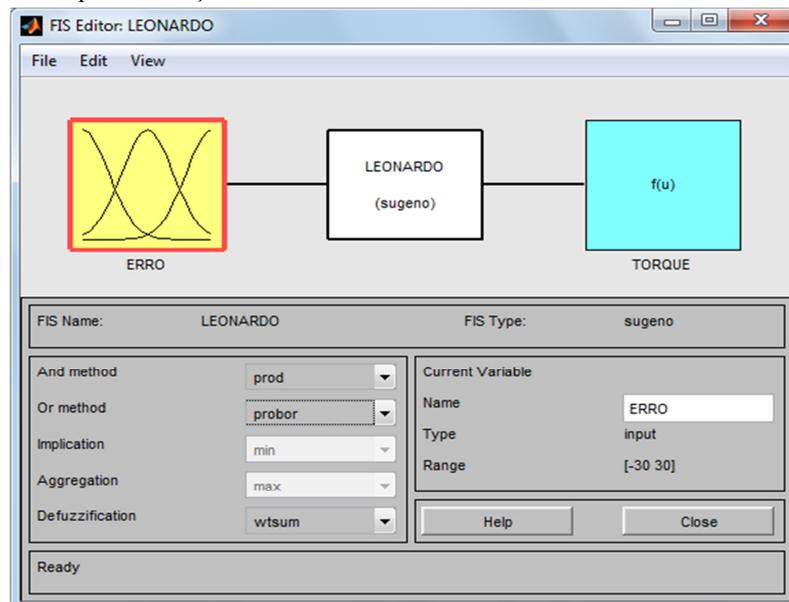
Para o projeto do controlador Fuzzy Takagi-Sugeno seguindo a metodologia tradicional a primeira etapa é definir o número de variáveis de entrada e saída. Em todas as etapas do projeto foi utilizado o *ToolBox Fuzzy Logic* do Matlab®. Como variável de entrada foi adotado o erro de posição (ERRO) de cada junta calculados a partir da comparação entre a posição desejada e a posição medida da junta. É importante lembrar que a instrumentação disponível mensura em tempo real apenas a posição da junta, por isso uma única variável de entrada. A variável de saída é o torque (TORQUE) a ser desenvolvido pelo motor elétrico da junta. Como característica dos sistemas Fuzzy, as decisões tomadas na fase de projeto do controlador levam em consideração os conceitos teóricos e a experiência do autor na indústria trabalhando com manipuladores (KOSKO, 1992; NIKU, 2014). Os resultados de Nawrocka (2014) confirmaram as definições de projeto adotadas neste trabalho, por serem trabalhos independentes e com resultados semelhantes.

A Figura 4.1 mostra a tela do *ToolBox Fuzzy* onde as entradas e saídas do controlador são definidas. É possível observar também que o motor de inferência Fuzzy é baseado no algoritmo Takagi-Sugeno. O primeiro retângulo da Figura indica a variável de entrada ERRO, o retângulo intermediário mostra o controlador Fuzzy e terceiro retângulo indica a variável de saída TORQUE.

A etapa seguinte é a definição dos conjuntos Fuzzy das variáveis de entrada e saída. A variável real “ERRO” é limitada no intervalo de  $[-30,30]$  lido a partir de uma memória do CLP, ou seja, esse intervalo é o valor digital do erro de posição angular. Esse intervalo convertido para graus equivale a  $[-2.63^\circ, 2.63^\circ]$ . Esses valores atendem ao objetivo principal do controlador de realizar o controle de posição da junta rotativa do manipulador. Depois de realizar a defuzzificação da variável real obtemos a variável Fuzzy ERRO que é descrita por meio de cinco funções de pertinência representadas na Figura 4.2 e definidas da seguinte maneira:

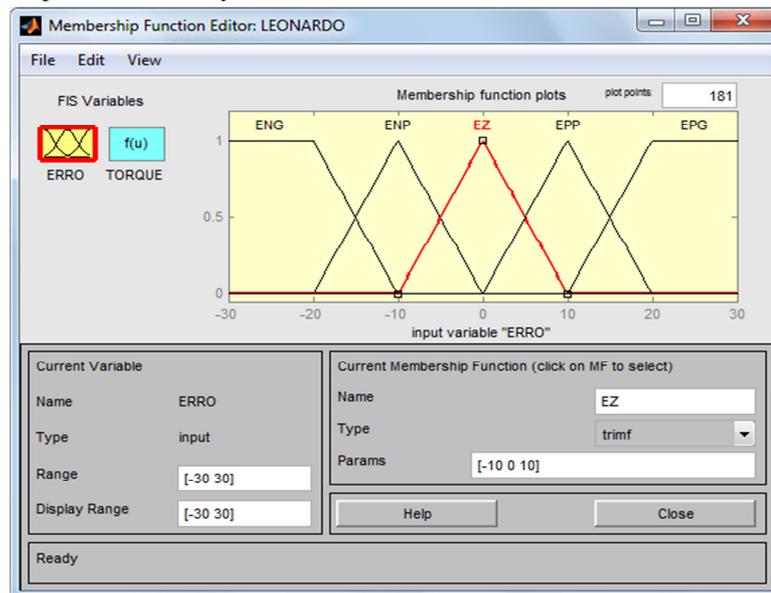
- Erro Negativo Grande (ENG) função trapezoidal;
- Erro Negativo Pequeno (ENP) função triangular;
- Erro Zero (EZ) função triangular;
- Erro Positivo Pequeno (EPP) função triangular;
- Erro Positivo Grande (EPG) função trapezoidal.

Figura 4.1 - Janela inicial para definição das entradas e saídas do controlador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.2- Funções de pertinência Fuzzy da variável de entrada ERRO.



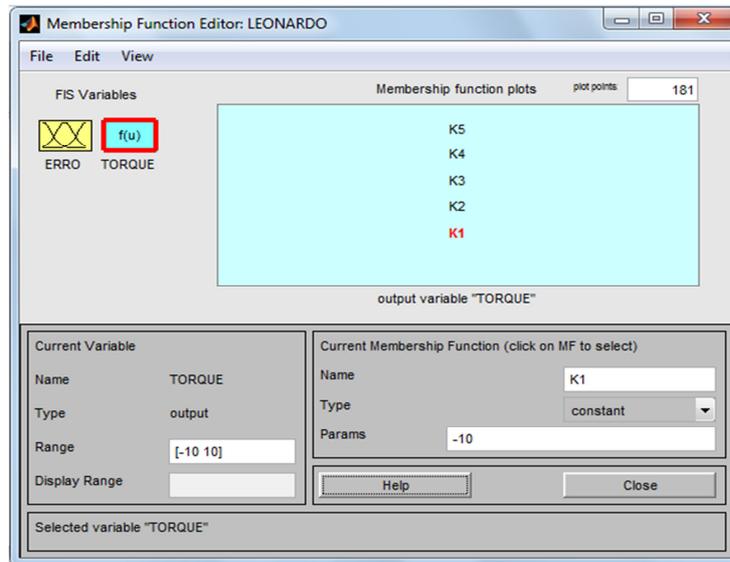
Fonte: Elaborada pelo autor.

A escolha por estes modelos mais simples de funções de pertinência se deve ao fato de que esse controlador foi embarcado em um CLP usando linguagem de programação Ladder. Outro ponto relacionado às funções de pertinência adotadas pelo autor foi a simetria criada próxima da origem e a sobreposição de 50% entre funções vizinhas, isto simplifica o desenvolvimento do controlador Fuzzy na linguagem de programação Ladder do CLP porque como mostrado em (SHAW, 2007) os denominadores na fase de defuzzificação serão unitários e as funções triangulares aproximadas por duas funções lineares.

Para a variável de saída TORQUE gerada por um controlador Fuzzy Sugeno são definidas as constantes  $K1=-10$ ,  $K2=-5$ ,  $K3=0$ ,  $K4=5$  e  $K5=10$ . A Figura 4.3 mostra a tela do *ToolBox Fuzzy* onde as definições (constantes) da variável TORQUE são inseridas. Embora as funções de pertinência da variável de saída sejam constantes neste controlador, são definidas as seguintes variáveis Fuzzy:

- TORQUE Negativo Grande (TNG);
- TORQUE Negativo Pequeno (TNP);
- TORQUE Zero (TZ);
- TORQUE Positivo Pequeno (TPP);
- TORQUE Positivo Grande (TPG).

Figura 4.3- Constantes da variável Fuzzy de Saída TORQUE.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Esse intervalo de  $[-10,10]$  para descrever a variável de saída do controlador Fuzzy se deve ao fato do torque ser descrito por uma saída analógica do CLP que utiliza o sinal de tensão elétrica de 0 a 10 V associada a uma saída a relé que define o sentido de rotação. Quando o controlador Fuzzy calcula uma saída (sinal de controle) no sentido horário de rotação do atuador, este sinal é positivo de 0 a 10 V com uma determinada saída a relé do CLP acionada.

Quando a saída do controlador Fuzzy calcula um sinal negativo, significa uma inversão no sentido de rotação do atuador e o acionamento de outra saída à relé do CLP. Este intervalo adotado  $[-10,10]$  também evita que o atuador venha a saturar e tentar exceder o torque máximo da junta. Para concluir a descrição do projeto controlador Fuzzy, foram adotadas apenas cinco regras. Estas regras são simples, porém, muito satisfatórias para a tarefa de controle de posição.

- Se < EPG > então < TNG >;
- Se < EPP > então < TNP >;
- Se < EZ > então < TZ >;
- Se < ENP > então < TPP >;
- Se < ENG > então < TPG >;

## 4.2 Estabilidade dos controladores baseados em lógica Fuzzy

O estudo da estabilidade em sistemas de controle em malha fechada tem forte interesse acadêmico, muitas técnicas são bem fundamentadas, de forma a se determinar os limites de estabilidade dos controladores convencionais para sistemas lineares e não lineares (GEROMEL, 2011). Porém, com controladores Fuzzy a situação é um pouco diferente. Em termos matemáticos, um controlador baseado em lógica Fuzzy é um mapeamento de um espaço de entrada em um espaço de saída, com as seguintes características:

- Determinismo, as mesmas condições de entrada sempre resultam nas mesmas condições de saída;
- Invariante no tempo, a função que descreve a relação de entrada-saída não se altera com o tempo;
- Não-linear, as variáveis de saída não são combinações lineares das variáveis de entrada.

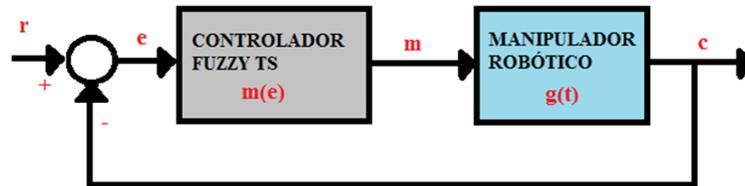
Em Cho (2007) e Bhushan (2013) são apresentadas aplicações em que o controlador Fuzzy tipo Takagi-Sugeno é utilizado para ajustar os ganhos de controladores adaptativos. Nesses trabalhos, a estabilidade é garantida pela aplicação do método denominado método direto de Lyapunov. Em Meza (2012) é proposto um sistema de controle Fuzzy para manipuladores, no qual o controlador Fuzzy é responsável pela sintonia de um controlador PID e a estabilidade desse sistema é garantida também usando o método direto de Lyapunov. Para o manipulador com 2 DOF, esse sistema apresenta estabilidade assintótica semi-global. Em Sifuentes-Mijares (2014) é apresentada um sistema de controle em que controlador PID com os ganhos proporcional e derivativos são sintonizados por um controlador Fuzzy. Neste trabalho, usando o método direto de Lyapunov e o princípio da invariância de LaSalle, é provado que o sistema em malha fechada para um manipulador de 2 DOF apresenta estabilidade assintótica global. Em Santibañez (2004) é apresentado um controlador convencional tipo torque calculado com compensação de gravidade para um manipulador vertical com dois graus de liberdade, com ganhos ajustados por um algoritmo baseado na inferência Mamdani, e a estabilidade é analisada usando a teoria de Lyapunov.

Os trabalhos citados no parágrafo anterior aplicaram o método direto de Lyapunov para garantir a análise de estabilidade do sistema controlado em malha fechada com a estratégia mostrada na Figura 3.12. É importante ressaltar que nessas aplicações o

controlador considerado no cálculo da primeira derivada da função candidata de Lyapunov era o PID clássico, embora com ganhos ajustados pela inferência de um controlador Fuzzy. Nesse tipo de aplicação, os parâmetros do controlador Fuzzy podem ser determinados de forma a garantir a estabilidade (LOPES, 2014). Outra maneira de análise de estabilidade de sistemas de controle Fuzzy é quando o sistema é descrito por modelos locais tipo Takagi-Sugeno e as funções candidatas de Lyapunov são funções Fuzzy definidas por LMIs (ALMEIDA, 2012; TEIXEIRA, 2000).

No sistema de controle Fuzzy desenvolvido neste trabalho, como definido anteriormente, – controlador Fuzzy direto – (ver Figura 3.6), o sinal de controle é gerado a partir da inferência Fuzzy. Portanto, as análises de estabilidade citadas acima não são adequadas. Para análise de estabilidade, neste trabalho, considere-se o sistema de controle com realimentação da Figura 4.4, que possui um bloco não linear (Controlador Fuzzy T-S) de característica  $m(e)$  e um bloco dinâmico linear ou linearizado (Manipulador Robótico) de resposta ao impulso  $g(t)$ . Esta última representa a junta do manipulador de acordo com a equação 2.54.

Figura 4.4- Sistema de Controle Fuzzy.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Chama-se setor  $[0, K)$  à região do plano  $(m, e)$  em que:

$$0 \leq \frac{m(e)}{e} < K \quad (4.1)$$

Portanto, o setor  $[0, K)$  é a região do plano  $(m, e)$  compreendida entre as retas  $m = 0$  e  $m = Ke$  (Ver Figura 4.5). Da teoria de controle de sistemas não lineares um sistema descrito da forma acima tem estabilidade absoluta no setor  $[0, K)$  quando ele apresenta estabilidade assintótica e global para qualquer característica  $m(e)$  unívoca, contínua a trechos e pertencente ao setor  $[0, K)$  (GEROMEL, 2011; AGUIRRE, 2007; CASTRUCCI, 1981). O controlador Fuzzy desenvolvido, neste trabalho, possui essas características, ou seja, possui uma saída contínua e limitada no setor em função do erro. Na Figura 4.6 é possível observar

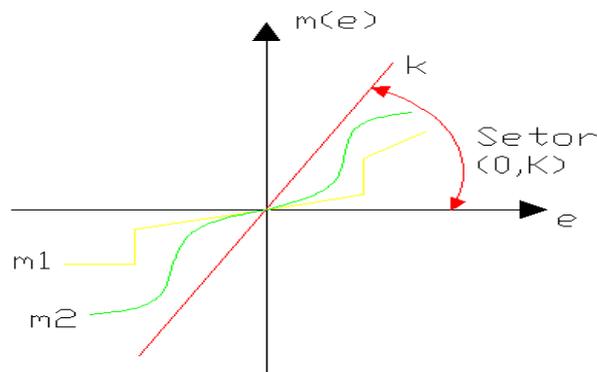
que a resposta do controlador representada pela curva azul e o limite do setor representado pela reta vermelha presente nos quadrantes ímpares e passando pela origem.

Este conceito é inseparável da ideia de robustez, ou insensibilidade da estabilidade do sistema às flutuações da característica não linear, além disso, como implica estabilidade assintótica e global, o conceito exprime robustez ampla, relativamente a condições iniciais e perturbações. Por tudo isso, a estabilidade absoluta é importante em sistemas de controle convencionais e inteligentes. Acresce ainda a vantagem de que existe um critério muito eficiente para exprimir condições suficientes de estabilidade absoluta chamada Critério de Popov (POPOV, 1959), o qual foi adotado neste trabalho.

O critério de Popov oferece uma condição suficiente para a estabilidade absoluta de sistemas do tipo representado na Figura 4.4, sendo que se entende por estabilidade absoluta a garantia de estabilidade assintótica e global do sistema para qualquer que seja a sua não linearidade, desde que ela se encontre dentro do setor para o qual o critério é capaz de fornecer esse tipo de garantia.

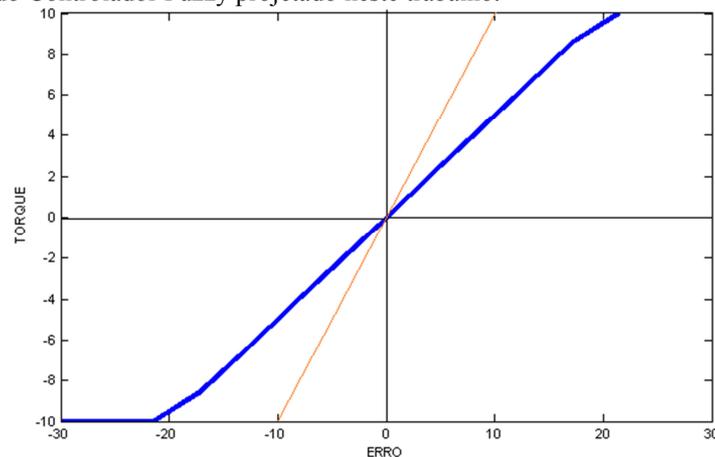
O critério de Popov define o sistema da Figura 4.5, em que a função  $m(e)$  é unívoca e contínua a trechos, definida nos quadrantes 1º e 3º, pertencentes ao setor  $[0, K)$ , e seja o bloco linear estável, isto é, com polos de sua função de transferência  $G(s)$  pertencentes ao semiplano esquerdo aberto. Essa última condição é atendida pela equação 2.54 que é estável pelos critérios de Routh-Hurwitz (alocação de polos) e Nyquist (domínio da frequência) como demonstrado no item 2.6 deste trabalho (LEONARDI, 2011).

Figura 4.5- Setor  $[0, K)$  no plano  $(m, e)$ .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.6- Resposta do Controlador Fuzzy projetado neste trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O critério de Popov foi desenvolvido para análise de estabilidade de sistemas não lineares com requisitos bem definidos. Em Geromel (2011) é demonstrado que para um sistema controlado descrito no espaço de estado com controlador não linear que apresente uma resposta que passa pela origem e se situa no primeiro e terceiro quadrante e, a estabilidade deste sistema é assintoticamente global garantida pelo critério de Popov. Em Castrucci (1981) a demonstração do critério de Popov é realizada de forma geométrica e considerando o sistema controlado no domínio da frequência, embora abordagens diferentes, os dois trabalhos se complementam tanto nas condições necessárias e suficientes para o critério Popov quanto na estabilidade garantida para o sistema em malha fechada.

O trabalho de Furutani (1992) foi pioneiro na aplicação do critério de Popov para garantir a estabilidade absoluta de sistema de controle Fuzzy em malha fechada. Nesse trabalho, os autores também apresentaram o conhecido “*shifted Popov Criterion*” que consiste em um meio termo do critério de Popov e do critério do Círculo para análise de estabilidade de sistemas não lineares. Em Yamashita (1993), o critério de Popov é utilizado para análise da estabilidade de uma malha de controle fechada em que o controlador é do tipo Takagi-Sugeno e a planta linear a ser controlada é definida por uma função de transferência em que o denominador é um sistema de segunda ordem. Além disso, é realizada uma análise do valor máximo e mínimo do parâmetro  $K$ , ou seja, do coeficiente linear da reta de Popov para garantir a estabilidade absoluta do sistema. Outro ponto interessante do critério de Popov é o fato de que necessita apenas de um modelo estável da planta a ser controlada, não necessita, portanto, do modelo matemático do controlador.

Em Zhao (1998) é apresentado o desenvolvimento de um controlador PD Fuzzy para um sistema eletro hidráulico formado por cilindro e válvula proporcional. Nesse

trabalho, a estabilidade absoluta do sistema em malha fechada é garantida pelo atendimento às condições do critério de Popov. Em Choi (2000) é apresentado o projeto e a análise da estabilidade absoluta do controlador Fuzzy genérico de uma entrada e uma saída (SISO) também pelo critério de Popov. Nesse trabalho de simulação, são controlados um sistema de levitação magnético e um pêndulo invertido. Outro ponto desse trabalho é a aplicação da série de Taylor para tornar o sistema controlado do tipo Lur'e (GEROMEL, 2011).

Em Lo (2004) é apresentada uma versão Fuzzy do critério de Popov para tratar saturação do sinal de saída do controlador, nesta versão do critério de Popov, para garantir as condições de estabilidade do controlador Fuzzy, são utilizadas LMI com restrições de convergência. Por sua vez, em Osmic (2008) é apresentado um estudo teórico da estabilidade do controlador Fuzzy tipo Mamdani para um sistema SISO utilizando o critério de Popov. Nele, são analisadas as condições para este controlador apresentar estabilidade absoluta. Em Wu (2008) é apresentado o estudo de estabilidade de um controlador Fuzzy direto (Figura 3.6) utilizando Popov. A estabilidade absoluta é garantida pelo critério de Popov e o sistema controlado é classificado pelo tipo Lur'e (GEROMEL, 2011). Por ser um trabalho de simulação computacional, para validar a metodologia também é feita uma análise no domínio da frequência e traçadas curvas de Popov para as incertezas da planta.

Em Lu (2012) o critério de estabilidade absoluta de Popov é usado para garantir a estabilidade absoluta do sistema SISO de terceira ordem com controlador Fuzzy tipo Takagi-Sugeno. Nesse trabalho, também é feita uma comparação com o critério do Círculo e o critério de Nyquist. Em Kumbasar (2014) um controlador baseado em lógica Fuzzy projetado para um sistema massa mola amortecido tem sua estabilidade absoluta garantida pelo critério de Popov.

Outra característica muito importante do critério de Popov é que assim como o critério de Nyquist, o critério de Popov é uma análise de estabilidade no domínio da frequência. Seja  $P(j\omega)$  uma função complexa da frequência angular  $\omega$ , definida para cada amplitude do setor  $K$ , e cada valor do parâmetro  $q$ :

$$P(j\omega) = (1 + j\omega q)G(j\omega) + \frac{1}{K} \quad (4.2)$$

***Critério de Popov: Uma condição suficiente para estabilidade absoluta no setor  $[0, K)$  é que exista uma função racional  $P(j\omega)$  associada à amplitude  $K$ , com  $q > 0$ , tal que a parte real de  $P(j\omega) > 0$ .*** (4.3)

Seja  $G(j\omega)$  a planta estável do sistema. O critério é formalmente descrito de maneira algébrica e diz que, se existir um número positivo  $q$  que satisfaça a condição expressa em (4.3) para qualquer  $\omega \geq 0$ , então o sistema é absolutamente estável em  $[0, K)$ . Uma prova direta desse importante resultado a partir da teoria de estabilidade de Lyapunov é mostrada em Geromel (2011). No anexo A, deste trabalho, é apresentada a demonstração deste critério baseada em Castrucci (1981).

Também é muito útil a interpretação gráfica do critério de Popov, sejam  $U(\omega)$  e  $V(\omega)$  funções reais tais que:

$$G(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) \quad (4.4)$$

Substituindo (4.4) em (4.2) e (4.3), imediatamente resulta:

$$U(\omega) - q\omega V(\omega) + 1/K > 0 \quad (4.5)$$

Definindo:

$$U^p(\omega) = U(\omega) \quad (4.6)$$

$$V^p(\omega) = \omega V(\omega)$$

Resulta para a condição de Popov (4.3) a expressão:

$$U^p(\omega) - qV^p(\omega) + 1/K > 0 \quad (4.7)$$

$$\text{Mas } U^p(\omega) - qV^p(\omega) + 1/K = 0 \quad (4.8)$$

é a equação das retas do plano  $(U^p, V^p)$ , de declividade  $1/q$ , que contém o ponto  $(0, -1/K)$ . Qualquer delas é denominada **linha de Popov**. A condição do critério de Popov na versão da equação 4.7 impõe simplesmente que a curva  $(U^p(\omega), V^p(\omega))$  do sistema esteja inteiramente à direita de uma linha de Popov. Essa curva é descrita da seguinte forma:

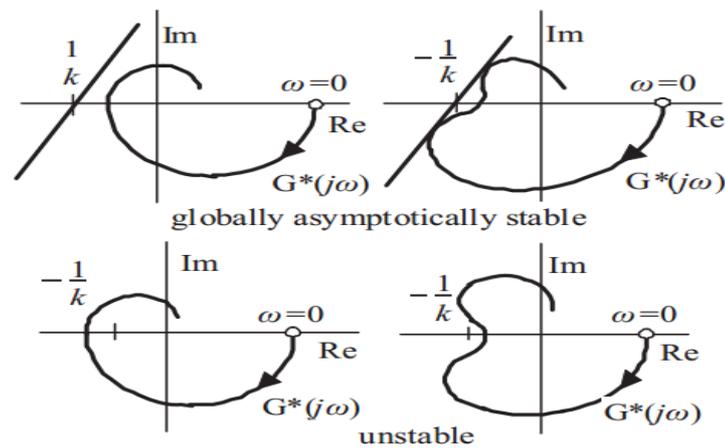
$$G^*(j\omega) = U^p(\omega) + jV^p(\omega) \quad (4.9)$$

A curva descrita pela equação 4.9 também é conhecida como diagrama de Nyquist modificado. O procedimento para determinar o setor de estabilidade absoluta consiste, então, em traçar a reta dada pela equação 4.8 chamada reta de Popov, de tal forma que ela se situe inteiramente à esquerda deste diagrama e que corte a abscissa do plano  $(U^p(\omega), V^p(\omega))$  o máximo à direita possível. A constante que define o setor  $[0, K)$  é dada pelo ponto no qual a reta traçada corta a abscissa, que vale  $-1/K$ . Ao situar a reta à esquerda do diagrama, a validade da inequação de Popov (equação 4.7) é garantida e, ao escolher o valor mais à direita

que satisfaça essa condição, garantimos a maior região de estabilidade absoluta possível. A declividade  $1/q$  da reta de Popov é escolha de projetista do sistema de controle.

Em Svarc (2014) é apresentado um estudo detalhado da interpretação gráfica do critério de Popov. Ele apresenta uma tabela com a interpretação gráfica de diversas funções de transferência que descrevem a parte linear do sistema de controle e também estabelece as relações entre o valor de  $K$  e os coeficientes dessas funções. A Figura 4.7 adaptada de Svarc (2014) mostra a situação para um sistema assintoticamente estável e para um sistema instável. Em Ban (2007) é apresentada a análise de estabilidade de controlador Fuzzy tipo Takagi-Sugeno com funções pertinências triangulares pelo critério de Popov e neste mesmo trabalho é apresentada a relação entre os parâmetros das funções de pertinência e o valor de  $K$ .

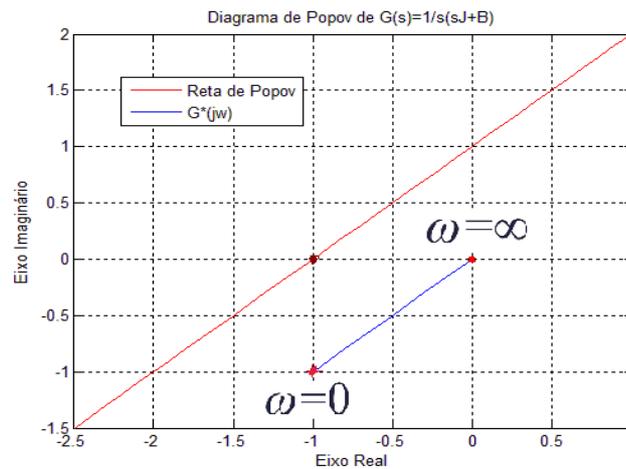
Figura 4.7– Interpretação gráfica do critério de Popov.



Fonte: Svarc, 2014.

Para a função de transferência adotada, neste trabalho, que descreve o controle de posição de uma junta robótica na forma da equação 2.54, a estabilidade absoluta é garantida, pois apresenta as condições exigidas para aplicação do critério de Popov citadas acima. Isso pode ser verificado na representação gráfica do diagrama mostrado na Figura 4.8 em que são mostrados a reta de Popov e o gráfico da resposta em frequência, o qual mostra que a resposta em frequência se encontra totalmente à direita da reta. Portanto, o sistema de controle proposto, neste trabalho, apresenta estabilidade absoluta garantida pelo critério de Popov.

Figura 4.8 – Diagrama de Popov do modelo SISO da junta do manipulador SCARA com acionamento indireto.



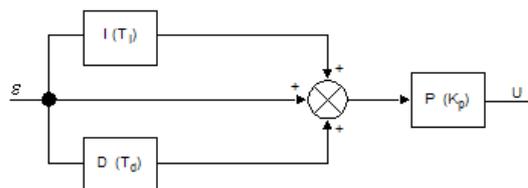
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3 Sintonia do Controlador PID do CLP Twido

Com o objetivo de avaliar de forma mais científica o controlador Fuzzy, ele é comparado com o controlador convencional PID no controle de posição do manipulador SCARA. Considerando cada junta como um sistema SISO, foi programado dois PIDs um para cada junta em cada quadrante de operação do manipulador. Isso se faz necessário porque o PID é sintonizado para um ponto ou região de operação que não apresenta o mesmo desempenho em todo o volume de trabalho do manipulador, limitação deste controlador convencional. Como é mostrado no capítulo 7, o volume de trabalho do manipulador é dividido em dois quadrantes, um positivo e outro negativo. Em cada quadrante foram realizados ensaios de avaliação de desempenho do manipulador. Portanto, no total foram programados quatro PIDs.

O bloco PID embarcado no CLP Twido vem de fábrica com um filtro de frequência passa baixa na ação derivada para tratar as medições ruidosas e um algoritmo de reset para ação integral. A estrutura do PID embarcado no Twido é uma combinação de PID série e PID paralelo como mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Estrutura do controlador PID do CLP Twido.



Fonte: Schneider, 2011.

Em que  $I$  é a ação integral (atua de forma paralela e independe da ação derivativa),  $D$  é a ação derivativa (atua de forma paralela e independe da ação integrativa),  $P$  é a ação proporcional (atua em série com a combinação das ações integrativa e derivativa) e  $U$  é o sinal de controle deste controlador.

Consultando a documentação técnica do CLP (SCHNEIDER, 2011) é descrito que a lei de controle tem a seguinte formulação:

$$u(i) = K_p \cdot \left\{ \varepsilon(I) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=1}^i \varepsilon(j) + \frac{T_d}{T_s} [\varepsilon(i) - \varepsilon(i-1)] \right\} \quad (4.10)$$

Em que  $u(i)$  é o sinal de controle,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $T_i$  é a constante de integração,  $T_d$  é a constante de tempo de derivação,  $T_s$  é o período de amostragem e  $\varepsilon(i)$  é o erro no ciclo atual.

Para programar os blocos PIDs é necessário inserir os ganhos de cada ação de controle. Esse processo é conhecido como sintonia de controladores. Existem muitos métodos de sintonia de controladores PID conhecidos e utilizados na prática de sistemas de controle. O método adotado, neste trabalho, para fazer a sintonia dos controladores PID de cada junta foi o método do *ponto crítico* (AGUIRRE, 2007) e foi desenvolvida uma tela no sistema supervisório para realizar o processo de sintonia.

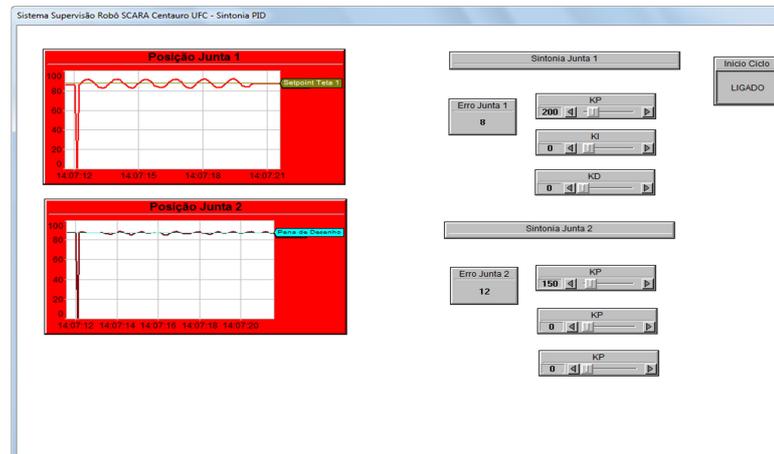
O método do ponto crítico consiste em colocar em funcionamento o controlador PID em malha fechada, com apenas a ação de controle proporcional atuando no processo. Em seguida, o ganho proporcional é aumentado progressiva e lentamente, a certa altura o sistema passa a apresentar uma oscilação sustentada. O mínimo valor do ganho proporcional para o qual essa oscilação surge é chamado ganho crítico da malha de processo  $K_c$  e o período da oscilação observado é denominado período crítico do processo  $T_c$ .

A Figura 4.10 apresenta a tela criada no sistema supervisório para fazer esse processo de sintonia. Nessa tela do supervisório, o autor desenvolveu botões tipo *slider* que permitem alteração do valor de cada ganho direto do supervisório sem necessitar acessar o programa do CLP por meio de tag's tipo PLC do Elipse SCADA associadas a memórias internas do CLP. Também inseriu duas janelas gráficas para acompanhar a resposta de cada junta em malha fechada com o controlador PID. A Figura 4.10 mostrou o momento que as duas malhas começaram a apresentar oscilação sustentada. A Figura 4.11 apresenta a estrutura interna do bloco de função PID e as memórias usadas para gravar os ganhos dos controladores

PID da junta 1. Um bloco idêntico é usado para a junta; 2. A forma como esses blocos são chamados no programa principal é mostrada na Figura 5.7.

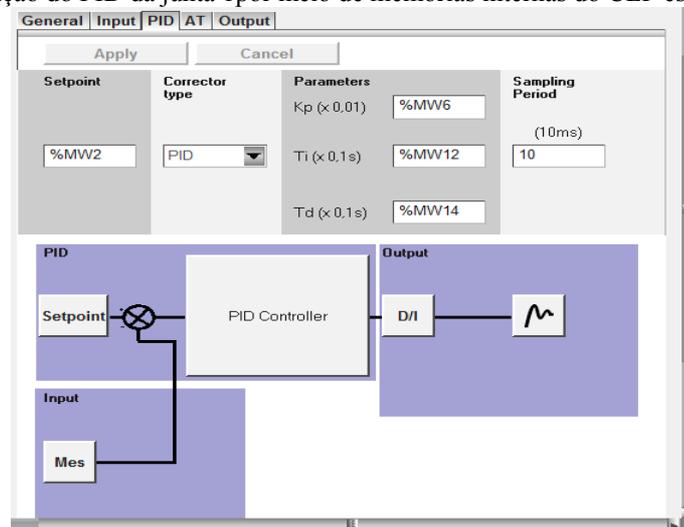
A próxima etapa deste processo de sintonia é a consulta a um quadro para achar os valores de referência dos ganhos, isso porque o quadro é o resultado de trabalho heurístico de tentativa e erro e ainda requer um refinamento nos valores encontrados. O quadro 4.1 apresenta as fórmulas originalmente propostas por Ziegler-Nichols para sintonia dos controladores clássicos. Portanto, a etapa final do processo de sintonia é o ajuste fino dos ganhos encontrados a partir das recomendações de Ziegler-Nichols. Os Quadros 4.2 e 4.3 mostram os ganhos embarcados no CLP por meio do sistema supervisorio para o controle de posição do manipulador, respectivamente para o quadrante positivo e o quadrante negativo.

Figura 4.10 - Supervisorio durante a sintonia dos controladores PID.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.11 - Configuração do PID da junta 1 por meio de memórias internas do CLP escritas em tempo real.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 4.1 – Fórmulas de Ziegler-Nichols.

Tipo de Controlador	$K$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 K_c$	-----	-----
PI	$0,4 K_c$	$0,8 T_c$	-----
PID	$0,6 K_c$	$0,5 T_c$	$0,125 T_c$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.2 – Ganhos dos controladores PID para o quadrante positivo.

Junta do Manipulador	$K$	$T_i$	$T_d$
Junta 1	200	129	46
Junta 2	120	75	13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.3 – Ganhos dos controladores PID para o quadrante negativo.

Junta do Manipulador	$K$	$T_i$	$T_d$
Junta 1	150	84	26
Junta 2	100	73	17

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Controle PID versus Controle Fuzzy

O controlador PID, apresentado no Capítulo 3, considerado como padrão, é comparado com o controlador baseado em lógica Fuzzy em diversos trabalhos. A quase totalidade dos trabalhos consiste em simulações computacionais. Em Bachir (2011) é apresentado um estudo comparativo no qual o desempenho do controle de torque calculado com ganhos ajustados por um controlador Fuzzy é superior ao controle convencional PID para o controle de posição das três primeiras juntas de um robô PUMA 600. Em Ayas (2013) é mostrado uma comparação entre um controlador PID e outro controlador baseado em lógica Fuzzy para controle de posição de manipulador planar. Nesse trabalho de simulação computacional com entrada em degrau e usando como parâmetro de avaliação a integral do erro quadrático, o controlador baseado em lógica Fuzzy apresentou melhor desempenho.

Em Nawrocka (2014) é realizada por meio de simulação computacional a comparação entre o controlador PID clássico e o controlador Fuzzy com três conjuntos de regras diferentes (9, 15 e 25 regras). Os controladores Fuzzy são do tipo Takagi-Sugeno (T-S) simulados com funções de pertinência triangulares e gaussianas com 50% de sobreposição. As simulações mostraram que, para o controle de um robô manipulador, as funções de pertinência triangulares apresentam melhores respostas dinâmicas e que, com um conjunto de 15 regras, o controle Fuzzy apresenta o menor sobressinal e o menor erro em estado estacionário.

Em Bhushan (2014) é apresentada a comparação do controlador PD (variação do controlador PID) e o controlador Fuzzy tipo Mamdani no controle de posição de um robô planar 2 DOF. Por ser um trabalho de simulação, o autor usou funções gaussianas e um conjunto de 81 regras para inferência. Como resultado, o controlador Fuzzy apresentou um desempenho superior em todos os cenários. Em Jaiswal (2014) esta estratégia de controle é aplicada para um manipulador tipo SCARA de 3 DOF, com um conjunto de 25 regras de inferência Fuzzy. O desempenho apresentado foi superior ao PID convencional, mas vale lembrar que, nesse tipo de estratégia de controle, o sinal de controle continua sendo PID, o algoritmo Fuzzy é responsável apenas pela atualização dos ganhos em função do erro e não pelo sinal de controle enviado ao processo.

## 5 SISTEMA DE SUPERVISÃO E ACIONAMENTO DO MANIPULADOR SCARA

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os detalhes técnicos do projeto e implementação do controlador Fuzzy, projetado no Capítulo 4, em um controlador industrial tipo CLP. O sistema de supervisão e acionamento desenvolvido, apesar de orçamento limitado, conta com a tecnologia compatível com a disponível na indústria atualmente, usando ferramentas tecnológicas como sistema de supervisão tipo SCADA, comunicação com protocolo industrial *Ethernet* e *Modbus*, transdutores de posição e *driver's* de acionamento eletrônico tipo inversores de frequência (MORAES, 2007).

O capítulo inicia com uma breve descrição dos motores elétricos e seleção dos inversores de frequência usados em seus acionamentos. Em seguida o controlador industrial CLP utilizado é apresentado, bem como é realizada uma revisão bibliográfica do estado da arte dos CLP's disponíveis no mercado com Lógica Fuzzy embarcada. Também são mostrados detalhes do programa do CLP desenvolvido na linguagem Ladder. O capítulo encerra com uma descrição do sistema de aquisição de dados (sistema supervisório) desenvolvido e a caracterização (curvas dos potenciômetros) dos transdutores de posição utilizados nas juntas do manipulador. Para iniciar este capítulo, a Figura 5.1 mostra de forma resumida o projeto executado; e, no Apêndice B, é apresentado o projeto da bancada onde foi instalado o manipulador. No Apêndice C, é mostrado o circuito elétrico da instalação dos inversores, CLP, potenciômetros e motores elétricos.

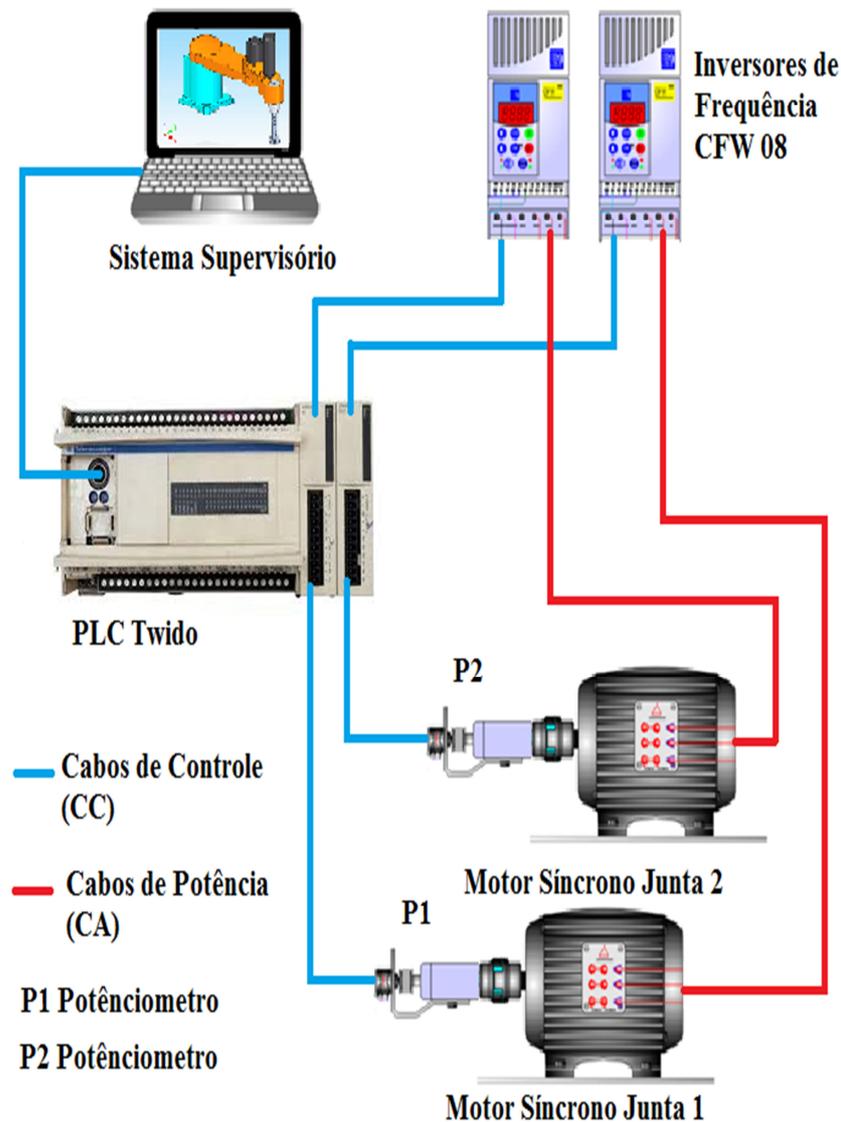
### 5.2 Sistema de Acionamento das Juntas

Por se tratar de um *retrofitting*, o primeiro passo foi identificar os motores elétricos instalados nas juntas e sua forma de acionamento. Era sabido que os motores eram do tipo servo-motores de corrente alternada com driver de acionamento dedicado. Esses drivers foram danificados de forma definitiva restando apenas os motores que são síncronos de ímãs permanentes. Foram realizados dois trabalhos para identificar potência, torque e rotações nominais dos motores. O primeiro trabalho foi um ensaio de bancada apenas com os motores elétricos desacoplados dos sistemas de transmissão das juntas e apresentada à estratégia de acionamento com inversores de frequência (BATISTA, 2014). O segundo

trabalho consiste de uma simulação computacional com o modelo da dinâmica para estimar os torques necessários para execução de trajetórias circulares (BATISTA, 2015).

Os inversores de frequência são dispositivos elétricos que convertem a tensão elétrica da rede alternada senoidal em tensão contínua em um barramento, e finalmente convertem esta última em uma tensão de amplitude e período variáveis para o acionamento dos motores elétricos. Importante ressaltar que, neste trabalho, os motores elétricos são trifásicos e a instalação elétrica do laboratório era uma rede monofásica. Esse detalhe foi fundamental na seleção dos inversores. A Figura 5.2 apresenta o circuito básico de funcionamento dos inversores, sendo que cada inversor de frequência é responsável pelo controle de velocidade e torque de uma junta do manipulador.

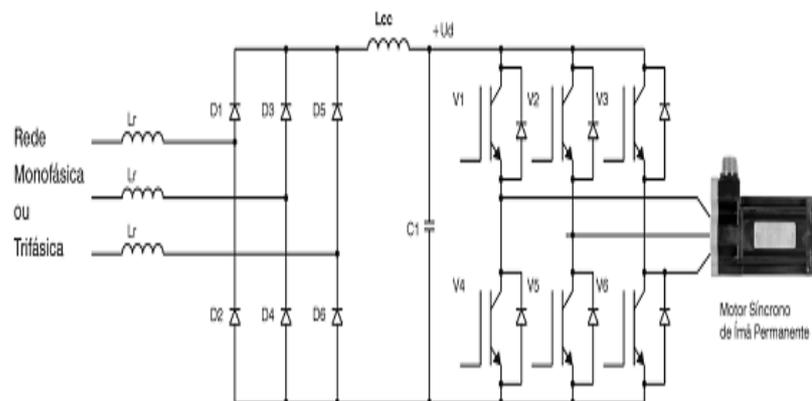
Figura 5.1 – Sistema de Acionamento e Controle das Juntas do Manipulador SCARA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tensão aplicada nos motores elétricos pelos inversores tem como característica realizar o denominado controle vetorial. O controle vetorial consiste em não necessitar de um sinal de realimentação de velocidade (sensor de velocidade como tacogerador ou encoder no eixo do motor) para o inversor. No controle vetorial, a operação do inversor é otimizada para o motor em uso obtendo-se um melhor desempenho em termos de torque e regulação de velocidade. Para que o fluxo no entreferro do motor, e conseqüentemente, a sua capacidade de torque, se mantenha constante durante toda a faixa de variação de velocidade (de zero até o ponto de enfraquecimento de campo) é utilizado um algoritmo sofisticado de controle desenvolvido pelo fabricante do inversor que leva em conta o modelo matemático do motor acionado e as características definidas na programação do inversor (parametrização) pelo usuário (FRANCHI, 2007; WEG, 2003).

Figura 5.2 – Sistema de Acionamento de cada junta (Inversor de Frequência mais Motor Síncrono de Imã Permanente).



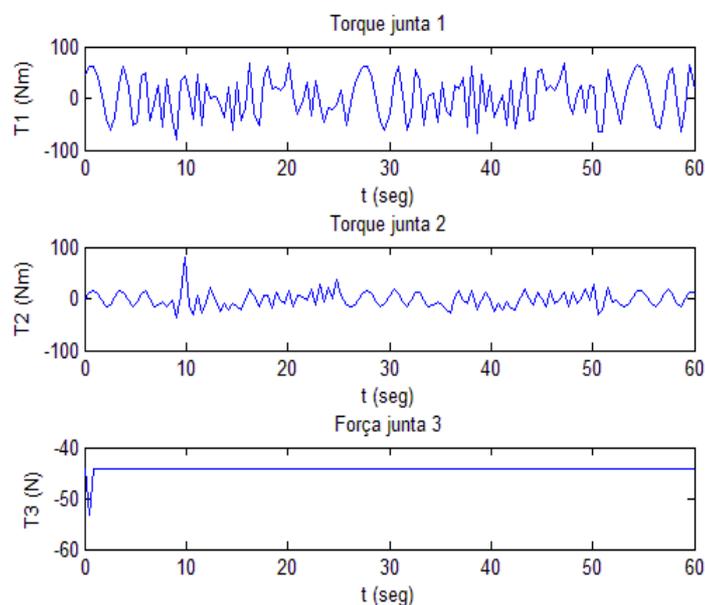
Fonte: Batista, 2014.

Em Batista (2014), esses motores foram modelados no domínio da frequência e o acionamento com inversores de frequência tipo vetorial apresentou as seguintes vantagens: ajuste fino de velocidade, economia de energia, controle de posição e partida suave. Também foram calculados potência e torque nominal dos motores em ensaios de bancada. O primeiro motor com potência nominal de 540 W, rotação nominal 3000 RPM e torque nominal de 17,5 Kgf.cm (1,7 Nm); e o segundo motor com potência nominal de 300 W, rotação nominal 3000 RPM e torque nominal de 9,7 Kgf.cm (0.95 Nm).

Em Batista (2015), partindo do modelo da dinâmica do manipulador SCARA descrito na equação (2.48), é simulada a execução de trajetórias circulares com a velocidade máxima no espaço cartesiano. Em seguida, são calculados os valores dos torques das juntas

$\tau_{junta}$  necessárias para a execução dessa trajetória. A Figura 5.3 apresenta os torques desenvolvidos pelas três primeiras juntas do manipulado para execução de uma trajetória em espiral, estes são uma parte dos resultados deste trabalho. Partindo destes resultados de simulação computacional e conhecendo as relações de transmissão de todas as juntas mostradas no Quadro 2.2 é possível calcular o torque nominal para ser desenvolvido nos atuadores na rotação de 3000 RPM. O primeiro motor com torque nominal de 12,85 Kgf.cm (1,2 Nm) e o segundo motor com torque nominal de 8,05 Kgf.cm (0.80 Nm).

Figura 5.3 - Torques de cada junta.



Fonte: Batista, 2015.

Os dois inversores foram selecionados em função da potência e do torque nominal de cada motor e recursos disponível para aquisição. Os dois inversores são da linha CFW 08 do fabricante WEG Motores Elétricos que desenvolvem controle vetorial de tensão. Para a junta 1 é o modelo CFW080073B com potência nominal 1,6 KW e corrente nominal de saída de 7,3 A; e para a junta 2 é o modelo CFW080026S com potência 572 W e com corrente nominal de saída de 2,6 A, ambos com tensão nominal de saída trifásica 220 V. Os dois inversores são mostrados na Figura 5.4. Portanto, os inversores estão superdimensionados e atendem às demandas dos motores elétricos das juntas.

Neste trabalho, a parametrização dos inversores foi realizada com o objetivo de reduzir os tempos de aceleração e desaceleração e manutenção do torque nominal em baixa rotação, características estas que são fundamentais para o controle de posição de uma junta robótica (NIKU, 2014). O conhecimento do modelo da dinâmica de cada junta também foi

importante para parametrizar o inversor, pois características de aceleração e desaceleração foram identificadas em simulações computacionais (BATISTA, 2015). Para realizar a parametrização dos inversores é necessário que o usuário entre com as informações relativas ao motor utilizado (dados de placa) nos parâmetros P399 a P407 e acione a rotina de auto-ajuste (fazendo P408=1), que o inversor se autoconfigura para a aplicação em questão e está pronto para funcionar de maneira otimizada (WEG, 2003). Além desse procedimento, foi necessário parametrizar as entradas digitais do inversor para definir o sentido de rotação e também a entrada analógica do inversor para receber o sinal de controle do algoritmo Fuzzy desenvolvido no CLP.

### 5.3 Controlador Lógico Programável (CLP)

O CLP é um equipamento composto de componentes eletrônicos e memória programável que contém dados e programas de fábrica com a finalidade de ler e executar instruções, interagindo com um sistema que deve ser controlado por dispositivos de entrada e saída do tipo digital ou analógico. O aspecto interessante do CLP é que ele pode ser programado e utilizado por usuários sem um grande conhecimento de computação. Geralmente é um pequeno *hardware* projetado para trabalhar em ambiente industrial com variação de temperatura, umidade, vibrações, distúrbios elétricos e outras variantes que existem no ambiente industrial (PRUDENTE, 2007; PRUDENTE, 2010).

É o equipamento mais usado no mundo para controle e automação industrial. As características do controlador industrial tipo CLP são definidas na Norma IEC 61131-1 (MORAES, 2007). Em função das razões citadas acima e para garantir um elo entre indústria e pesquisa, foi adotado um CLP como controlador do manipulador robótico e embarcado no mesmo um algoritmo Fuzzy para controle de posição. O CLP usado neste trabalho é da série Twido modelo TWDLCAE40DRF com duas expansões analógicas, modelo TM2AMM6HT, fabricado pela Schneider Electric, mostrado na Figura 5.4 (Nessa figura também é mostrada a fonte de tensão do sistema de visão artificial que foi instalado na célula, mas não é abordado neste trabalho). É um CLP de médio porte com conversor analógico/digital de 12 bits, portanto a leitura da variável analógica varia de 0 a 4095. Trabalhando-se com sinal analógico de tensão elétrica de 0 a 10 V apresenta resolução de 2,44 mV/bit.

É importante citar que os fabricantes de CLP para o mercado da automação industrial vem tentando, há mais de duas décadas, desenvolver CLP's com lógica Fuzzy. Em

1995, na Alemanha, foi lançado um controlador digital chamado *Fuzzy PLC*, esse equipamento era um CLP programado de fábrica com entradas limitadas para executar o controle Fuzzy tipo Mamdani. Em Altroch (1996), já são citadas as primeiras aplicações industriais desse controlador, são elas controle de lança de guindaste, controle de chama em plantas de incineração, controle de dosagem em plantas de tratamento de água, controle de robôs móveis em inspeção de tubulações, controle de temperatura em injeção plástica, climatização de ambientes e controle do ângulo do rotor de turbinas eólicas. Na mesma década, um controlador Fuzzy foi desenvolvido pela Omron PLC para controlar a potência de reatores em usinas nucleares (PÉREZ, 2014). Porém, esses produtos não se estabeleceram no mercado, principalmente em função da complexidade de sua programação e a especificação de sua aplicação.

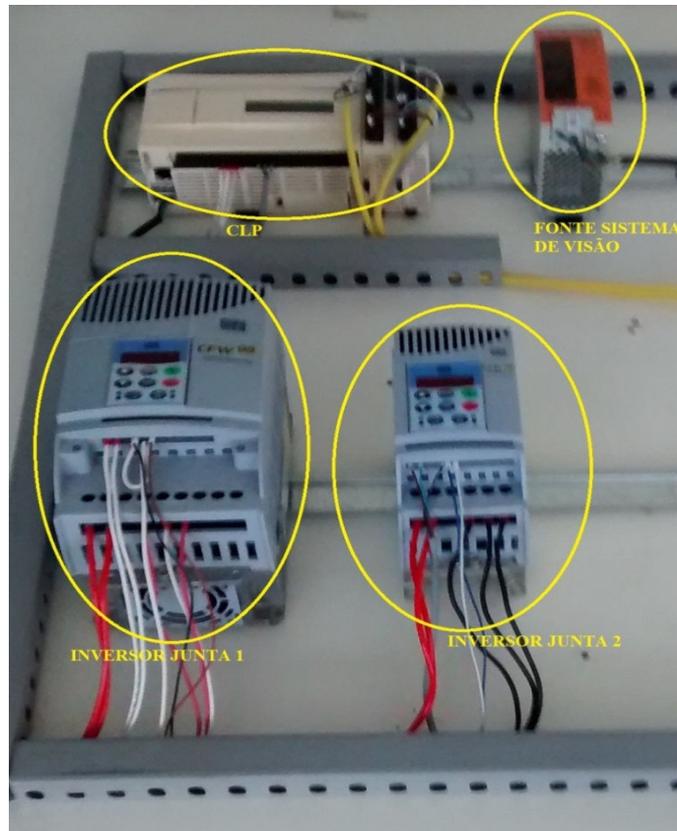
Em Körösi (2011) e Duka (2012), é apresentado o estado da arte da lógica Fuzzy embarcada em CLP's. Nesses trabalhos, que são uma espécie de tutorial para programadores, são analisados os CLP's das seguintes marcas **Siemens Automation** e **Rockwell Automation**. O pacote da Siemens para desenvolver controladores Fuzzy é o *Fuzzy Control++* (mostrado na Figura 5.5) e não são todos os CLP's da marca que executam as funções desse pacote, apenas os CLP's a partir da linha S7-200. O pacote da Rockwell Automation é *Fuzzy Designer* (mostrado na Figura 5.6) está disponível em CLP's a partir da linha RSLogix 5000. Quando comparados com a interface do *ToolBox Fuzzy Logic* do Matlab® fica claro que as interfaces dos CLP's ainda precisam melhorar em aspectos como definição de função de pertinência, visualização de conjuntos e métodos de defuzzificação.

Em Kocian (2011a) e Kocian (2011b), são apresentados o projeto e a instalação de um controlador Fuzzy embarcado em CLP da marca Siemens, usando o pacote de desenvolvimento de controladores Fuzzy Control++. Além disso, usa-se a estratégia de controle apresentada na Figura 3.10 onde o controle Fuzzy faz a sintonia fina adaptativa dos ganhos do controlador PID que gera o sinal de controle. E também é apresentado um sistema de aquisição de dados desenvolvido em um sistema SCADA para análise de resultados.

Em Tibaduiza (2011), é apresentado o projeto e simulação da lógica Fuzzy como ferramenta de controle de posição para cada uma das juntas de um robô tipo PUMA, usando o modelo cinemático. O Matlab® é usado para resolver a cinemática e o controle Fuzzy de uma entrada (Erro) e uma saída (Rotação) e seis regras são implementadas em um CLP. Em Tomas (2013) também é apresentado o controle embarcado em um CLP da Siemens e usando o

pacote da empresa. O controle de um manipulador virtual 3 DOF, usando Joystick para controle no espaço de tarefa.

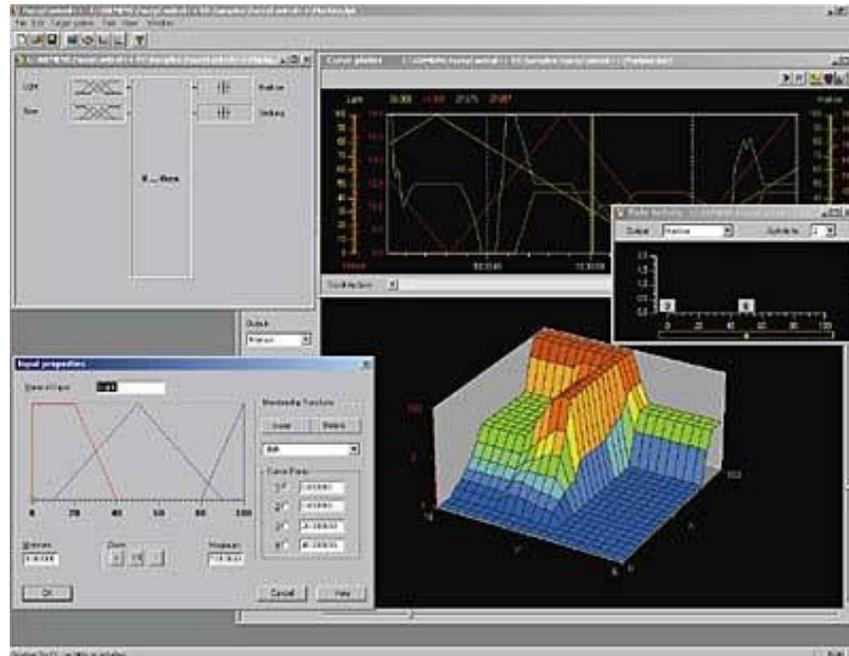
Figura 5.4 – Bancada desenvolvida para acionamento do manipulador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em Pérez (2014), é apresentado o controle de velocidade de um servo motor didático, usando o CLP S7-200 e o pacote da Siemens. O controlador Fuzzy é do tipo Mamdani e a simulação do sistema usa o Simulink® do Matlab®. As variáveis de entrada são o erro e sua derivada e a variável de saída é o torque enviado ao servo-motor por um sinal de controle do tipo *Pulse Wave Modulation* (PWM). Em Hanying (2015), um controlador Fuzzy PID é embarcado em um CLP S7-200 da Siemens, utilizando um pacote da própria empresa. O autor usa o método de Mamdani para defuzzificação. Nela, o controlador Fuzzy é responsável pelo ajuste fino dos ganhos do PID. Os resultados mostram um bom desempenho sem uma descrição da planta controlada.

Figura 5.5 – Ambiente de projeto do *Fuzzy Control++* da Siemens Automation.

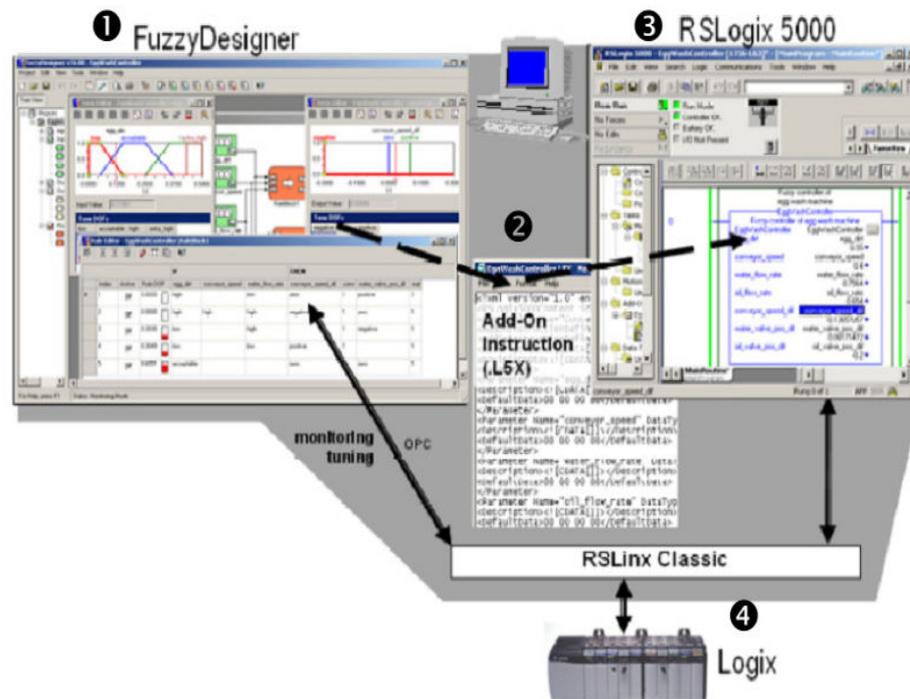


Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente, os grandes fabricantes de CLP que possuem em sua linha de produtos CLP's com blocos Fuzzy ou pacotes de *software* que permitem desenvolver controladores Fuzzy exigem altos investimentos para aquisição destes produtos. A capacidade destes CLP's com Fuzzy variam de uma a oito entradas e de uma a quatro saídas, em que cada entrada e saída pode ser representada por, no máximo, sete funções de pertinência. Também é possível projetar conjuntos de regras com até 128 regras usando todas as entradas com funções *and* e *or*. Outra característica dos CLP atuais é que os pacotes de desenvolvimento estão focados no controlador Fuzzy tipo Mamdani.

Quando o programador não tem recurso para aquisição de um pacote de desenvolvimento do fabricante do CLP ou o fabricante não fornece o pacote por não ter desenvolvido, o programador que desejar trabalhar com lógica Fuzzy terá que implementar o controlador baseado em lógica Fuzzy na linguagem de programação do CLP a partir das definições básicas de fuzzificação, máquina de inferência e defuzzificação. Neste trabalho, é justamente essa lacuna que é preenchida, ou seja, utilizando um CLP simples sem funções especiais para lógica Fuzzy é embarcado por meio da programação em linguagem Ladder um algoritmo de inferência Fuzzy proposto, tipo Sugeno de ordem zero.

Figura 5.6 – Ambiente de projeto do *Fuzzy Designer* da Rockwell Automation.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 5.4 Programação do Controlador Lógico Programável (CLP)

O programa foi desenvolvido pelo autor na linguagem de programação denominada Ladder. Inicialmente, é realizada a leitura das entradas analógicas do CLP. O sinal que chega nessas entradas vem de dois potenciômetros (transdutores de posição nesse trabalho) que são gravados em memórias da classe *word* de 12 bits. Esses potenciômetros são alimentados com 10 V a partir das saídas analógicas. Na Figura 5.7, é mostrada uma parte do programa Ladder, as linhas de programa mostram a alimentação dos potenciômetros e fazem as leituras das posições.

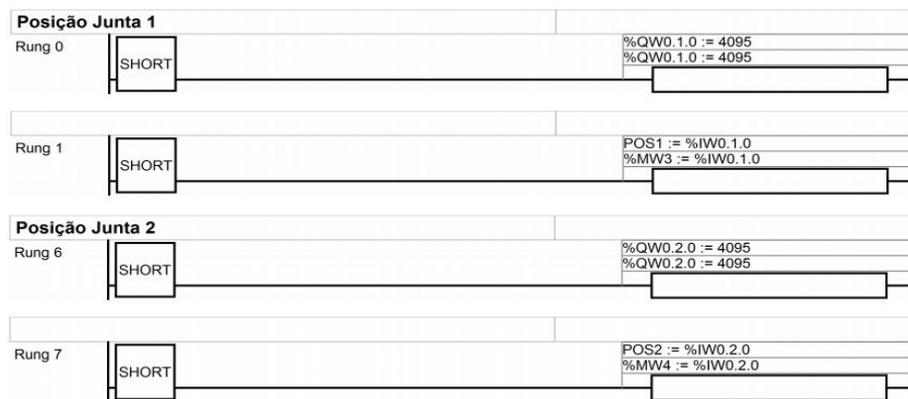
Para implementar o controlador PID, foram utilizados blocos de funções especiais da linguagem Ladder embarcados pelo fabricante do CLP e descritos no Capítulo 4 deste trabalho. Na Figura 5.8, são mostradas as linhas do programa em que esses controladores são chamados e seus parâmetros para executar o controle de posição do manipulador no quadrante positivo. A programação é semelhante para o quadrante negativo.

Foram desenvolvidos dois programas em Ladder um para o controlador Fuzzy e outro para o controlador PID, ambos com as mesmas entradas e saídas. Na etapa de

programação das funções dos controladores, principalmente sintonia do PID, ocorreram algumas colisões entre os elos das juntas e os suportes dos potenciômetros. Como não estavam disponíveis fins de curso mecânicos para evitar essas colisões, foram inseridos dois mecanismos de segurança.

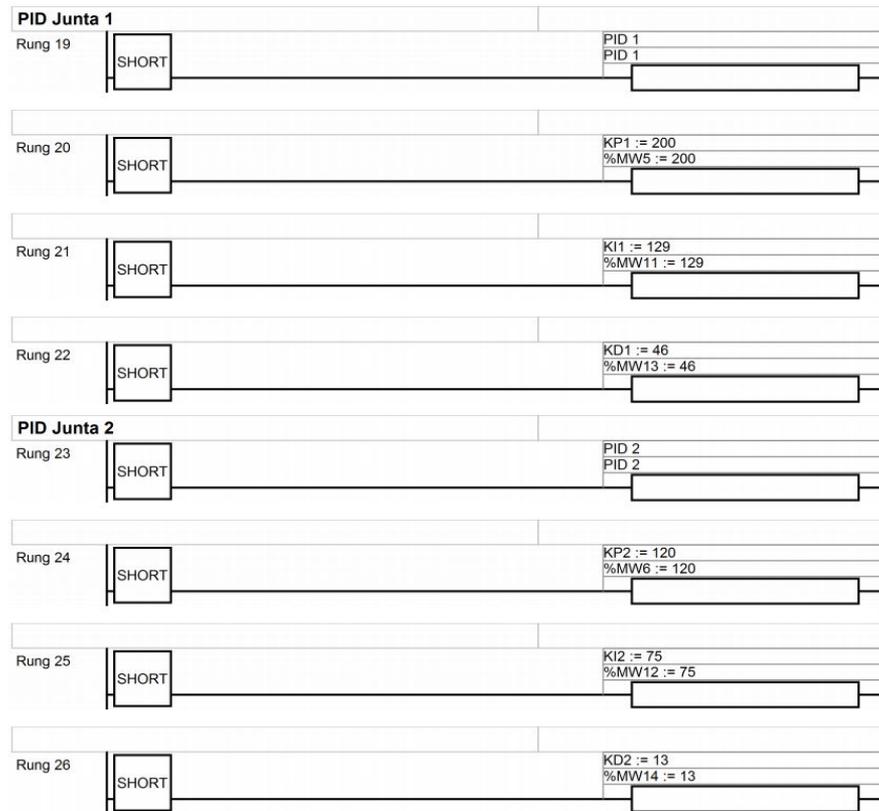
O primeiro foi a instalação de contatores que liberam o acionamento dos motores somente quando o operador aciona um botão físico instalado na bancada ou um botão virtual “início do ciclo” na tela do sistema supervisor. O segundo mecanismo de segurança foi à programação do fim de curso em software como mostrado na Figura 5.9. Na prática, esse fim de curso reduziu o limite de deslocamento de cada junta, que inicialmente era de  $[-90^\circ, 90^\circ]$  passou a ser de  $[-89^\circ, 89^\circ]$ , caso a posição da junta saia deste range o programa para o movimento e aguarda um novo comando do operador.

Figura 5.7 – Leitura da posição das juntas.



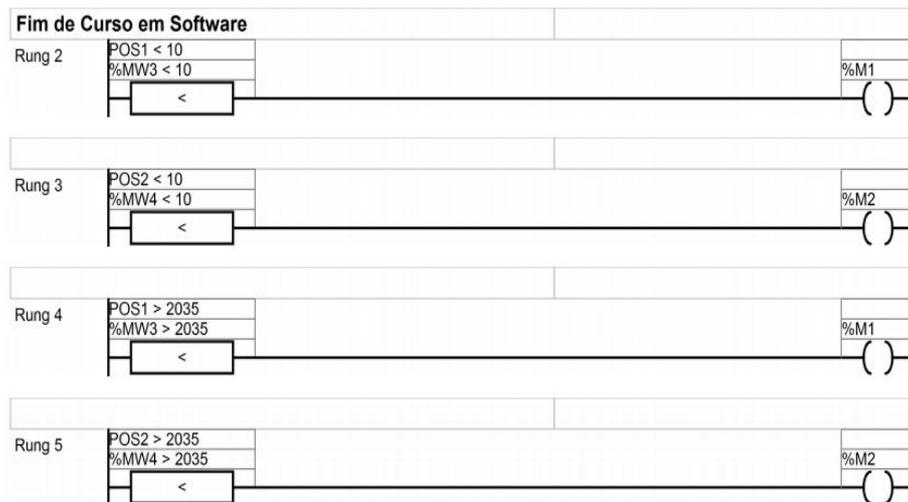
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.8- Chamada dos controladores PID e seus parâmetros.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.9-Fim de curso na linguagem de programação Ladder.



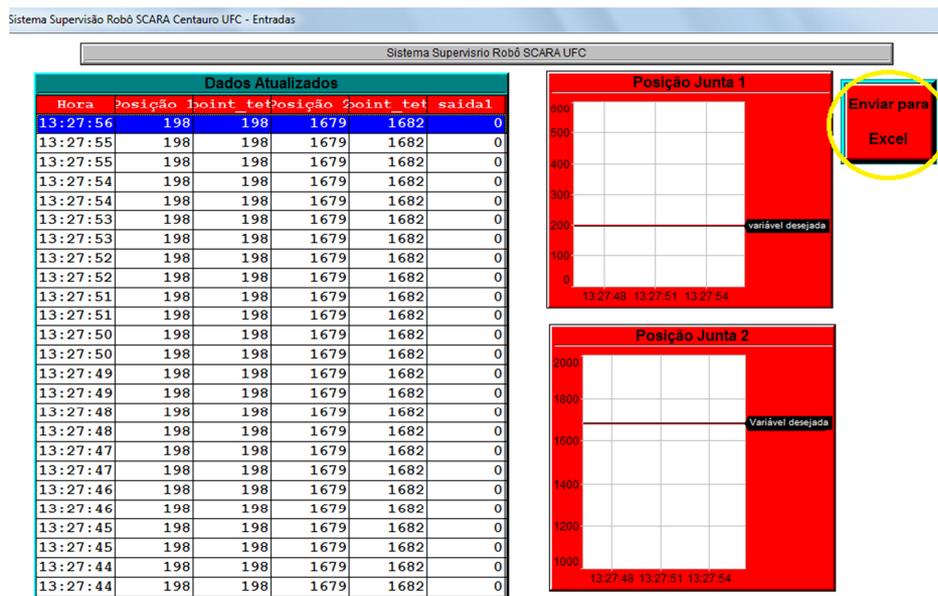
Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema SCADA ou sistema supervisório consiste na aplicação responsável pela coleta e transferência de informações lógicas e analógicas sobre o estado corrente do sistema, pela exibição desses dados na tela de um computador e pelo comando remoto de dispositivos (automaticamente ou por iniciativa do operador). O sistema SCADA, deste trabalho, consiste em uma aplicação desenvolvida para controlar e registrar as leituras dos transdutores que realizam a medição dos ângulos das juntas e supervisão dos controladores Fuzzy e PID embarcados no CLP, além de funcionar como servidor OPC para comunicação com o gerador de trajetória no Matlab®. A comunicação entre o CLP e o computador em que é executado o supervisório é estabelecida via Ethernet e por meio de cabo par trançado com blindagem.

Foi utilizada uma versão gratuita do software Elipse SCADA® e a tela principal pode ser vista na Figura 5.10. Os objetos da tela principal são uma planilha (histórico de posições) na qual os valores de referências (setpoints) e os valores medidos pelos transdutores são gravados a uma taxa de 100 ms, dois gráficos de tendência em que é possível observar o comportamento do erro em cada junta, um botão para mudar de tela e um botão para exportar os dados da operação para uma planilha eletrônica. As telas secundárias são para monitorar saídas analógicas e para sintonia dos controladores PIDs (Ver Capítulo 4).

Figura 5.10 - Tela principal do Sistema SCADA desenvolvido.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Determinar o deslocamento angular de eixos em rotação é uma constante em diversas aplicações, seja no setor veicular, aeronáutico ou na engenharia biomédica, como na caracterização de movimento de membros do corpo humano e, neste trabalho, consiste em determinar a posição angular da junta rotativa de um manipulador robótico. O manipulador originalmente utilizava *encoders* para medição dos ângulos das juntas, porém no *retrofitting* esses encoders foram substituídos por potenciômetros. A utilização de potenciômetros neste trabalho se deu devido a sua disponibilidade em laboratório. Para garantir que as medições dos ângulos eram em torno do eixo de rotação de cada junta, foram fabricados suportes para os potenciômetros serem fixados no braço robótico, como mostrado na Figura 5.10; portanto, uma medição direta dos ângulos das juntas.

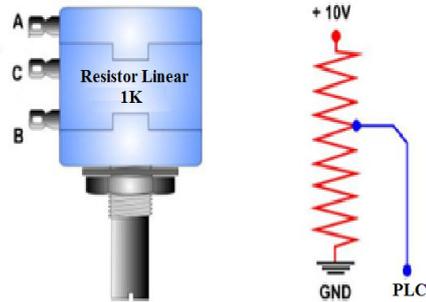
Os potenciômetros proporcionam a forma mais simples de sensoriamento de posição. Instalados a uma configuração tipo ponte de *Wheatstone* nos cartões analógicos do CLP; nesse circuito, uma variação de posição da junta gera um desbalanceamento de tensão proporcional à posição do eixo de rotação da junta (ver Figura 5.12). Dificuldade com resolução, linearidade e suscetibilidade ao ruído limitam o seu uso nos manipuladores industriais (CRAIG, 2012). Neste trabalho, o transdutor de posição de cada junta consiste de um potenciômetro rotativo de  $1K\Omega \pm 1\%$  com sinal de saída linear. Essa linearidade foi verificada de forma experimental num ensaio, no qual foi levantada a curva *ângulo da junta x saída analógica* em toda faixa de medição. Embora de fabricantes diferentes, os potenciômetros utilizados (Figura 5.13) apresentaram um comportamento linear em toda a faixa de medição dos ângulos das juntas.

Figura 5.11 – Suportes de Fixação dos potenciômetros.



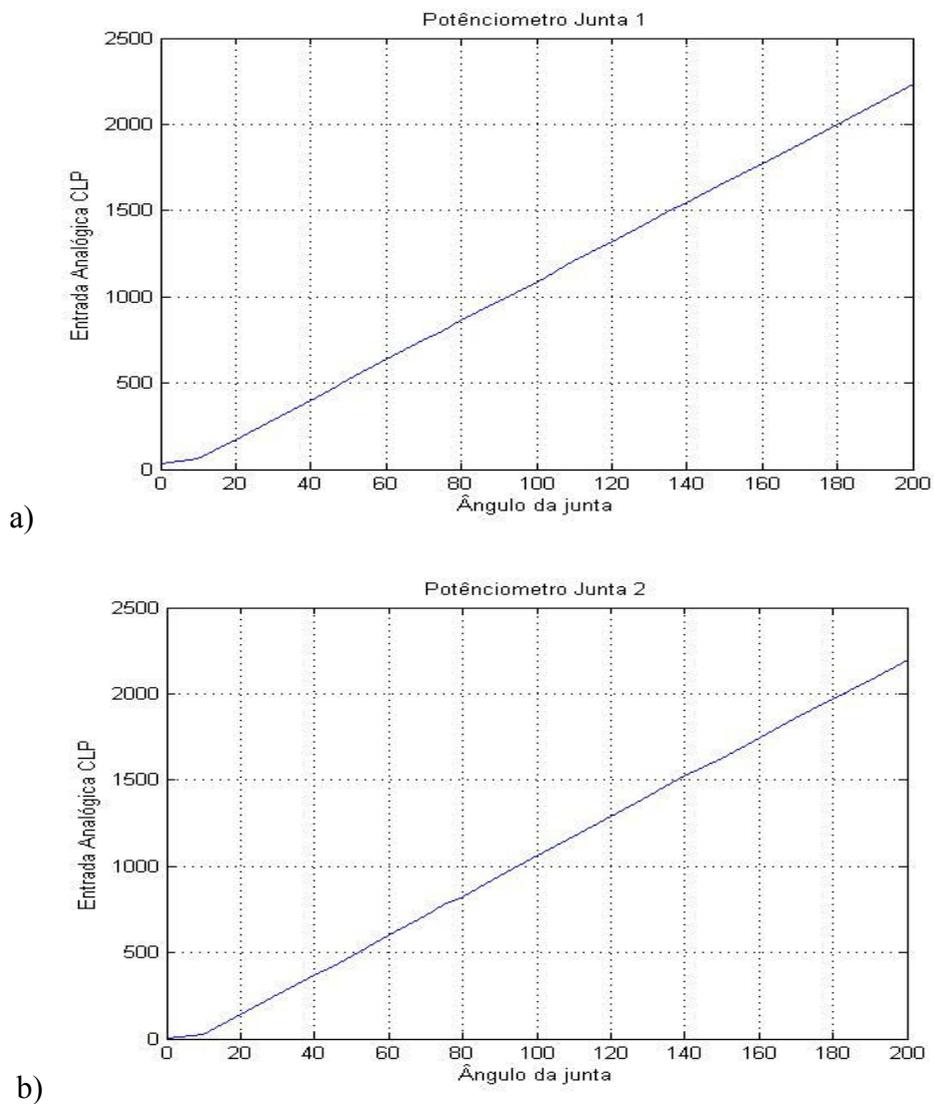
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.12 – Transdutor de posição (potenciômetro).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.13 – Comportamento dos Transdutores de posição das juntas. a) Potenciômetro da Junta 1. b) Potenciômetro da Junta 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro ponto importante para os potenciômetros são as conversões realizadas nos valores de suas medições. Considerando que o potenciômetro tem uma variação de posição angular de 0° a 360° de posição angular da junta e que a tensão de entrada do potenciômetro é de 10V, tem-se a seguinte resolução 27,78 mV/°. Também é importante citar que o CLP é um controlador digital com conversor Analógico/Digital em sua entrada analógica. O range de medição da entrada analógica é de 0 a 4095, valores acima ou abaixo destes implicam em saturação da entrada, considerando que a junta tem um range de deslocamento [-90°, 90°]. É necessária a equação 5.1 para conversão de valores digitais em ângulos de junta:

$$\theta = 0,087 * B - 90 \quad (5.1)$$

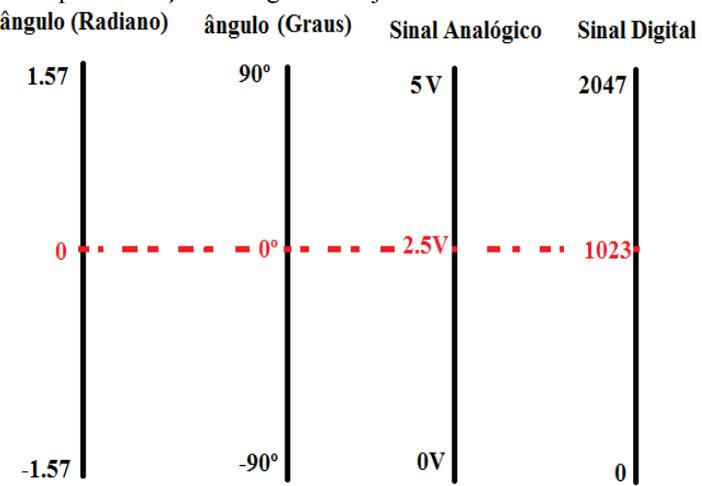
Em que  $\theta$  é o ângulo da junta em graus medido pelo potenciômetro e B é o valor digital do ângulo da junta na memória interna do CLP. Outra conversão ocorre com o sinal do potenciômetro, para calcular a cinemática direta e inversa no gerador de trajetória no Matlab® foi utilizada a medição dos ângulos em radiano. Sendo necessária a conversão dos valores digitais de ângulos para ângulos em radiano. A equação 5.2 faz esta conversão:

$$\pi = 0,0015 * B - 90 \quad (5.2)$$

Em que  $\pi$  é o ângulo da junta medido em radiano. A Figura 5.14 mostra as várias unidades usadas para medição de ângulos neste trabalho. Observando os limites e a proporcionalidade por meio de uma simples interpolação numérica é possível converter um ângulo medido em qualquer unidade para outra.

Neste capítulo, foi apresentado o sistema de acionamento das juntas (motores e inversores) e o sistema supervisório desenvolvido para programação e operação do manipulador SCARA. Foram apresentados detalhes do programa desenvolvido em Ladder para os controladores Fuzzy e PID embarcado no CLP TWIDO. Também foram apresentados os potenciômetros e suas principais características como transdutor de posição angular. No próximo capítulo, será apresentada a norma ISO 9283 que trata dos critérios e métodos para avaliação de desempenho dos manipuladores industriais, essa norma será adotada e norteará os experimentos desenvolvidos com o manipulador SCARA neste trabalho.

Figura 5.14 – Escalas usadas para medição de ângulos das juntas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

### 6.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentada a norma ISO 9283 que trata da avaliação de desempenho de manipuladores industriais. A principal referência, deste capítulo, é Romano (2002) e as publicações da própria ISO. Nele, definem-se os parâmetros imprescindíveis para se quantificar a eficácia com que um manipulador executa uma tarefa. É apresentada uma orientação para a seleção das características de desempenho a serem ensaiadas para algumas aplicações dos manipuladores. Adicionalmente, descrevem-se os procedimentos para a realização de testes comparativos entre robôs diferentes e indicam-se os métodos de medição recomendados pelas normas para a avaliação de desempenho. Além disso, são descritos os detalhes e convenções adotadas para realização dos ensaios recomendados pela norma no laboratório Centauro, principalmente escolha do cubo de ensaio inserido no volume de trabalho do manipulador, e a interpolação no espaço das juntas.

A avaliação de desempenho à luz de uma norma internacional adotada por fabricantes no mundo inteiro é fundamental para validar o controlador Fuzzy projetado e a célula de manufatura desenvolvida. Neste trabalho, no qual o manipulador passou por um processo de *retrofitting* esta avaliação se torna mais necessária porque apenas depois da avaliação e com os parâmetros de acurácia e repetibilidade mensurados será possível identificar as tarefas que o manipulador estará apto a realizar.

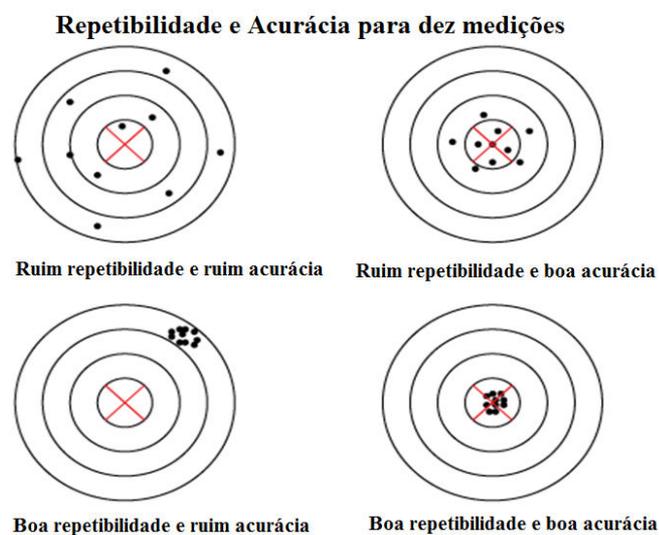
### 6.2 Avaliação de Desempenho de Manipuladores Robóticos

A avaliação de desempenho de um manipulador industrial tem como objetivo verificar a capacidade do manipulador desenvolver as funções para as quais foi construído. Com uma avaliação de desempenho pretende-se ter uma medida da eficácia do manipulador na realização de suas tarefas. Neste capítulo, após definir os parâmetros utilizados para quantificar a eficácia com que um manipulador executa uma tarefa, destaca-se a importância e a utilização da avaliação de desempenho, descrevem-se as características para esta avaliação estabelecidas em normas internacionais e condições de avaliação adotadas.

Uma medida da eficácia com que um manipulador realiza os movimentos inerentes a uma tarefa é a *acurácia* com que esses movimentos são realizados. Como os

manipuladores industriais desenvolvem movimentos repetitivos, outra medida importante é sua *repetibilidade*, ou seja, sua capacidade de repetir o mesmo movimento para um número determinado de repetições do mesmo comando. Além disso, o comportamento do manipulador durante seus movimentos, ou seja, seu desempenho dinâmico, também é uma informação importante para avaliar sua eficácia na execução de uma tarefa. Esses conceitos de acurácia e repetibilidade são apresentados de forma comparativa na Figura 6.1 e fica evidenciado que embora sejam variáveis relacionadas devem ser avaliadas separadamente.

Figura 6.1 – Representação da Acurácia e da repetibilidade do posicionamento do efetuador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio da Figura 6.1 fica claro porque a repetibilidade é mais importante que a acurácia. Isso porque, na maioria dos casos de ruim acurácia e boa repetibilidade, por meio de um fator de correção ou compensação no sistema de medição, é possível reverter a ruim acurácia em boa acurácia. Isso é muito comum em máquinas CNC (SILVA, 2002). Por outro lado, uma ruim repetibilidade não pode ser compensada por apresentar um comportamento aleatório. Isso parece ser o motivo que explica porque em uma consultada aos catálogos técnicos e publicações comerciais dos fabricantes dos robôs industriais, percebe-se que não é dada tanta importância à acurácia. Isso mostra que para os manipuladores a acurácia não é um parâmetro crítico, porém é fundamental no cálculo da repetibilidade a determinação da acurácia (CONRAD, 2000).

Portanto, pode-se dizer que a avaliação de desempenho de um manipulador é a verificação da sua acurácia, repetibilidade e de seu desempenho dinâmico no

desenvolvimento de uma tarefa. Além disso, comparando os respectivos desempenhos pode-se selecionar o manipulador mais apropriado para uma tarefa. A avaliação de desempenho pode auxiliar ainda na escolha entre manipuladores de diferentes fabricantes, sempre que é possível comparar as avaliações realizadas por eles.

As informações das avaliações realizadas pelos fabricantes podem estar alteradas e avaliar o manipulador no seu local de instalação é fundamental. Em Brethe (2005), é investigada a repetibilidade de um manipulador Kuka. Os autores calculam a repetibilidade em diferentes pontos do volume de trabalho do manipulador usando ferramentas estatísticas. Não é detalhada a forma de aquisição dos dados, mas é observada uma alta variação das medições e a repetibilidade apresenta um valor pouco abaixo da especificação pelo fabricante do robô. Em Ismail (2008), é apresentada a avaliação de um manipulador FANUC Arc Mate 100i com controlador original de fábrica e usando um sistema de aquisição de dados externos (acelerômetros e giroscópios) e mesmo com a instrumentação de sensores óticos de alta resolução é encontrada diferença entre a acurácia e a repetibilidade indicada pelo fabricante e a calculada em laboratório.

Para realizar a avaliação de desempenho também é fundamental definir a resolução do manipulador. Resolução é a menor mudança de posição possível que o robô pode realizar ou que seu sistema de controle pode perceber. Essa resolução é dividida em dois tipos: resolução do programa e resolução do controle. Resolução do programa é a menor mudança de posição permitida pelo programa de controle do robô, também conhecida como *Basic Resolution Unit* (BRU). A resolução do controle é a menor mudança de posição que o dispositivo sensor consegue captar. Para um encoder de 1000 pontos por rotação é de  $0,36^\circ$ . Neste trabalho, a resolução do sistema de medição é de  $0,08^\circ$ , esse cálculo foi realizado considerando a precisão do potenciômetro de  $27,78 \text{ mV}^\circ$  e o menor valor lido na entrada analógica do CLP que é de  $2,5 \text{ mV}$ . Porém, devido ao uso das saídas digitais a relé para o acionamento dos atuadores, a menor mudança de posição possível é de  $0,16^\circ$ .

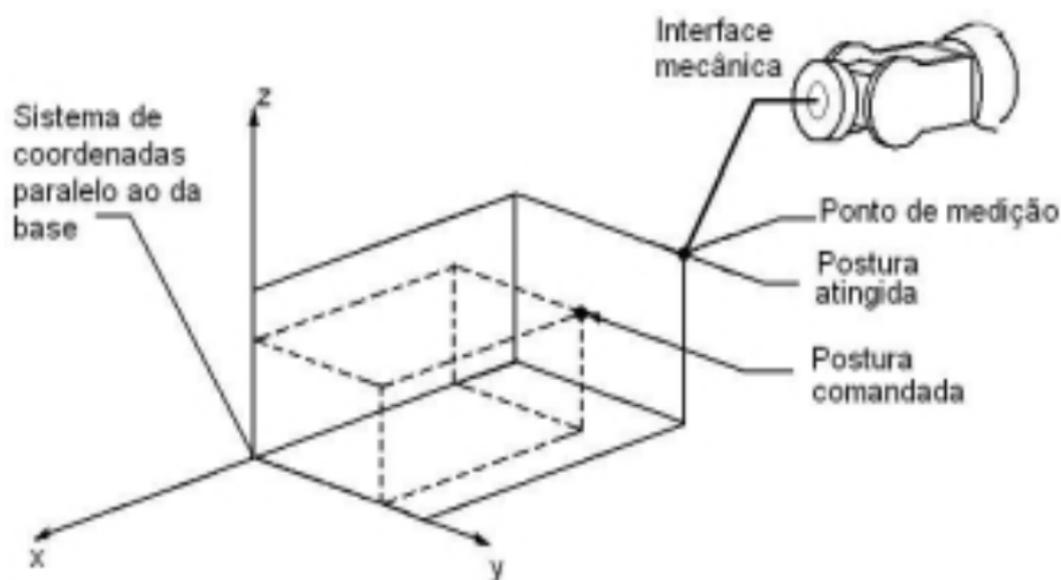
### **6.3 Normas de Avaliação ISO 9283**

Avaliar o desempenho de um manipulador é importante para sua aceitação em um ambiente industrial. Escolhido a partir das exigências da tarefa e das especificações do fabricante, é fundamental que, no recebimento do manipulador, essas especificações sejam avaliadas pela equipe de operação e manutenção da empresa. Além disso, durante o

funcionamento do manipulador, podem ocorrer desgastes que alteram suas características. Por isso, avaliações de desempenho e manutenções preditivas ao longo do tempo podem assegurar que o funcionamento do manipulador continue adequado para a realização de uma determinada tarefa. E mais, dificuldades verificadas na avaliação de desempenho podem facilitar a manutenção.

A acurácia, a repetibilidade e o desempenho dinâmico de um manipulador são definidos a partir do punho do manipulador, em que são fixadas as ferramentas e as garras. A posição desse punho geralmente é dada em termos das coordenadas cartesianas e sua orientação por meio de três ângulos de acordo com a convenção D-H (Ver Capítulo 2) e a norma ISO 9787:2013-05 (Robôs industriais - sistemas de coordenadas e nomenclaturas de movimento). Essa norma definiu o conjunto formado pelas três coordenadas cartesianas e pelos três ângulos como posição no espaço de tarefa (Volume de Trabalho: Uma região no espaço tridimensional que a ferramenta ou garra do manipulador consegue alcançar) (Figura 6.2).

Figura 6.2- Sistema de coordenadas e punho do manipulador.



Fonte: Adaptado de Romano, 2002.

A posição no espaço de tarefa do ponto de medição é o resultado da combinação das posições de suas juntas. Por isso a acurácia, a repetibilidade e o desempenho dinâmico em uma dada posição são, respectivamente, combinações da acurácia, da repetibilidade e do desempenho dinâmico de cada uma de suas juntas. A influência de cada junta, nessa combinação, varia ao longo do espaço de tarefa do manipulador. Por isso estes parâmetros

variam dentro do seu volume de trabalho. Essa variação nos parâmetros foi observada na parte experimental deste trabalho. Além disso, as características de desempenho também variam com a velocidade do movimento e com carga aplicada no punho do manipulador.

Alguns fabricantes de manipuladores desenvolveram condições de ensaio próprias. Outros adotam os ensaios definidos nas normas americanas, estabelecidas pelo *American National Standard Institute* (ANSI) ou empregam a norma internacional estabelecida pela *International Standard Organization* (ISO). Os resultados variam muito de uma norma para outra porque as condições de ensaio são diferentes e porque as fórmulas para calcular os resultados são diferentes. Para os mesmos dados de posição no espaço de tarefa, por exemplo, as fórmulas empregadas nas normas americanas (ANSI) geram como resultado uma acurácia maior do que as da ISO. Já a repetibilidade calculada segundo a ANSI é sempre menor do que a calculada de acordo com a ISO.

Em nosso país, a Associação Brasileira de Normas Técnicas adota as normas ISO, por isso, neste trabalho, foram adotados os ensaios recomendados por essa instituição. A ISO estabelece que a avaliação de desempenho deve ser realizada de acordo com a norma ISO 9283 – “*Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Methods*”, no site da ISO é informado que ela foi revisada em 2015. Os ensaios descritos nessa norma permitem a avaliação de desempenho de robôs individuais e a comparação do desempenho entre robôs diferentes.

O trabalho de Goswami (1993) foi pioneiro no estudo da avaliação de desempenho de manipuladores e foi referência para elaboração na norma ISO 9283. Nesse trabalho, é apresentado um estudo da acurácia dos manipuladores e sua relação com a repetibilidade. Os autores fizeram uma importante contribuição para estabelecer a relação e distinção entre acurácia e repetibilidade. Os autores mostraram também que atrito e folgas nas juntas, relação de transmissão, precisão dos sensores e dos atuadores influenciam a repetibilidade, enquanto o fator que mais afeta a acurácia é o modelo matemático da cinemática do manipulador. O trabalho de Smrcek (1997) também serviu de referência para elaboração no sentido de separar os conceitos repetibilidade de posição e repetibilidade de trajetória.

Segundo a norma ISO 9283 a **Acurácia** – A habilidade do robô de posicionar o atuador em uma posição do espaço de tarefa – de um manipulador industrial é avaliada medindo-se a:

- Acurácia de posição;

- Variação multidirecional na acurácia de posição;
- Acurácia de distância;
- Acurácia de trajetória.

A **repetibilidade** – A habilidade do robô de retornar consistentemente a uma posição previamente alcançada – é quantificada por meio da:

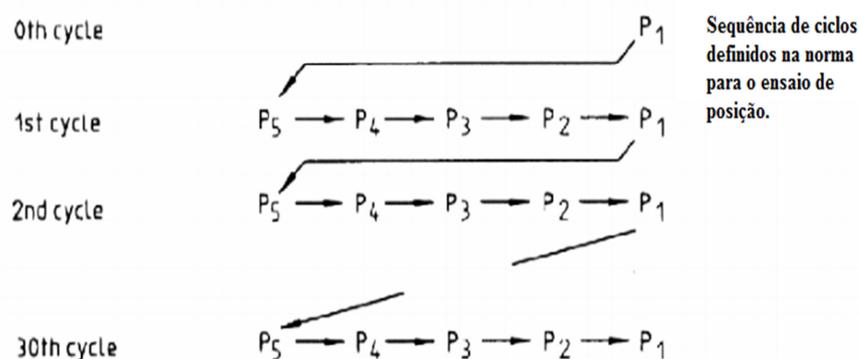
- Repetibilidade de posição;
- Repetibilidade de distância;
- Repetibilidade de trajetória.

A avaliação do **desempenho dinâmico** é realizada por meio do:

- Tempo de estabilização e Sobrepasso;
- Desvios de canto;
- Velocidades na trajetória;
- Tempo mínimo de posicionamento.

As características apresentadas acima podem ser usadas no todo ou em parte para avaliar o desempenho de um manipulador, dependendo da estrutura do manipulador, do sistema de aquisição de dados disponíveis e da instrumentação adequada. A norma não especifica quais parâmetros devem ser empregados para testar um manipulador em particular. Apresenta, no entanto, uma orientação para a seleção das características a serem testadas para algumas aplicações. Para se comparar características de desempenho entre robôs diferentes, os seguintes parâmetros devem ser iguais: tamanho dos cubos de teste, cargas, velocidades, caminhos, ciclos e condições ambientais. Os possíveis ciclos indicados na norma estão representados na Figura 6.3, sendo que  $P_i$  indica a posição  $i$  que o punho do manipulador ocupa no espaço.

Figura 6.3 – Ciclos definidos para avaliação de desempenho.



Fonte: Adaptado de ISO 9283.

Em Sirinterlikçi (2009), é apresentado o cálculo da repetibilidade e da acurácia de um manipulador industrial Fanuc M16iL segundo a ISO 9283 em apenas um eixo e com aquisição manual dos dados. Neste trabalho, os autores procuram relacionar quais fatores afetam o desempenho do manipulador, e como era previsto, a velocidade do movimento e carga manipulada são os principais fatores, a localização dentro do volume de trabalho e desaceleração são fatores secundários.

Em Mousavi (2015) a norma ISO 9283 é utilizada para análise da repetibilidade de posição de um manipulador tipo SCARA. Nesse trabalho, é feita uma descrição detalhada da repetibilidade, porém não cita em que espaço as trajetórias foram geradas nem qual controlador foi utilizado. Esse trabalho também aborda os principais requisitos da norma que são os pontos selecionados dentro do volume de trabalho, número de ciclos em cada ensaio, velocidade e a carga para realizar a avaliação de desempenho.

Alguns tipos de robôs não são citados na norma como manipuladores paralelos e robôs humanoides que são híbridos entre manipuladores seriados e paralelos (NIKU, 2014), porém por ser esta norma a referência da robótica, a mesma é adaptada por pesquisadores para esses robôs especiais. Em Onderová (2014), a norma ISO 9283 é utilizada para avaliar a acurácia e a repetibilidade de posição para um manipulador paralelo. Embora a norma tenha sido escrita a priori para manipuladores seriais, o trabalho mostra que a norma pode ser aplicada aos manipuladores paralelos sem grandes mudanças.

Em Park (2008) é apresentada uma avaliação de desempenho de um manipulador tipo humanoide (formado por dois manipuladores antropomórficos) usando a norma ISO 9283. As características avaliadas foram a acurácia e a repetibilidade de posição. A repetibilidade encontrada foi de 1.4mm e a acurácia de 2.41mm. Esses valores são considerados bons resultados visto que o manipulador é um protótipo desenvolvido pelos autores do artigo. E também mostra que a própria norma deve ser atualizada para abranger manipuladores humanoides e paralelos.

Em Breedon (2002) é apresentada uma aplicação da norma ISO 9283 para avaliar a acurácia e a repetibilidade de trajetória de um manipulador com seis graus de liberdade utilizando um controlador baseado em lógica Fuzzy. Embora o autor não descreva os detalhes da implementação do controlador Fuzzy, os resultados e as conclusões demonstram o excelente desempenho nos ensaios chegando a registrar 938 $\mu$ m de acurácia e 864 $\mu$ m de repetibilidade.

Está fora do escopo deste trabalho explorar todos os aspectos relacionados às normas que regulamentam o mercado de manipuladores industriais. A norma ISO 9283:2013 define características para testar a posição, a trajetória e o tempo mínimo de posicionamento dos manipuladores industriais. Em função das limitações financeiras desta pesquisa, que permitiu apenas a aquisição de dois inversores de frequência, neste trabalho, é realizado apenas o controle de posição de dois graus de liberdade do manipulador SCARA e os critérios adotados para avaliação foram a acurácia de posição e a repetibilidade de posição.

#### **6.4 Características de posição**

As características de posição no espaço de tarefa são grandezas que quantificam os erros entre uma posição comandada (Posição especificada por meio de marcação de pontos, entrada de dados numéricos ou programação off line) e a respectiva posição atingida (Posição atingida pelo robô no modo automático em resposta a um comando de uma posição comandada) (Figura 6.2). A acurácia e repetibilidade de posição quantificam as diferenças que ocorrem entre uma posição comandada e as atingidas e suas flutuações. Esses erros podem ocorrer devido a:

- Definições internas de controle (Resoluções);
- Erros de transformação de coordenadas (Solução da Cinemática Inversa);
- Diferenças entre as dimensões da estrutura articulada e aquelas utilizadas no controle do robô (Parâmetros da cinemática direta);
- Falhas mecânicas, como desgastes, histereses, fricção e influências externas como temperatura.

Nos robôs industriais, a posição comandada pode ser especificada diretamente no controlador por meio da gravação das coordenadas no espaço de tarefa em uma caixa de comando ou de uma entrada manual de dados (Teach Box); e, indiretamente, por meio de um método de programação fora de linha (off line). Neste trabalho, a posição comandada é especificada por meio de um sistema supervisor, o que pode ser considerada uma programação off line pelo fato de o manipulador estar operando enquanto novas posições podem ser gravadas.

A forma pela qual a posição comandada é especificada influencia diretamente os resultados dos ensaios e, de acordo com a norma ISO 9283, deve estar claramente descrita no

relatório de ensaios. O relatório de ensaios deve consistir em uma capa (Figura 6.4) e planilha de resultados. A capa deve trazer informações sobre o robô manipulador, set-up (instalação e montagem), condições de ensaio. Todos os relatórios devem conter todos os programas e parâmetros utilizados em cada ensaio. Esse relatório deve ser fornecido pelo fabricante no momento da aquisição de um manipulador.

Figura 6.4 – Relatório de ensaios

Example of a test report	
<b>ROBOT</b>	<b>Control system</b>
Manufacturer: .....	.....
Type: .....	.....
Model No: .....	
Serial No:.....	
Mounting orientation: .....	
Software version: .....	.....
Programming method: .....	
TEST LOCATION (SITE): .....	
<b>PHYSICAL ENVIRONMENT</b>	
Ambient temperature: .....	
Abnormal conditions: ..... (see note)	
NOTE - Comments on conditions not within expected limits.	
WARM-UP PERIOD: .....	MEASURING TIME: .....
MEASURING DWELL: .....	
<b>INSTRUMENTATION</b>	
Type: .....	Model No:..... Serial No:.....
Comments: .....	
<b>TEST CONDITIONS</b>	
Rated load conditions:	
Mass (kg).....	Position of centre of gravity (coordinates $L_x, L_y, L_z$ ).....
Moments of inertia ( $kg/m^2$ ).....	Measurement point position (coordinates $X_{MP}, Y_{MP}, Z_{MP}$ ).....
<b>TESTS CONDUCTED ACCORDING TO ISO 9283</b>	
<input type="checkbox"/> Pose accuracy	<input type="checkbox"/> Path accuracy and path repeatability
<input type="checkbox"/> Pose repeatability	<input type="checkbox"/> Path accuracy on reorientation
<input type="checkbox"/> Multi-directional pose accuracy variation	<input type="checkbox"/> Cornering deviations
<input type="checkbox"/> Distance accuracy and repeatability	<input type="checkbox"/> Path velocity accuracy, repeatability and fluctuation
<input type="checkbox"/> Position stabilization time	<input type="checkbox"/> Minimum posing time
<input type="checkbox"/> Position overshoot	<input type="checkbox"/> Static compliance
<input type="checkbox"/> Drift of pose characteristics	<input type="checkbox"/> Weaving deviations
<input type="checkbox"/> Exchangeability	
	Conducted by: .....
	Date: .....
	Checked by: .....
	Date: .....

Fonte: ISO 9283.

#### 6.4.1 Acurácia de posição ( $AP_p$ )

É a diferença entre a posição comandada e a média aritmética das posições atingidas quando a aproximação é realizada pela mesma direção. Expressa, portanto, a

habilidade de um manipulador posicionar o atuador (garra ou ferramenta) em uma posição do espaço e é definida estatisticamente. Além disso, ela depende do tipo do manipulador e da resolução no controle do movimento das juntas. A acurácia de posição deve ser calculada para cada um dos pontos de passagem (P1 a P5). A Acurácia de posição é dividida em acurácia de posicionamento e acurácia de orientação. Cabe salientar que a acurácia de orientação não foi tratada neste trabalho pela limitação citada acima.

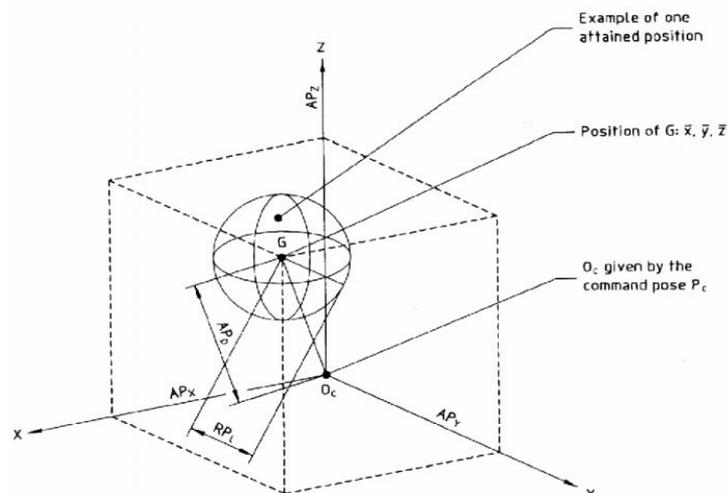
Acurácia de posicionamento ( $AP_p$ ): a diferença entre uma posição comandada ( $X_c, Y_c, Z_c$ ) e o baricentro das posições atingidas ( $X_m, Y_m, Z_m$ ). Na Figura 6.5, é mostrada a disposição desses pontos no espaço. Salienta-se que a acurácia de posicionamento também é definida como a diferença entre a localização de um ponto comandado e a média das posições atingidas ou baricentro dos pontos atingidos. Este parâmetro de avaliação é calculado da seguinte maneira:

$$AP_p = \sqrt{AP_x^2 + AP_y^2 + AP_z^2} \quad (6.1)$$

Em que:

$$\begin{aligned} AP_x &= \left( X_c - \bar{X}_m \right) \\ AP_y &= \left( Y_c - \bar{Y}_m \right) \\ AP_z &= \left( Z_c - \bar{Z}_m \right) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Figura 6.5 - Acurácia e Repetibilidade de Posicionamento.



Fonte: ISO 9283.

### 6.4.3 Repetibilidade de posição ( $RP_i$ )

Expressa a proximidade das posições atingidas após  $n$  visitas à mesma posição comandada na mesma direção. A repetibilidade de posição também pode ser expressa como a dispersão entre as posições atingidas após  $n$  repetidas visitas as mesmas posições comandadas se aproximando na mesma direção. A repetibilidade expressa a habilidade de um manipulador retornar consistentemente a uma posição previamente alcançada. É uma medida estatística, associada à acurácia. Como mostrado na Figura 6.1, se a posição desejada não é atingida, mas sempre o mesmo erro acontece, então a acurácia é ruim, mas a repetibilidade é boa. A acurácia depende da carga, cargas maiores causam deflexões maiores, que degradam a acurácia; por sua vez, a repetibilidade não depende da carga (ROMANO, 2002). A repetibilidade dos manipuladores é dividida em Repetibilidade de posição e Repetibilidade de orientação. A repetibilidade de orientação não foi analisada neste trabalho.

A repetibilidade de posição  $RP_i$  é quantificada como o raio da esfera centrada no baricentro do grupo de pontos atingidos calculado a partir da média dos raios de cada ponto atingido e do seu desvio padrão (Figura 6.5). A norma ressalta que a repetibilidade de posição mais precisamente é o raio da esfera com centro no baricentro dos pontos atingidos que engloba 99,86% dos pontos atingidos, considerando uma distribuição normal. Dessa forma, é adotado o desvio padrão da acurácia de posição. Para o cálculo da repetibilidade de posição inicialmente é necessário encontrar a média aritmética da acurácia de posição, ou seja, a média dos erros de posição:

$$\bar{AP}_p = \frac{\sum AP_p}{n} \quad (6.3)$$

Em que  $n = 30$  porque a norma define trinta ciclos para avaliação de acurácia e repetibilidade de posição. O próximo passo é o cálculo do desvio padrão  $S_{AP_p}$  da acurácia de posição. O desvio padrão é uma medida do espalhamento das medidas, quanto maior o desvio padrão, mais espalhadas serão os pontos no conjunto de dados.

$$S_{AP_p} = \sqrt{\frac{\sum \left( AP_p - \bar{AP}_p \right)^2}{n - 1}} \quad (6.4)$$

Com o objetivo de cobrir 99,73% (três vezes o desvio padrão de uma distribuição normal) das posições atingidas, a repetibilidade de posição  $RP_l$  é definida pela norma pela equação 6.5:

$$RP_l = \bar{AP}_p + 3S_{AP_p} \quad (6.5)$$

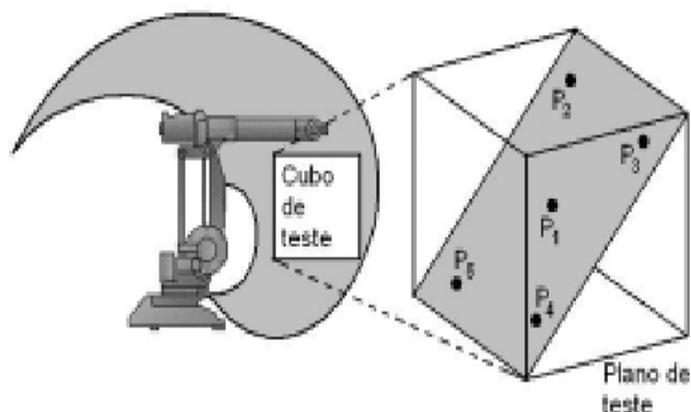
## 6.5 Condições para os Ensaios

As condições nas quais as características de desempenho são testadas influenciam decisivamente os resultados. A norma ISO 9283 estabelece condições que dizem respeito à montagem, operação, meio ambiente, princípios de medição, instrumentação, cargas no punho, velocidades, posições e trajetórias a serem utilizadas nos ensaios. A norma também fixa as condições para ensaios comparativos entre robôs de diferentes fabricantes. De acordo com a norma, a montagem, a operação e as condições ambientais em que o robô funciona devem seguir as instruções de seu fabricante, neste trabalho o autor usou a sua experiência na indústria e a estrutura do laboratório (Ferramentas manuais, controle de temperatura).

A medição das posições e ângulos de orientação deve ser feita no sistema de coordenadas da base definida pela norma ISO 9787, Sistema Cartesiano. A incerteza na instrumentação não deve ultrapassar 5% da magnitude da característica que está sendo testada. Neste trabalho, a precisão indicada pelos fabricantes dos transdutores de posição (potenciômetros) é de 1%. No que diz respeito à velocidade, os ensaios para medir as características de posição devem ser realizados utilizando a velocidade máxima estabelecida pelo fabricante. Neste trabalho, foi adotado como limitante para velocidade a corrente elétrica máxima de cada inversor de frequência. A carga considerada são motores e elos das juntas três e quatro que somam uma massa de 6,32 Kg.

As posições a serem utilizadas nos ensaios são estabelecidas a partir de um cubo de ensaio inscrito no espaço de trabalho do manipulador (Figura 6.6). Esse cubo com lados paralelos aos eixos do sistema de coordenadas da base deve ser localizado na parte mais utilizada do espaço de trabalho, e deve ter o maior volume possível, formando um quadrado no plano XY. O relatório de ensaios deve conter uma figura mostrando a localização do cubo dentro do espaço de trabalho. Quando o espaço de trabalho tem uma dimensão maior em algum dos eixos, o cubo pode ser substituído por um paralelepípedo retangular. Essa recomendação foi adotada neste trabalho no qual são utilizados retângulos no plano XY.

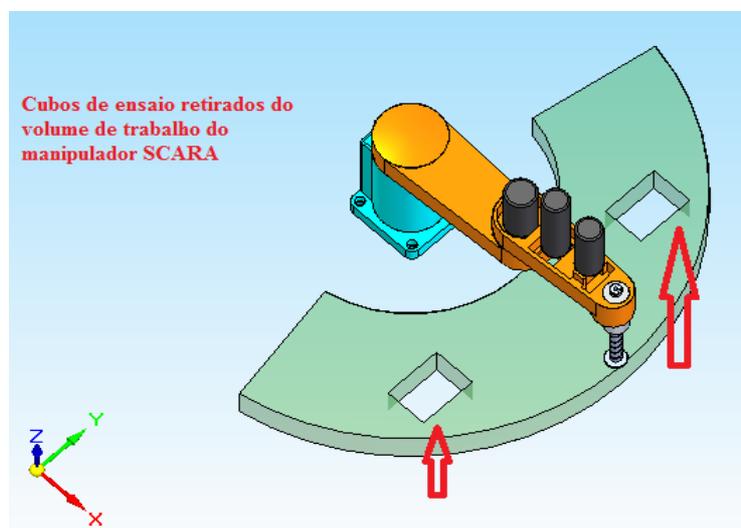
Figura 6.6 – Cubo de ensaio recomendado pela norma.



Fonte: Romano, 2002.

Em função da estrutura do manipulador SCARA usado neste trabalho as duas regiões mais utilizadas são os denominados quadrantes positivos e negativos e para garantir o maior volume foram adotados retângulos no plano XY como mostrado na Figura 6.7.

Figura 6.7 – Retângulo de ensaio adotado no plano XY.

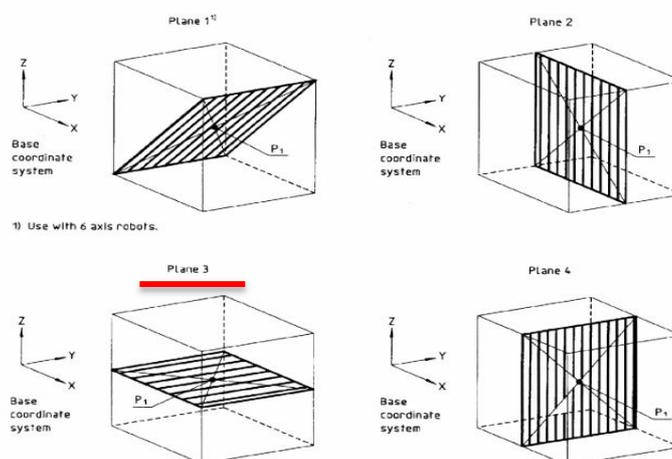


Fonte: Elaborada pelo autor.

As posições a serem utilizadas nos ensaios devem estar localizadas em um dos planos de ensaio mostrado na Figura 6.8; neste trabalho, foi adotado o plano número 3. O plano adotado é função da estrutura mecânica do manipulador, neste caso um manipulador horizontal. O plano escolhido deve estar explicitado no relatório de ensaios. Nos ensaios de posição, são utilizadas cinco posições (P1 a P5) contidas no plano selecionado. A posição P1 é

a interseção das diagonais do cubo de ensaio. Neste trabalho a posição P1 é a intersecção das diagonais do retângulo. As posições P2 a P5 estão localizadas nos vértices deste retângulo.

Figura 6.8 – Planos de ensaios. Plano 3 adotado neste trabalho.



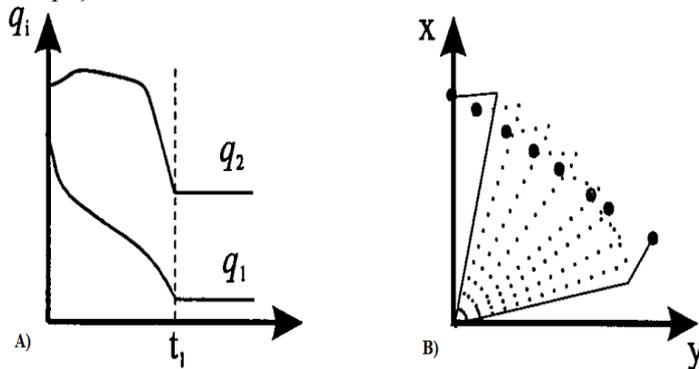
Fonte: Adaptado de ISO 9283.

A acurácia e a repetibilidade de posição é avaliada movimentando-se o punho do manipulador a partir de P1 até P2, P3, P4, P5 e P1. A interpolação destes pontos neste não é definida no espaço cartesiano, portanto o responsável pela avaliação de desempenho pode optar por uma interpolação no espaço das juntas (ROMANO, 2002). Outro ponto importante é que a escolha do retângulo de ensaio neste trabalho permite a execução de todos os ensaios indicados na norma. Os retângulos escolhidos, embora de área reduzida, permitem uma interpolação no espaço cartesiano que garantirá a execução dos ensaios de acurácia de trajetória e repetibilidade de trajetória em trabalhos futuros. Apenas nos ensaios de trajetória é obrigatória a interpolação no espaço cartesiano.

A geração de trajetória para interpolação das posições nos ensaios que avaliam acurácia e a repetibilidade de posição pode ser executada como descrito no capítulo 1 no espaço de cartesiano ou no espaço das juntas e deve ser indicado no relatório do ensaio. Quando usado o espaço cartesiano a trajetória contínua formada por linha e arcos no espaço cartesiano é discretizada, ou seja, dividida em quantidade finita de pontos e a cinemática inversa é resolvida para um destes pontos. Deste ponto em diante o problema se transforma numa interpolação de pontos no espaço das juntas por meio de polinômios (NIKU, 2014). Como mostrado na Figura 6.9B a trajetória no espaço cartesiano apresentará uma forma contínua quanto maior for o número de pontos e no espaço das juntas a trajetória

aparentemente caótica com mudanças de direção (Figura 6.9A) será formada pela combinação de funções polinômios que dependem do grau do polinômio, das posições e do tempo para execução da tarefa.

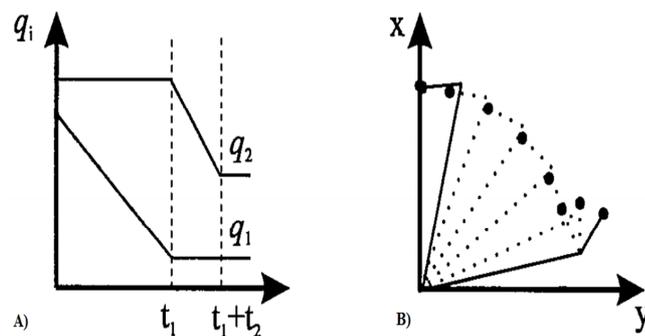
Figura 6.9 – Trajetória linear manipulador SCARA no espaço cartesiano. A) Trajetória no espaço das juntas. B) Trajetória discretizada no espaço cartesiano.



Fonte: Barrientos, 2007.

Para realização dos ensaios de posição adota-se o espaço das juntas para interpolar as posições e poder ser gerar três tipos de trajetórias. O projetista do manipulador considera as possíveis aplicações e a relação custo benefício para decidir que tipo de trajetória adotar. A primeira trajetória no espaço das juntas é a denominada interpolação eixo a eixo. Consiste no acionamento de uma junta de cada vez, ou seja, a segunda junta é acionada quando a primeira atingiu sua posição final, e assim sucessivamente. Obviamente o tempo para execução de uma tarefa é maior, no entanto as vantagens obtidas são menor consumo de energia e motores de menor potência. A Figura 6.10 mostra a interpolação eixo a eixo para um manipulador SCARA.

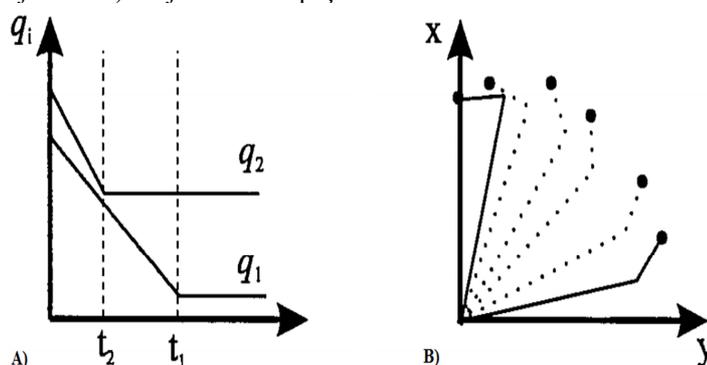
Figura 6.10 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação tipo eixo a eixo. A) Trajetória no espaço das juntas. B) Trajetória no espaço cartesiano.



Fonte: Barrientos, 2007.

A segunda trajetória no espaço das juntas possíveis para o ensaio de posição é a denominada interpolação simultânea de eixos. Consiste no acionamento simultâneo de todas as juntas do manipulador. Como cada junta têm um deslocamento diferente a realizar e as velocidades geralmente são diferente, cada uma terminará seu movimento em um instante diferente. A posição desejada só será atingida quando a última junta concluir seu deslocamento. Portanto, o tempo total do movimento é o tempo da junta de deslocamento mais demorado que não necessariamente é a mais lenta. A Figura 6.11 mostra a interpolação simultânea de eixos para um manipulador SCARA.

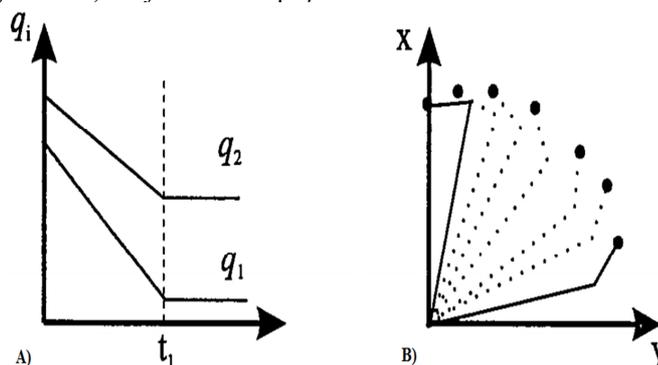
Figura 6.11 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação simultânea de eixos. A) Trajetória no espaço das juntas. B) Trajetória no espaço cartesiano.



Fonte: Barrientos, 2007.

A terceira trajetória possível no espaço das juntas é a denominada interpolação coordenada de eixos. Consiste no acionamento simultâneo de todas as juntas do manipulador, porém tem como característica principal a parada simultânea de todas as juntas. Para que isso seja possível, previamente é calculado o tempo de deslocamento de cada junta, utilizando polinômios geralmente de terceiro grau. O Maior tempo é adotado para todas as juntas, portanto, apenas uma junta desenvolverá potência máxima as demais trabalharão com potência menor porque devem esperar a mais lenta. A posição desejada será atingida por todas as juntas simultaneamente. Essa característica torna o movimento do manipulador mais suave e natural; além disso, essa interpolação foi adotada neste trabalho. Para desenvolvê-la foram utilizados polinômios cúbicos e determinado o mesmo tempo de execução para ambas as juntas. A Figura 6.12 mostra a interpolação simultânea de eixos para um manipulador SCARA. Essa opção de geração de trajetória foi adotada nos experimentos deste trabalho.

Figura 6.12 – Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação coordenada de eixos. A) Trajetória no espaço das juntas. B) Trajetória no espaço cartesiano.

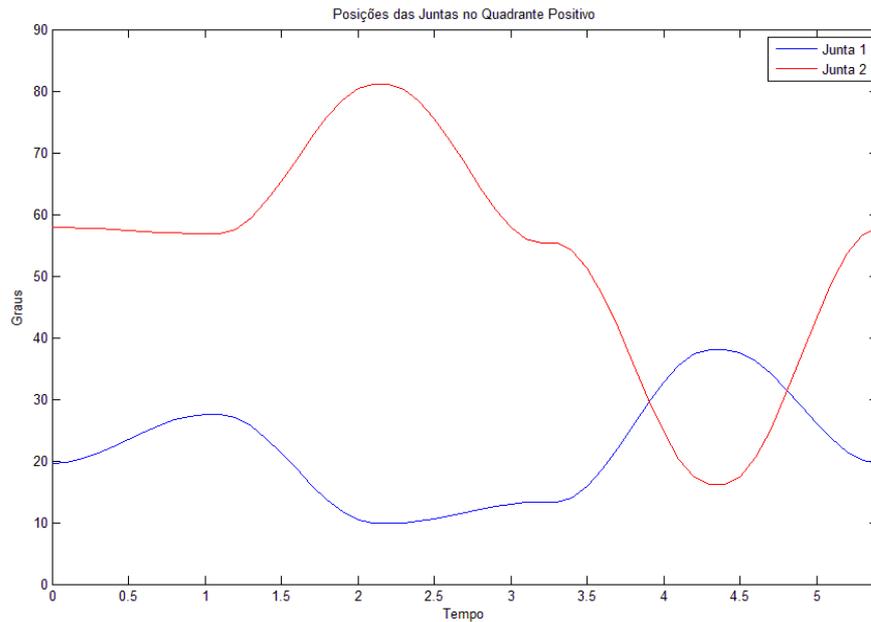


Fonte: Barrientos, 2007.

Partindo das diferentes trajetórias descritas acima, a geração de trajetória no espaço das juntas com interpolação coordenada de eixos foi adotada neste trabalho. A interpolação utilizando polinômio de terceiro grau. A função de gerador de trajetória foi toda desenvolvida no Matlab® e enviada para o controlador do manipulador via OPC (ver Figura 7.2). Os pontos de passagem da extremidade do manipulador são mostrados nos quadros 7.3 e 7.4 para as duas regiões distintas do volume de trabalho do manipulador, o quadrante positivo e o quadrante negativo respectivamente. As Figuras 6.13 e 6.14 mostram o resultado da geração de trajetória desenvolvida neste trabalho. Importante citar que as figuras 6.13 e 6.14 mostram a trajetória de um ciclo na sequência de P1-P2-P3-P4-P5-P1, nos ensaios de posição cada ciclo foi repetido trinta vezes como recomenda a norma.

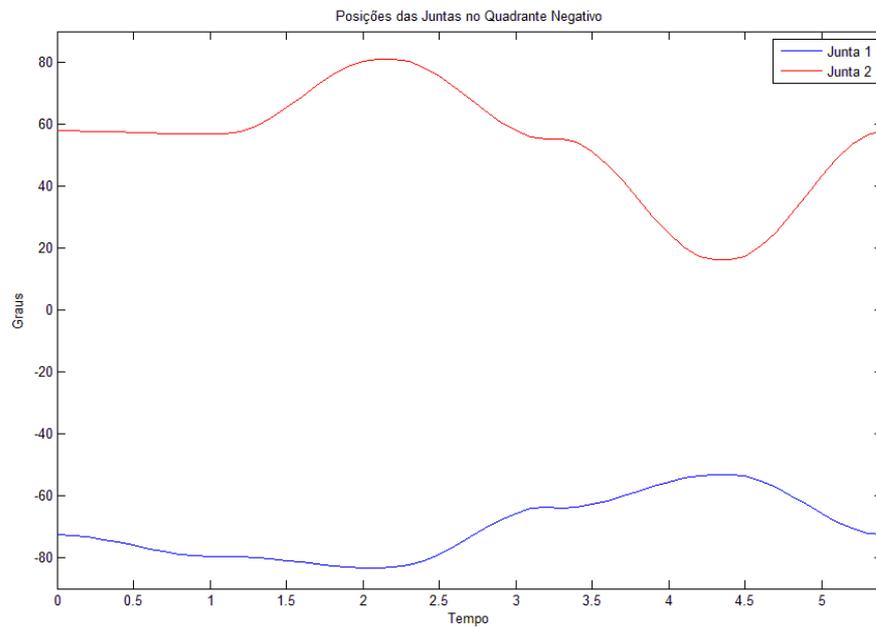
Neste capítulo, foi apresentado um resumo da norma ISO 9283 que trata da avaliação de desempenho de manipuladores robóticos com foco na acurácia e repetibilidade de posição. Também foram apresentadas as premissas adotadas, neste trabalho, para o cumprimento dos requisitos da norma, ou seja, para manter a avaliação de desempenho dentro dos padrões internacionais que a robótica industrial exige. No próximo capítulo, serão mostrados os resultados dos ensaios realizados no manipulador SCARA com controlador Fuzzy embarcado no CLP e comparado seus resultados com o controlador PID também embarcado no CLP.

Figura 6.13– Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação coordenada de eixos realizada neste trabalho (Quadrante Positivo).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6.14– Trajetória no espaço das juntas do manipulador SCARA com interpolação coordenada de eixos realizada neste trabalho (Quadrante Negativo).



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 7 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MANIPULADOR SCARA

### 7.1 Introdução

Neste capítulo, será apresentada a avaliação de desempenho do manipulador SCARA nos ensaios recomendados pela norma que tratam da acurácia e repetibilidade de posição. Infelizmente, devido às limitações tecnológicas e financeiras não foi possível seguir todas as recomendações da Norma ISO 9283, principalmente nos critérios relativos aos instrumentos de medição. No entanto, a metodologia proposta pela norma foi adaptada para a realidade da pesquisa. O capítulo inicia com os esclarecimentos de como foram gerados os dados; em seguida, são mostrados os dados dos ensaios nos quadrantes positivo e negativo do volume de trabalho do manipulador com controlador Fuzzy embarcado no CLP. Depois, é apresentado o cálculo da acurácia e da repetibilidade e o relatório final da avaliação de desempenho do manipulador com controlador Fuzzy. Em seguida, são mostrados os dados dos mesmos ensaios realizados com o controlador PID também embarcado no CLP, calculada a acurácia e a repetibilidade de posição para este segundo controlador e o relatório da sua avaliação de desempenho. O capítulo encerra com a comparação dos dois controladores adotando como métrica a acurácia e a repetibilidade de posição definidas na ISO 9283.

Como citado no capítulo anterior, a avaliação de desempenho foi realizada nos dois quadrantes mais utilizados do espaço de trabalho do manipulador, foi adotado o plano de ensaio 3, os pontos de passagem são os vértices e a intersecção das diagonais de um retângulo inscrito no plano, e a interpolação dos pontos de passagem realizada no espaço das juntas com acionamento coordenado dos eixos. As coordenadas no espaço cartesiano dos pontos de passagem de cada ciclo para o quadrante positivo e o quadrante negativo são mostrados nos Quadros 7.1 e 7.2 respectivamente (Ver Figura 7.2).

Os parâmetros avaliados foram acurácia de posição e a repetibilidade de posição. O controlador Fuzzy foi embarcado no CLP como descrito nos capítulos anteriores. Outro ponto importante é que, pelo fato deste trabalho tratar de controle de posição a interpolação entre as posições desejadas, foi realizada no espaço das juntas por meio de um polinômio de terceiro grau como mostrado na Figura 6.13 para o quadrante positivo e na Figura 6.14 para o quadrante negativo.

Quadro 7.1 – Pontos de Passagem ensaio do quadrante positivo. Coordenadas no espaço cartesiano medidas em metros.

Posição	X	Y
P1	0.395	0.410
P2	0.340	0.460
P3	0.340	0.360
P4	0.450	0.360
P5	0.450	0.460

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 7.2 – Pontos de Passagem ensaio do quadrante negativo. Coordenadas no espaço cartesiano medidas em metros.

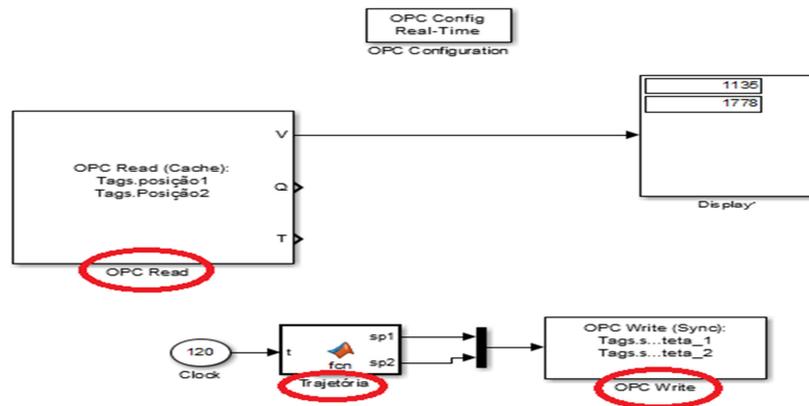
Posição	X	Y
P1	0.395	-0.410
P2	0.340	-0.460
P3	0.340	-0.360
P4	0.450	-0.360
P5	0.450	-0.460

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 7.2 Resultados dos Ensaios de Posição com Controlador Fuzzy

A realização dos ensaios foi à luz da norma ISO 9283 e com as definições descritas acima. Importante detalhar como foi realizada a aquisição dos dados. Inicialmente, as trajetórias geradas no Matlab® no espaço das juntas são enviadas via protocolo OPC (*OLE for Process Control*) para o Supervisório da célula (ELIPSE, 2010). A Figura 7.1 mostra os elementos necessários para estabelecer essa comunicação. Nesta figura é mostrado um bloco chamado “Trajetória” que gera a trajetória desejada com o valor digital, também é mostrado o bloco que lê as posições dos potenciômetros “OPC Read” e o bloco que escreve “OPC Write” nas posições desejadas para o controlador Fuzzy no CLP.

Figura 7.1 – Comunicação via OPC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A geração da trajetória foi realizada no espaço das juntas, portanto as coordenadas dos pontos de passagem foram convertidas para ângulos por meio da cinemática inversa (Equações 2.16 e 2.21). O resultado dessa conversão é mostrado nos Quadros 7.3 e 7.4. Em função do limitado poder computacional CLP as coordenadas ainda foram convertidas para os valores digitais por meio da equação 5.1. O resultado é mostrado nos Quadros 7.5 e 7.6.

Quadro 7.3 – Pontos de Passagem ensaio do quadrante positivo. Coordenadas no espaço das juntas medidas em graus.

Posição	$\Theta_1$	$\Theta_2$
P1	19.56	57.89
P2	27.47	56.89
P3	9.88	81.04
P4	13.33	55.28
P5	38.13	16.26

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 7.4 – Pontos de Passagem ensaio do quadrante negativo. Coordenadas no espaço das juntas medidas em graus.

Posição	$\Theta_1$	$\Theta_2$
P1	-72.58	57.89
P2	-79.59	56.89
P3	-83.4	81.04
P4	-63.99	55.28
P5	-53.13	16.26

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 7.5 – Pontos de Passagem ensaio do quadrante positivo. Coordenadas convertidas para o valor digital.

Posição	$\Theta 1$	$\Theta 2$
P1	1246	1682
P2	1336	1670
P3	1136	1945
P4	1175	1652
P5	1457	1208

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 7.6 – Pontos de Passagem ensaio do quadrante negativo. Coordenadas convertidas para o valor digital.

Posição	$\Theta 1$	$\Theta 2$
P1	198	1682
P2	118	1670
P3	75	1945
P4	296	1652
P5	419	1208

Fonte: Elaborada pelo autor.

No supervísório é gerado um relatório que registra as posições desejadas e atingidas, este relatório pode ser acessado na forma de planilha eletrônica por meio de um botão (ver Figura 5.9). Os resultados obtidos diretamente do supervísório da realização de trinta ciclos são mostrados nos Quadros D.1 e D.2 do apêndice D, deste trabalho, respectivamente para o quadrante positivo e o quadrante negativo. Esses resultados estão com os valores digitais das posições, a comunicação OPC tratou os dados em função da memória e capacidade de processamento do CLP. Usando a equação 5.1, esses dados foram convertidos para valores no espaço das juntas e mostrados nos Quadro D.3 e Quadro D.4. Por fim, usando a cinemática direta (Equações 2.11 e 2.12), as posições atingidas no espaço cartesiano foram calculadas como mostrado nos Quadro D.5 e Quadro D.6, respectivamente para o quadrante positivo e o quadrante negativo.

### 7.3 Cálculo da Acurácia e da Repetibilidade de Posição com Controlador Fuzzy

Partindo dos resultados obtidos nos Quadro D.5 e Quadro D.6 a acurácia de posição foi calculada usando a equação 6.1 e a repetibilidade de posição foi calculada usando a equação 6.5. A acurácia de posição no quadrante positivo é a média aritmética da acurácia de cada posição neste quadrante mostrada no quadro 7.7. Portanto, a acurácia de posição do 1º quadrante é de 3,648 mm. Da mesma forma, usando a acurácia de cada ponto mostrado no quadro 7.8, a acurácia de posição do quadrante negativo é de 3,929 mm. Como cada quadrante tem o mesmo grau de importância dentro do volume de trabalho, a acurácia de

posição do manipulador é calculada pela média aritmética das acurácias de cada quadrante. Portanto, a acurácia de posição do manipulador SCARA com controlador Fuzzy desenvolvido neste trabalho é de 3,788 mm.

Quadro 7.7 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante positivo Controlador Fuzzy.

Posições no Espaço Cartesiano	P1	P2	P3	P4	P5
Acurácia de Posição (Ap)	4,390	3,276	5,844	3,925	0,807

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 7.8 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante negativo Controlador Fuzzy.

Posições no Espaço Cartesiano	P1	P2	P3	P4	P5
Acurácia de Posição (Ap)	6,780	4,595	3,097	1,738	3,436

Fonte: Elaborada pelo autor.

A repetibilidade de posição calculada para o quadrante positivo é de 8,606 mm e para o quadrante negativo é de 9,004 mm, como cada quadrante tem o mesmo grau de importância dentro do volume de trabalho, a repetibilidade do manipulador é calculada pela média aritmética das repetibilidade de cada quadrante. Portanto a repetibilidade de posição do manipulador SCARA com controlador desenvolvido neste trabalho é de 8,805 mm.

A repetibilidade e acurácia variam dentro do volume de trabalho do manipulador, porém a repetibilidade apresenta uma variação maior. Conforme demonstrado em Receanu (2013) o uso das saídas digitais a relé para definir o sentido de rotação dos atuadores causa dois problemas muito difíceis de modelar a zona morta e a histerese no acionamento dos atuadores. No mesmo trabalho, também são tratadas as denominadas não linearidades duras (*hard nonlinearities*) geradas nas juntas por atrito, saturação, zona morta, histerese e folgas. Essas não linearidades são responsáveis por produzir oscilações e erros na repetibilidade de posição, esses fatos foram comprovados nos ensaios realizados diante da variação do repetibilidade de posição.

Como recomenda a norma ISO 9283, os resultados são apresentados a seguir na forma de relatório que passa, então, a ser o documento que caracteriza o manipulador SCARA no seu volume de trabalho e o credencia a execução de tarefas no espaço cartesiano.

## 7.4 Relatório de Ensaio de Posição Controlador Fuzzy

### Relatório Manipulador SCARA

- Nome: MANIPULADOR CEARA;
- Tipo: SCARA;
- Número: 01;
- Instalação: Célula Didática (Laboratório Centauro);
- Programação off line de pontos de passagem (posições);
- Resolução de programa: 0.08°;
- Resolução de controle: 0.16°;
- Software: sup131015.xpr;
- Hardware: CLP Twido;
- Sistema de Controle: Controlador Fuzzy Tipo Takagi-Sugeno Ordem zero.

### Condições do Ambiente

- Temperatura: 21°C.
- Horário e data: 13h30min - 23/05/2016.
- Duração: 5min.

### Instrumentação

- Junta 1: Potenciômetro rotativo 1K $\Omega$  - 1%.
- Junta 2: Potenciômetro rotativo 1K $\Omega$  - 1%.

### Condições do ensaio

- Massa da carga (Kg): 6,32 Kg.
- Plano de movimentação: Número 3, Plano XY (horizontal).
- Geração de trajetória: Interpolação no espaço das juntas tipo acionamento simultâneo.

### Ensaio realizado de acordo com a norma ISO 9283

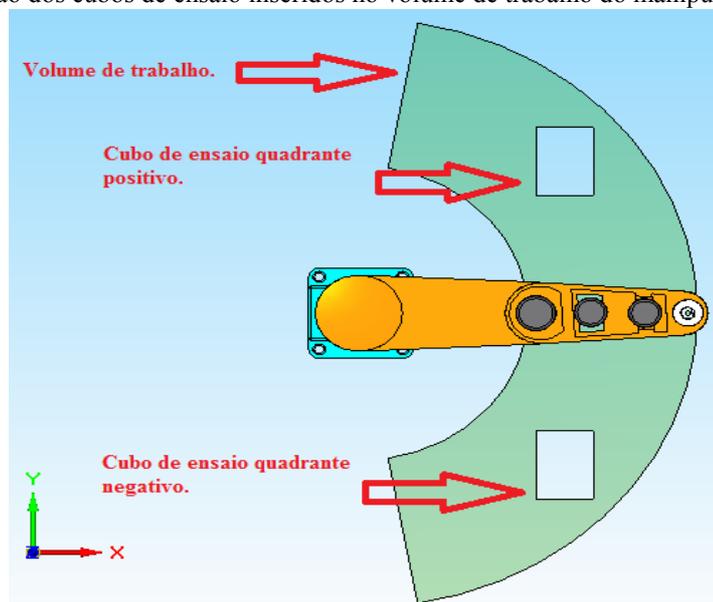
- Acurácia de posição: 3,788 mm.
- Repetibilidade de posição: 8,805 mm.

### Conclusões do Relatório

O controlador Fuzzy apresentou um desempenho aceitável para realização do controle de posição do manipulador SCARA. Com os valores de acurácia e repetibilidade encontrados o manipulador está apto a executar tarefas de manipulação de peças, paletização, fundição, colagem, montagens simples e soldagem a ponto.

## Cubo de Ensaio no Espaço de tarefa

Figura 7.2 - Localização dos cubos de ensaio inseridos no volume de trabalho do manipulador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 7.5 Resultados dos Ensaios de Posição com Controlador PID

A metodologia adotada para realização dos ensaios de acurácia e repetibilidade de posição para o controlador é exatamente a mesma usada no ensaio com o controlador Fuzzy. É importante citar que, enquanto no primeiro ensaio foi apenas um controlador para todo o volume de trabalho do manipulador, neste ensaio foram programados dois PIDs distintos para cada volume de trabalho. Isso se deve ao fato citado anteriormente, o qual indica que controlador convencional PID é projetado para um ponto ou região de operação (AGUIRRE, 2007).

As posições atingidas durante o ensaio são obtidas diretamente do supervisor que registrou a realização dos trinta ciclos nos Quadros E.1 e E.2 do apêndice E deste trabalho, respectivamente para o quadrante positivo e o quadrante negativo. Esses resultados estão com os valores digitais das posições. Usando a equação 5.1, esses dados foram convertidos para valores no espaço das juntas e mostrado nos Quadros E.3 e E.4. Por fim, usando a cinemática direta (Equações 2.11 e 2.12), as posições atingidas no espaço cartesiano foram calculadas e são mostradas nos Quadros E.5 e E.6.

## 7.6 Cálculo da Acurácia e da Repetibilidade de Posição com Controlador PID

Partindo dos resultados obtidos nos Quadros E.5 e E.6, a acurácia de posição foi calculada usando a equação 6.1 e a repetibilidade de posição foi calculada usando a equação 6.5. A acurácia de posição no quadrante positivo é a média aritmética da acurácia de cada posição neste quadrante, mostrada no quadro 7.9. Portanto, a acurácia de posição do 1º quadrante é de 4,333 mm. Da mesma forma, usando a acurácia de cada ponto mostrado no quadro 7.10, a acurácia de posição do quadrante negativo é de 5,385 mm. Como cada quadrante tem o mesmo grau de importância dentro do volume de trabalho, a acurácia de posição do manipulador é calculada pela média aritmética das acurácias de cada quadrante. Portanto, a acurácia de posição do manipulador SCARA com controlador Fuzzy desenvolvido neste trabalho é de 4,859 mm.

A repetibilidade de posição calculada para o quadrante positivo de acordo com a equação 6.5 é de 12,344 mm e para o quadrante negativo é de 14,120 mm, como cada quadrante tem o mesmo grau de importância dentro do volume de trabalho, a repetibilidade do manipulador é calculada pela média aritmética das repetibilidades de cada quadrante. Portanto, a repetibilidade de posição do manipulador SCARA com controlador PID, neste trabalho, é de 13,232 mm. Segue o relatório do ensaio com o controlador PID como recomenda a norma.

Quadro 7.9 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante positivo Controlador PID.

Posições no Espaço Cartesiano	P1	P2	P3	P4	P5
Acurácia de Posição (Ap)	2,699	5,614	3,180	8,886	1,286

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 7.10 – Acurácia de posição em (mm) dos pontos do quadrante negativo Controlador PID.

Posições no Espaço Cartesiano	P1	P2	P3	P4	P5
Acurácia de Posição (Ap)	10,675	4,838	3,153	5,857	2,403

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 7.7 Relatório de Ensaio de Posição Controlador PID

### Relatório Manipulador SCARA

- Nome: MANIPULADOR CEARA;
- Tipo: SCARA;
- Número: 01;
- Instalação: Célula Didática (Laboratório Centauro);
- Programação off line de pontos de passagem (posições);
- Resolução de programa: 0.08°;
- Resolução de controle: 0.16°;
- Software: sup070616.xpr;
- Hardware: CLP Twido;
- Sistema de Controle: Controlador PID com ganhos diferentes em cada quadrante.

### Cubo de Ensaio no Espaço de tarefa (Ver Figura 7.2).

#### Condições do Ambiente

- Temperatura: 20°C.
- Horário e data: 13h30min - 07/06/2016.
- Duração: 5min.

#### Instrumentação

- Junta 1: Potenciômetro rotativo 1K $\Omega$  - 1%.
- Junta 2: Potenciômetro rotativo 1K $\Omega$  - 1%.

#### Condições do ensaio

- Massa da carga (Kg): 6,32 Kg.
- Plano de movimentação: Número 3, Plano XY (horizontal).
- Geração de trajetória: Interpolação no espaço das juntas tipo acionamento simultâneo.

#### Ensaio realizado de acordo com a norma ISO 9283

- Acurácia de posição: 4,864 mm.
- Repetibilidade de posição. 13,232 mm.

#### Conclusões do Relatório

O controlador PID apresentou um desempenho aceitável para realização do controle de posição do manipulador SCARA. Com os valores de acurácia e repetibilidade

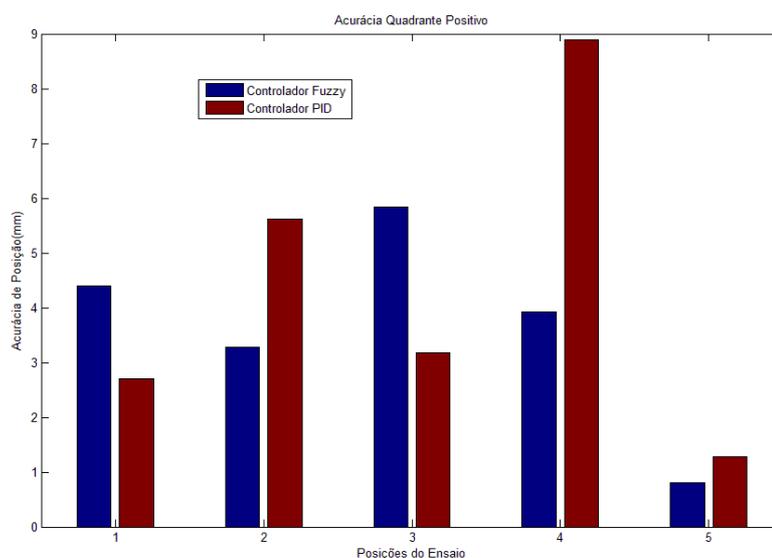
encontrados o manipulador está apto a executar tarefas de manipulação de peças, paletização, fundição e colagem.

### 7.8 Comparação das avaliações de desempenho (Fuzzy x PID)

A comparação da avaliação de desempenho de diferentes manipuladores geralmente é realizada com uma consulta ao relatório do ensaio. Analisando os relatórios, o controlador baseado em lógica Fuzzy apresentou um desempenho superior ao controlador PID adotando como métrica a acurácia e repetibilidade de posição calculadas segundo a norma ISO 9283.

A acurácia de posição apresentada por cada controlador para o quadrante positivo é mostrada na Figura 7.3. Analisando a figura, observa-se que o controlador Fuzzy é superior (menor acurácia) ao controlador PID nas posições P2, P4 e P5. Esse resultado indica menor erro no controle de posição nestes pontos de passagem. A acurácia total do controlador Fuzzy, neste quadrante, é de 3,648 mm enquanto a do controlador PID é de 4,333 mm. A acurácia de posição apresentada pelos controladores para o quadrante negativo é mostrada na Figura 7.4. Analisando a figura, observa-se que o controlador Fuzzy é superior ao controlador PID nas posições P1, P2, P3 e P4. A acurácia total do controlador Fuzzy, neste quadrante, é de 3,929 mm enquanto a do controlador PID é de 5,385 mm.

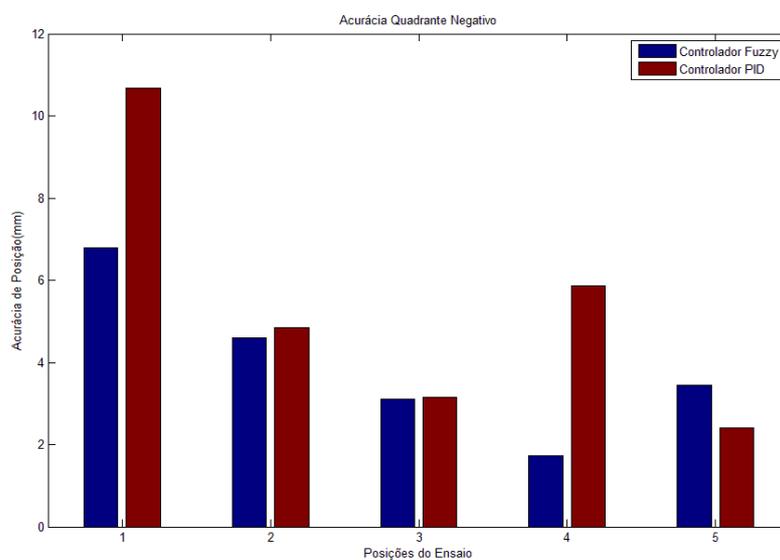
Figura 7.3 – Acurácia de posição dos controladores no quadrante positivo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

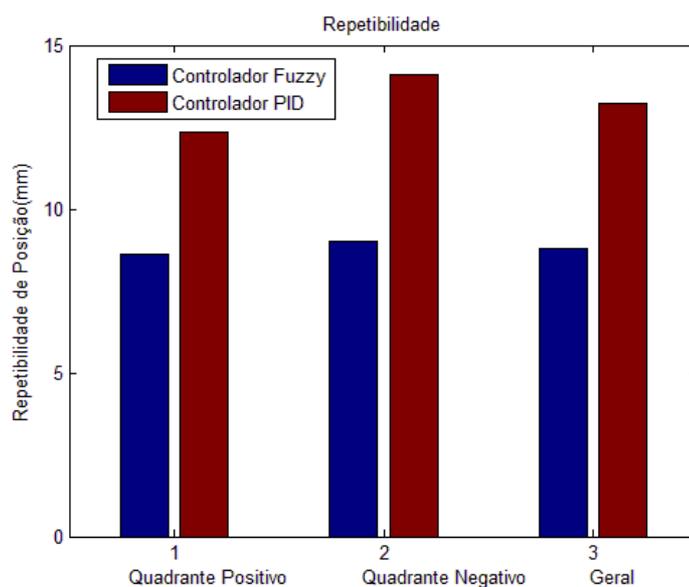
A repetibilidade de posição é mostrada na Figura 7.5. Na mesma, é mostrada a repetibilidade dos controladores em cada quadrante e o controlador baseado em lógica Fuzzy é superior em todas as medições. Por se tratar de uma medida estatística, a repetibilidade não mostra que o controlador PID foi superior ao Fuzzy em algumas posições. O controlador Fuzzy apresentou uma repetibilidade de 8,606 mm para o quadrante positivo e 9,004 para o quadrante negativo, enquanto o controlador PID foi 12,344 mm e 14,120, respectivamente.

Figura 7.4 – Acurácia de posição dos controladores no quadrante negativo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7.5 – Repetibilidade de posição dos controladores no volume de trabalho do manipulador.

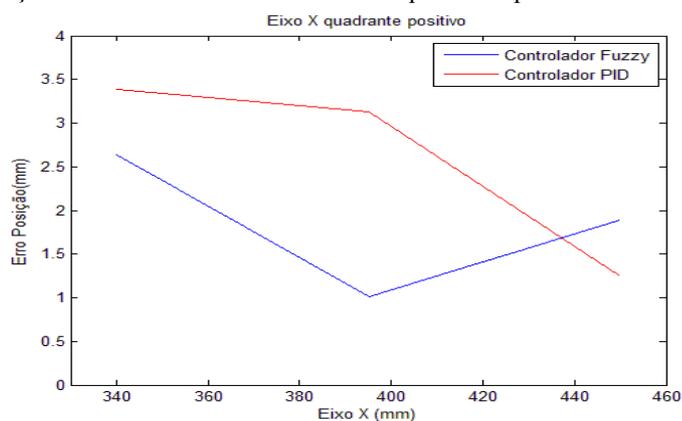


Fonte: Elaborada pelo autor.

Por sua vez, adotando-se outra métrica diferente da recomendada pela norma, a superioridade do controlador Fuzzy em relação ao controlador PID pode ser questionada. Adotando o *erro médio de posição* como métrica de avaliação dos controladores, outros aspectos de desempenho podem ser revelados. Essa medida consiste na média aritmética dos erros de posição durante a execução dos trinta ciclos em cada eixo do espaço cartesiano. Essa medida tem um parâmetro equivalente na norma ISO 9283 denominada *acurácia de distância*.

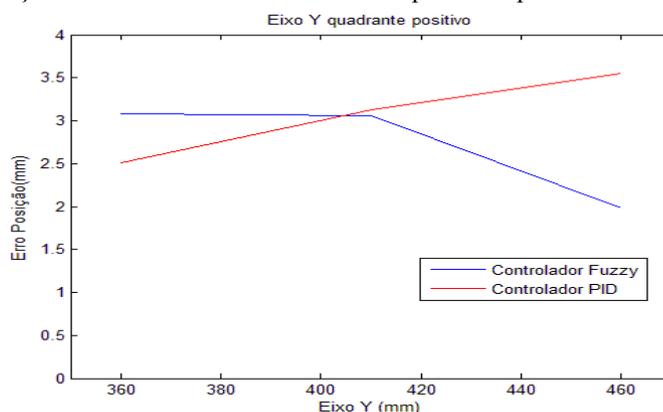
Analisando o erro médio das posições no eixo X no quadrante positivo mostrado na Figura 7.6, o controlador Fuzzy apresenta uma resposta superior ao controlador PID na maioria das posições. Porém, próximo da região onde foi realizada a sua sintonia, o controlador PID apresenta uma resposta superior com menor erro de posição. Na Figura 7.7 é analisado o erro médio das posições no eixo Y do quadrante positivo e, neste eixo, os controladores apresentaram um comportamento aproximadamente igual em termos de desempenho, com o controlador Fuzzy apresentando um maior erro de posição próximo da posição 460 mm.

Figura 7.6 – Erro de posição dos controladores no eixo X do quadrante positivo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

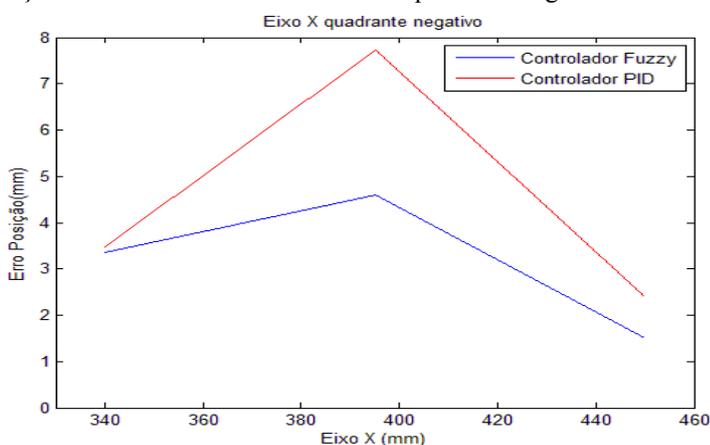
Figura 7.7 – Erro de posição dos controladores no eixo Y do quadrante positivo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

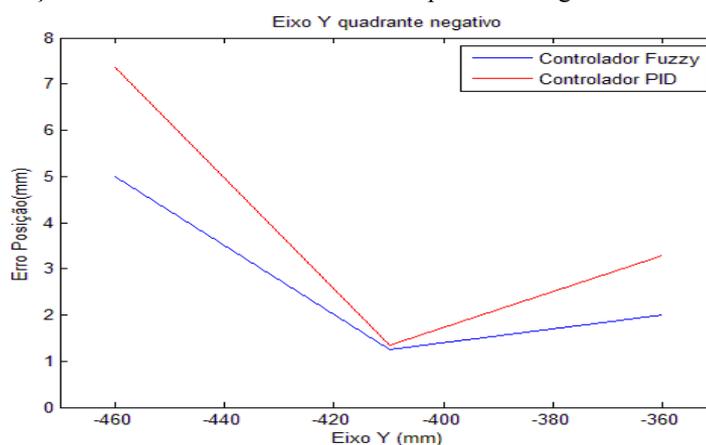
Analisando o quadrante negativo, o erro médio das posições no eixo X é mostrado na Figura 7.8, a qual indica que o controlador Fuzzy apresenta um erro médio de posição menor em todas as posições do eixo X. Na Figura 7.9, é analisado o erro médio das posições no eixo Y do quadrante positivo; nela, o controlador Fuzzy apresenta novamente um erro médio de posição menor em todas as posições do eixo Y. Porém é observado que, próximo da região onde foi realizada sua sintonia do controlador PID, ele apresenta o menor erro médio de posição. Outro aspecto importante é que a curva de resposta de cada controlador apresenta uma forma semelhante, isso indica que problemas como a comutação das saídas a relé e as não linearidades duras afetam igualmente ambos os controladores na execução das tarefas.

Figura 7.8 – Erro de posição dos controladores no eixo X do quadrante negativo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7.9 – Erro de posição dos controladores no eixo Y do quadrante negativo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 8.1 Contribuições do trabalho

Adotando uma abordagem mais quantitativa, o autor divide as contribuições deste trabalho em três grupos. O primeiro grupo denominado Contribuições Científicas que tratam dos aspectos mais teóricos do trabalho e da formação do próprio autor durante o curso de mestrado; o segundo grupo, Contribuições Tecnológicas, trata das contribuições que o trabalho apresenta para a indústria de modo geral e em particular para automação robotizada porque um manipulador é uma máquina multifuncional que pode atuar em qualquer processo produtivo. O terceiro grupo, Contribuições Pedagógicas, vem ressaltar o legado deste trabalho para professores e alunos que poderão fazer uso do equipamento e da metodologia desta pesquisa em suas práticas pedagógicas.

#### 8.1.1 Contribuições Científicas

- Modelagem matemática da cinemática e dinâmica do manipulador com validação dos resultados por meio dos experimentos;
- A pesquisa sobre controle Fuzzy em que foi abordado o projeto de desenvolvimento e a análise de estabilidade de controladores Fuzzy;
- Caracterização da acurácia e da repetibilidade do manipulador nas principais regiões do seu volume de trabalho;
- Avaliação de desempenho de um manipulador industrial com controlador baseado em lógica Fuzzy tipo Sugeno e sua comparação com o controlador convencional PID;
- Publicação de quatro artigos em congressos durante o curso de mestrado são eles:

- 1) SILVA, José L. N.; BATISTA, J. G.; THÉ, G. A. P., **Proposta de Planejamento e Controle de Trajetória para Manipuladores Industriais**, Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, MG, 20 a 24 set. 2014.

- 2) SILVA, José L. N.; BATISTA, J. G.; THÉ, G. A. P. **Controle de Posição de Manipulador Eletropneumático com Redes Neurais**, Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, MG, 20 a 24 de Setembro de 2014.
- 3) SILVA, J. L. N.; REGES, J. P.; BATISTA, J. G.; FILHO, J. R. M. F. Robô Diferencial com Inteligência Baseada em Lógica Fuzzy. In: **IX Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**, 2014, SÃO LUIS, MA. ANAIS DO IX CONNEPI.
- 4) BATISTA, J. G.; SILVA, José L. N.; PEREIRA, N. S.; THÉ, G. A. P., Modelagem Matemática e Simulação Computacional da Dinâmica de um Robô SCARA, In: **Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações - DINCON2015**, 2015, Natal, RN.

### 8.1.2 Contribuições Tecnológicas

- *Retrofitting* de manipulador industrial, deixando-o apto a realizar tarefas industriais em que seja necessário o controle de posição, usando tecnologia industrial comercial de relativo baixo custo e programável (parametrizada);
- O trabalho apresenta um manipulador robótico industrial como um sistema aberto tecnologicamente, detalhando sistema de acionamento e de controle;
- Implementação do controlador Fuzzy em um controlador industrial tipo CLP de pequeno porte sem pacote computacional do fabricante específico para controle Fuzzy;
- Este trabalho mostrou que o *retrofitting* de manipuladores antigos pode ser realizado com excelentes resultados, obtendo um manipulador de arquitetura aberta investindo uma fração do custo de aquisição de um manipulador novo;
- Aplicação da norma internacional ISO 9283 para avaliação de desempenho de manipuladores industriais;

### 8.1.3 Contribuições Pedagógicas

- Neste trabalho, foi desenvolvida uma célula de manufatura robotizada industrial com tecnologia aberta em que os parâmetros e os controladores podem ser reprogramados para ensino da robótica de manipuladores aos alunos de graduação e pós-graduação de engenharia;
- O ensino da robótica no curso de engenharia de teleinformática usou a célula de manufatura desenvolvida neste trabalho no semestre 2015.2.

### 8.2 Sugestões de trabalhos futuros

- Validar o controlador Fuzzy para os demais graus de liberdade do manipulador, com a aquisição de mais dois inversores, dois cartões analógicos, dois sensores para medição dos ângulos das juntas três e quatro. Dessa forma, uma nova modelagem matemática que inclua a dinâmica completa do manipulador com quatro graus de liberdade deve ser construída;
- Modelagem do atraso no sinal de controle gerado pelo controlador Fuzzy embarcado no CLP. Esse atraso é em função de a saída ser a relé e não transistorizada. Neste modelo também incluir a taxa de discretização e o ciclo de *scan* do CLP;
- Modelar atrito, saturação, zona morta, histerese e folgas para obter um modelo mais completo da dinâmica do manipulador, utilizando técnicas de identificação ou técnicas de inteligência artificial nesta tarefa;
- Instalar fim de curso eletromecânico em cada junta para realizar ensaios de seguimento de trajetória com as mesmas no intervalo de  $-135^\circ$  a  $135^\circ$ . Nesse caso, outros cubos e paralelepípedos dentro do volume de trabalho poderão ser selecionados para ensaios. Também, nesse sentido, viabilizar a substituição dos potenciômetros por encoders rotativos, assim seria possível medir além da posição a velocidade da junta com a modelagem da matriz jacobiana do manipulador;
- Como o controlador Fuzzy atendeu às especificações das normas internacionais no controle de posição, em um trabalho futuro será verificar seu desempenho na tarefa de desvio de obstáculo com geração de trajetória em tempo real.

Como mostrado pelo autor em (SILVA, 2014) utilizando campos potenciais artificiais.

- Partindo da modelagem física da dinâmica do manipulador no espaço de estado, construir modelos locais lineares e assim controlar o manipulador por meio de reguladores e observadores Takagi-Sugeno no espaço de estado. Dessa maneira, será possível uma análise de estabilidade no sentido de Lyapunov, análise da taxa de decaimento e restrição como saturação na entrada (AGUIRRE, 2007).
- Implementar um gerador de trajetória baseado na especificação da tarefa e melhor performance, um conceito diferente do convencional que consiste em gerar trajetórias temporais em função das variações de posição. Como sugestão utilizar a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) associada ao controlador Fuzzy desenvolvido neste trabalho. Portanto desenvolver um sistema híbrido Neuro-Fuzzy.

### 8.3 Conclusão do trabalho

Neste trabalho, foi projetado e executado o *retrofitting* de um manipulador robótico. Esse fato consiste na principal nossa principal contribuição tecnológica e possibilitou ao autor realizar uma atividade dentro dos padrões da indústria. Outro fato que foi fundamental para este trabalho apresentar relevância foi o compromisso de embarcar em um CLP um controlador Fuzzy. Adotando como métrica a norma ISO 9283 para avaliar o desempenho do controlador Fuzzy no controle de posição, a principal conclusão deste trabalho é que ele atende aos requisitos da norma para tarefas de controle de posição. Os valores obtidos de Acurácia de posição (3,788 mm) e repetibilidade de posição (8,805 mm) deixam claro que a solução tecnológica proposta aqui está apta a realizar várias tarefas industriais como soldagem a ponto e manipulação de peças.

Também se conclui que a tecnologia empregada (CLP, Inversores, Potenciômetros) limitou os resultados, porque embora sejam todos industriais não são específicos para controle de posição em manipuladores, principalmente as saídas à relé do CLP. A experiência na indústria mostra que com saídas transistorizadas essas medidas estariam em décimos de milímetros. O desenvolvimento de uma célula robotizada e todo seu projeto de automação e controle é uma tarefa árdua que requereu muita pesquisa e o auxílio

de profissionais de várias áreas. Portanto, pode-se afirmar que os dois objetivos definidos como principais no item 1.4 deste trabalho foram atingidos.

Neste trabalho, esteve presente em cada etapa a metodologia de trabalho científico. Portanto, o projeto do controlador Fuzzy para atingir o melhor desempenho e a adoção de um critério de estabilidade específico foi fundamental. Outra conclusão importante foi em relação ao controlador PID utilizado para o controle de posição. Os resultados mostram que, próximo da região da posição onde foi realizada a sintonia e o ajuste dos ganhos, o controlador PID é superior ao controlador Fuzzy, porém, nos demais pontos do volume de trabalho do manipulador, isso não ocorre. Portanto, o controlador PID deve apresentar ganhos em função da posição. Além disso, o controlador Fuzzy foi projetado com parâmetros constantes em todo o volume de trabalho.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. (ED.). **Enciclopédia de automática: controle e automação**. 1. ed. São Paulo: Blucher, Sistemas Lineares e Sistemas Não-lineares, v. I, 2007.

\_\_\_\_\_. **Enciclopédia de automática: controle e automação**. 1. ed. São Paulo: Blucher, Sistemas Lineares e Sistemas Não-lineares, vol. II, 2007.

\_\_\_\_\_. **Enciclopédia de automática: controle e automação**. 1. ed. São Paulo: Blucher, Sistemas Inteligentes e Robótica, v. III, 2007.

ALMEIDA, A. W. **Modelagem e controle de sistemas dinâmicos utilizando reguladores fuzzy tsk com pdc: projeto e análise de estabilidade via LMI**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática e Computacional, 2012.

ALTROCK, Constantin Von. **Recent successful fuzzy logic applications in industrial automation**, IEEE Transactions on Systems, 1996.

AYAS, M.S.; DANAYIYEN, Y.; ALTAS, I. H. **Design of a fuzzy logic controller for a 2-DOF robot manipulator**. International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2013.

BACHIR, Ouamri. Computed torque control of a puma 600 robot by using fuzzy logic. **International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.)**, v. 4, n.2, 2011.

BAN, Xiaojun; GAO, X. Z.; HUANG, Xianlin; YIN, Hang. Stability Analysis of the Simplest Takagi-Sugeno Fuzzy Control System Using Popov Criterion. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control**, v. 3, 2007.

BATISTA, J. G., SANTIAGO, T. S. Modeling of AC Servomotor Using Genetic Algorithm and Tests for Control of a Robotic Joint. **International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering**, v.8 n.2, 2014.

BATISTA, J. G.; SILVA, José L. N.; PEREIRA, N. S.; THÉ, G. A. P., Modelagem matemática e simulação computacional da dinâmica de um robô SCARA, In: **Conferência brasileira de dinâmica, controle e aplicações - DINCON2015**, 2015, Natal, RN, 2015.

BARRIENTOS, Antonio. **Fundamentos de robótica**. Editora Mcgraw-Hill, Madrid, Espanha, 2007.

BHUSHAN, Bharat. Takagi-Sugeno Fuzzy System Based Stable Direct Adaptive Control of Nonlinear systems. **International Journal of Computer Applications (0975-8887)**, v. 68, n. 15, p. 30-36, 2013.

\_\_\_\_\_. **Position control of two link robot system by PD & fuzzy controller**, 6th IEEE Power India International Conference (PIICON), 2014.

BREEDON, P. J.; SIVAYOGANATHAN, K.; BALENDRAN, V. **Multi-axis fuzzy control and performance analysis for an industrial robot**. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2002.

BRETHER, J. F., DAKYO, B. D. **Determination of the repeatability of a kuka robot using the stochastic ellipsoid approach**, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4339-4344, 2005.

CAMPOS, Mario M.; SAITO, Katu. **Sistemas inteligentes em controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2004.

CHEN, Yuan; MA, Guangying; LIN, Shuxia. Adaptive fuzzy computed-torque control for robot manipulator with uncertain dynamics. **International Journal of Advanced Robotic systems**, INTECH, v. 9, 2012.

CHO, Yuong-Wan; SEO, Ki-Sung. A direct adaptive fuzzy control of nonlinear systems with application to robot manipulator tracking control. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, v. 5, n. 6, p. 630-642, 2007.

CHOI, Byung-Jae; KWAK, Seong-Woo. Design and stability analysis of single-input fuzzy logic controller. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 30, p.303 – 309, 2000.

CHOSSET, H.; LYNCH, K.; HUTCHINSON S.; KANTOR, G.; BURGARD, W.; KAVRAKI; LEATHRUM, S. **Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementations**, The MIT Press, 2005.

CRAIG, John J. **Robótica**. 3 ed., São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

CASANOVA, C. C. **Modelagem e compensação de atrito em robôs manipuladores com flexibilidades nas juntas: identificação, análise e resultados experimentais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

CASTRUCCI, Plínio B. L.; CURTI, Rino. **Série controle automático de sistemas dinâmicos**, v. 2, Sistemas Não-Lineares, São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

CONRAD, Kevin L., SHIAKOLAS, Panayiotis S. **Robotic calibration issues: accuracy, repeatability and calibration**, proceedings of the 8<sup>th</sup> mediterranean conference on control & automation (MED 2000), GREECE, 2000.

CUESTA, Federico. Stability analysis of nonlinear multivariable takagi-sugeno fuzzy control systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 7, n. 5, 1999.

DENAVIT, J. E; HARTENBERG, R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanism based on matrices. **Journal of Applied Mechanics**, p. 215-221, 1955.

DIOGO, D. N. T Proença. Modelo Fuzzy Takagi-Sugeno para controle do ângulo de articulação do joelho de pacientes paraplégicos. **Semina: ciências exatas e tecnológicas**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 215-228, 2012.

DUKA, Adrian-Vasile. **PLC implementation of a fuzzy system**, The 6<sup>th</sup> edition of the interdisciplinarity in engineering international conference “Petru Maior” University of Tîrgu Mureş, p. 317-321, Romania, 2012.

ENGELBRECHT, Andries P. **Computacional intelligence an introduction**, Wiley & Sons. ISBN 0-470-84870-7, 2007.

ERBATUR, Kemaletin. **A study os fuzzy schemes for control of robotic manipulators**. IEEE Transactions on Systems, 1995.

ESTEVES, Talita T.; TEIXEIRA, Marcelo C. M. **Análise da estabilidade de sistemas fuzzy takagi-sugeno utilizando funções de lyapunov fuzzy**. X SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São João Del-Rei, MG, Brasil, 2011.

FARIA, Flávio A.; SILVA, Geraldo N. Análise de estabilidade de sistemas fuzzy usando funções lyapunov fuzzy. In: **Conferência brasileira de dinâmica, controle e aplicações - DINCON2010**, Serra Negra, SP, 2010.

FAROOQ, Umar; HASAN, K. M. **Comparative analysis of zero order sugeno and mamdani fuzzy logic controllers for obstacle avoidance behavior in mobile robot navigation**. International Conference and Workshop on Current Trends in Information Technology (CTIT), p.113 – 119. IEEE Conference Publications, 2011.

FILIPESCU, A.; FILIPESCU, S.; MINCA, E. **Hybrid system control of an assembly/disassembly mechatronic line using robotic manipulator mounted on mobile platform**. 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012.

FRANCHI, Clailton M. **Acionamentos elétricos**. São Paulo, Érica, 2007.

FURUTANI, Eiko; SAEKI, Masami; ARAKI, Mituhiko. Shifted popov criterion and stability analysis of fuzzy control systems. In: **Proceedings of the 31 th IEEE Conference on Decision and Control**, p. 2790-2795, Tucson, AZ, 1992.

GEROMEL, José C.; KOROGUI, Rubens H. **Controle linear de sistemas dinâmicos: teoria, ensaios práticos e exercícios**, São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

GOSWAMI, A.; QUAID, A.; PESHKIN, M. Complete parameter identification of a robot from partial pose information, proceedings of the 1993. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, v.1, p. 168-173, 1993.

HANYING, Mao. **Research of fuzzy PID controller implementation method based on PLC, seventh**. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE, 2015.

ISMAIL, Ahmad R.; AZMI Hassan. **The repeatability analysis of industrial robot under loaded conditions and various distances**. 8th WSEAS Int. Conf. on Robotics, Control and Manufacturing Technology (ROCOM '08), Hangzhou, China, 2008.

IFR. **International federation of robotic, IFR**. [S.l.], 2013. Acessado em 27 fev. 2016. Disponível em: <<http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>>.

ISO 9787. **Manipulating industrial robots: coordinate systems and motions**. ISO Publications, 1 ed., França, 1990.

ISO 9283. **Manipulating industrial robots: performance criteria and related test methods**. ISO Publications, 2 ed., França, 1998.

JAISWAL, Nitesh K.; KUMAR, Vijay. **Comparison between conventional PID and fuzzy PID supervisor for 3-DOF scara type robot manipulator**, 2014 IEEE Student's Conference On Electrical, Eletronics and Computer Science, 2014.

JAISWAL, Nitesh K. 3- DOF scara type robot manipulator using mamdani based fuzzy controller. **International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)**, ISSN 2278 – 0882 – v. 3, Issue 3, 2014.

JIA, Baozhu; REN, Guang; LONG, Gang. **Design and stability analysis of fuzzy switching pid controller**. Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, China, 2006.

LEONARDI, Fabrizio. **Controle essencial**, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

LEWIS, L. F.; DAWSON, M. D.; ABDALLAH, T. C. **Robot manipulator control: theory and pratice**, marcel dekker, New York, 2004.

LIU, Junyi. **Four degrees of freedom SCARA robot modeling and simulation**. International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2014.

LO, Ji-Chang; LIN, Min-Long. **Feedback control via Popov for fuzzy systems with input saturations**. Proceedings in IEEE International Conference on Fuzzy Systems, v. 3, 2004.

LOPES, Isaias L.; SANTOS, F. A. O.; PINHEIRO, C. M. **Inteligência Artificial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LU, Hongqian; CAO, Kairui; BAN, Xiaojun. **Stability analysis for a type of T-S fuzzy control systems using integral quadratic constraints**. 9<sup>th</sup> International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2012.

KOCIAN, J.; KOZIOREK J. Implementation of Fuzzy Logic Control on PLC. In: **Technical program at IEEE ETFA**, 2011.

KOCIAN, J. **An approach to PLC-based fuzzy control**. The 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, 2011.

- KOSKO, B. **Neural networks and fuzzy systems**, Prentice Hall, 1992.
- KÖRÖSI, Ladila; TURCSEK, Dávid. **Fuzzy system for PLC, faculty of electrical engineering and information technology**. Slovak University of Technology, 2011.
- KOVÁCS, Zsolt L. **Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações**. 4 ed., São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.
- KUMBASAR, Tufan. **Robust stability analysis of PD type single input interval type-2 fuzzy control systems**. IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), p. 634-639, China, 2014.
- MAMDANI, E. H. E; ASSILAN, S. An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies** v.7, p. 1-13, 1975.
- MAMDANI, E. H. E. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. **IEEE Transactions on Computers**, v. C-26, n. 12, p. 1182-1191, 1977.
- MATARIC, M. J. **Introdução à robótica**. 1 ed., São Paulo: Editora Unesp/Blucher, 2014.
- MATLAB. **Fuzzy logic toolbox®**, 2012.
- MAUER, Georg F. A fuzzy logic controller for an abs braking system. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 3, n. 4, p. 381-388, 1995.
- MBEDE, Jean B. **Fuzzy motion planning among dynamic obstacles using artificial potential fields for robot manipulators, robotics and autonomous systems, elsevier science**, p. 61-72, 2000.
- MBEDE, Jean B., HUANG, Xu; WANG, M. Robust neuro-fuzzy sensor-based motion control among dynamics obstacles for robot manipulators. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 11, issue. 2, p. 249-261, 2003.
- MEZA, J. L. Fuzzy self-tuning PID semiglobal regulator for robot manipulators. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 6, june 2012.
- MITTAL, R. K.; NAGRATH, I. J. **Robotics and control**, TMH Publications, 2011.
- MORAES, Cícero C. **Engenharia de automação industrial**, 2 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- MOUSAVI, Ali; AKBARZADEH, Alireza. **Repeatability analysis of a SCARA robot with planetary gearbox**. 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 2015.
- MOZELLI, Leonardo A. **Controle fuzzy para sistemas takagi-sugeno: condições aprimoradas e aplicações**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, 2008.

NAGANNA, G. E.; KUMAR, Surrendra. **Convencional and intelligent controllers for robotic manipulator**. IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT, 2006.

NASCIMENTO, C. L.; YONEYAMA, T. **Inteligência artificial em controle e automação**, Ed. Edgard Blucher Lda, 2000.

NAWROCKA, Agata. **Fuzzy logic controller for rehabilitation robot manipulator**. IEE Transactions on Fuzzy Systems, pp. 379-382, 2014.

NIKU, Seed B. **Introdução à robótica: análise, controle, aplicações**, 1 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

NUNES, L. E. N. P. **Geração e otimização de trajetória de um manipulador robótico utilizando algoritmos genéticos**. 135f. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2007.

ONDEROVÁ, Iveta; KOLLÁTH, L'udovít. **Testing and verification of selected technological parameters of the PKS**. IEEE Conference Publications, 15th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2014.

OSMIC, Jakub; PRLJACA, Naser. **Sufficient conditions for absolute stability and optimization using genetic algorithms od specific class of fuzzy logic controllers**. International Conference on Internet Computing in Science and Engineering, 2008.

PADOIN, Eduardo; MENUZZI, Odair; VALDIERO, Antonio C.; RASIA, Luis A. Simulação computacional da não linearidade de folga nas juntas de manipuladores robóticos, In: **Conferência brasileira de dinâmica, controle e aplicações - DINCON2010**, Serra Negra, SP, 2010.

PARK Kyoung-Taik; PARK, Chan-Hun; SHIN, Young-Jae. **Performance evaluation of industrial dual-arm robot, international conference on smart manufacturing application**, 2008.

PASSOLD, Fernando. **Controle neural de posição e força em manipuladores robóticos**. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de doutor em engenharia elétrica, 2003.

PAUL, Richard P. **Robot manipulators: Mathematics, Programming and Control**. The MIT Press, Massachusetts, 1981.

PÉREZ, Isaías G. **Fuzzy controller on PLC S7-1200 application to a servomotor**. 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2014.

POPOV, V. M. **absolute stability of nonlinear control systems of automatic control, automation remote control**. v. 22, p. 857-875, 1962.

PRECUP, Radu-Emil; HELLENDORRN, Hans. A survey on industrial applications of fuzzy control. **Journal Computers in Industry** 62, p 213-226, 2011.

PRUDENTE, Francesco. **Automação industrial: PLC, teoria e aplicações**, Rio de Janeiro: LTC, 2007.

\_\_\_\_\_. **Automação industrial: PLC, programação e instalação**, Rio de Janeiro: LTC, 2010.

RECEANU, Danut. Modeling and simulation of the nonlinear computed torque control in simulink/matlab for an industrial robot. **Tech Science Press SL**, v.10, n.2, p.95-106, 2013.

ROMANO, Victor F. **Robótica industrial: Aplicações na indústria de manufatura e de processos**. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2002.

ROMERO, Roseli A. F. **Robótica móvel**. 1 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SAHIN, Yusuf. Neuro-fuzzy trajectory control of a SCARA robot. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 2, p. 298-302, 2010.

SAHOO, N. C. A current modulation scheme for direct torque control of switched reluctance motor using fuzzy logic, mechatronics. **The Science of Intelligent Machines**, v. 10, n. 3, p. 353-370, 2000.

SANTIBAÑEZ, Victor; KELLY, Rafael. Global asymptotic stability of a tracking sectorial fuzzy controller for robot manipulators. **IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics**, v. 34, n. 1, 2004.

SIFUENTES-MIJARES, Juan. **A globally asymptotically stable nonlinear pid regulator with fuzzy self-tuned pd gains, for robot manipulators**. World Automation Congress, Waikoloa Hilton Village, Kona, Big Island of Hawaii, 2014.

SICILIANO, Bruno, SCIAVICCO, L. **Robotics: modelling, planning and control**. Springer Publishing Company, Inc, 2009.

SHAW, Ian S.; SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

SHHEIBIA, T. A. **Controle de um braço robótico utilizando uma abordagem de agente inteligente**. 84f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

SCHNEIDER ELECTRIC, Twido P.L.C. **Programming guide**, 2011.

SILVA, Sidnei Domingues da. **CNC: programação de comandos numéricos computadorizados - torneamento**, São Paulo: Érica, 2002.

SILVA, Jobson F. **Construção e controle inteligente de um manipulador robótico com dois graus de liberdade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.

SILVA, José L. N. Proposta de planejamento e controle de trajetória para manipuladores industriais. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática**, Belo Horizonte, MG, 20 a 24 set. 2014.

\_\_\_\_\_. Controle de posição de manipulador eletropneumático com redes neurais. In. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática**, Belo Horizonte, MG, 20 a 24 Set. 2014.

SILVA, J. L. N.; REGES, J. P.; BATISTA, J. G.; FILHO, J. R. M. F. Robô diferencial com inteligência baseada em lógica fuzzy. In: **IX Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**, São Luís - MA. Anais do IX CONNEPI, 2014.

SINDORF, Brent; SAEED B. Niku. **Force feedback wheelchair control, masters thesis, mechanical engineering**, Cal Poly, San Luis Obispo, 2005.

SIRINTERLIKÇI, Arif Murat Tiryakioglu. Reapeatability and accuracy of an industrial robot: laboratory experience for a design of experiments course. **The Technology Interface Journal/Spring** v. 9 n. 2, 2009.

SMRCEK, Juraj; NEUPAUER, Radovan. **Testing of intelligent robots, development and experience**. IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, 1997.

SOUZA, Rafael B. M. **Projeto de reguladores fuzzy takagisugeno utilizando as condições iniciais da planta**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista -UNESP, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, 2006.

SPONG, M.W.; HUTCHINSON, S.; AND VIDYASAGAR, M. **Robot modeling and control**, John Wiley and Sons, 2006.

SUVILATH, S., KHONGSOMBOUN, K., BENJANARASUTH, T., KOMINET, N., **IMC-based PID controllers design for a two-links SCARA robot**. Tencon 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, 2011.

SUN, Ya Lei; ER, Meng Joo. Hybrid fuzzy control of robotics systems. **IEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 12, n. 6, December 2004.

STOIAN, Viorel; IVANESCU, Mircea. **Robot control by fuzzy logic, frontiers in robotics, automation and control**, chapter 7, Edited by Alexander Zemliak, ISBN 978-953-7619-17-6, 450p, Publisher: InTech, 2008.

SVARC, Ivan. **Contributions to the application of popov and circle criterion for stability analysis**, 15th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2014.

TAKAGI, Tomohiro; SUGENO, Michio. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 15, n. 1, p. 116-132, 1985.

THANOK, Sunphong. **Design of an adaptive PD controller with dynamic friction compensation for direct-drive SCARA robot**. Proceedings of the International Electrical Engineering Congress, 2014.

TEIXEIRA, M.; PIETROBOM, H.; ASSUNÇÃO, E. Novos resultados sobre a estabilidade e controle de sistemas não-lineares utilizando modelos fuzzy e LMI. **Revista Controle e Automação**, v. 11, n. 01, p. 37-48, 2000.

TIBADUIZA, D.A. Implementación de un control fuzzy para el control cinemático directo en un robot manipulador, ingeniare. **Revista chilena de ingeniería**, v. 19 n. 3, p. 312-322, 2011.

TOMAS, Skulavik. **Fuzzy control of robotic arm implemented in PLC**, IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics ICC3, 2013.

TSAI, Lung-Wen. **Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators**. John Wiley and Sons, 1999.

VELAGIC, J.; AKSAMOVIC, A. **Fuzzy logic system for position control and current stabilization of a robot manipulator**. The International Conference on Computer as a Tool, 2005, EUROCON, 2005.

WEG AUTOMAÇÃO. **Guia de aplicação de servo acionamentos**, 2003.

\_\_\_\_\_. **Guia de aplicação de inversores de frequência**, 2003.

ELIPSE SCADA. **Manual do usuário**, 2010.

WU, Bing-Fei; MA, Li-Shan. **Absolute stability analysis in uncertain static fuzzy control systems with the parametric robust Popov criterion, fuzzy systems**. IEEE World Congress on Computational Intelligence. p. 1325 – 1330, FUZZY-IEEE, 2008.

YAMASHITA, Kemichi; SUYITNO, Amin. **Stability Analysis for Classes of Nonlinear Fuzzy Control Systems**, Proceedings of the IECON93, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993.

YINHUAN, Zheng. **Research on fuzzy logic control of vehicle suspension system**, International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010.

ZADEH, Lotfi Aliasker. **Fuzzy sets, information and control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

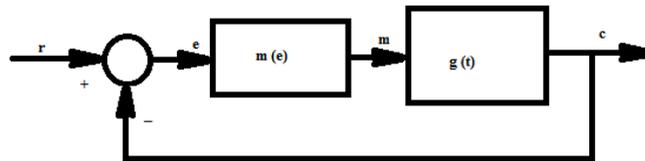
ZHAO, Yongqian; LEQUOC, Sinh; SAAD, Maarouf. **Nonlinear fuzzy control on a hydraulic servo system, proceedings of the american control conference**, Philadelphia, Pennsylvania, 1998.

## APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÃO DO CRITÉRIO DE POPOV

Segue a demonstração do critério de Popov desenvolvida a partir dos seguintes trabalhos (GEROMEL, 2011; AGUIRRE, 2007; CASTRUCCI, 1981; POPOV, 1962). O critério de Popov pode ser obtido como decorrência do lema de Kalman-Yakubovich que trata da teoria de Estabilidade de Lyapunov para sistemas não lineares e condições no domínio das frequências. Seja o sistema dinâmico da Figura A.1, para maior simplicidade na parte algébrica, substitua-se a notação  $m(t) = m(e(t))$ , do bloco não linear por:

$$m(t) = \mu(e(t)) \quad (\text{A.1})$$

Figura A.1 – Sistema dinâmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Interessa a estabilidade da origem para o sistema não excitado, isto é, para  $r(t) = 0, \forall t$ ; então:

$$m = -\mu(c) \quad (\text{A.2})$$

É necessário também descrever o bloco linear SISO da Figura A.1 pela sua representação no espaço de estado:

$$\dot{X} = Ax + bm \quad (\text{A.3})$$

$$c = h^T x + \rho m \quad (\text{A.4})$$

Será adotado em esta formulação em detrimento ao modelo em função de transferência  $G(s)$ . Quando conveniente, pode-se utilizar a conhecida equivalência:

$$G(s) = \rho + h^T (sI - A)^{-1} b \quad (\text{A.5})$$

São hipóteses:

- $\mu(c)$ , função real contínua com  $c \cdot \mu(c) \geq 0$ ;
- $0 \leq \mu(c)/c < K$ , isto é,  $\mu(c)$  pertence ao setor  $[0, K)$ ;

Como candidata para função de Lyapunov do sistema da Figura A.1 adota-se:

$$V(x) = \frac{1}{2} x^T P x + \beta \left[ \int_0^c \mu(\xi) d\xi + \frac{1}{2} \rho m^2 \right] \quad (\text{A.6})$$

Com  $P$  simétrica e definida positiva,  $\beta \geq 0$  e  $\rho \geq 0$ . A derivada total  $\dot{V}(x)$  sobre as trajetórias de (A.2) (A.3) (A.4) calcula-se da seguinte maneira:

$$\dot{V}(x) = \frac{1}{2} \left( x^T P \dot{x} + \dot{x}^T P x \right) + \beta (\mu(c) \dot{c} + \rho m \dot{m}) \quad (\text{A.7})$$

Derivando (A.4) em relação ao tempo, tem-se:

$$\dot{m} = \left( \dot{c} - h^T \dot{x} \right) / \rho \quad (\text{A.8})$$

Substituindo  $\dot{x}$ , em (A.7) e (A.8), por:

$$\dot{x} = A x - b \mu(c) \quad (\text{A.9})$$

E rearranjando o resultado, obtém-se:

$$\dot{V}(x) = \frac{1}{2} x^T (P A + A^T P) x - \mu(c) x^T (P b - \beta A^T h) - \beta \mu^2(c) b^T h \quad (\text{A.10})$$

Onde  $\gamma$  é um número qualquer não nulo; por outro lado:

$$\gamma [c \mu(c) (\mu(c) K^{-1} c^{-1}) - K^{-1} \mu^2(c)] \equiv 0 \quad (\text{A.11})$$

$$\gamma \mu(c) [x^T h - c - \rho \mu(c)] \equiv 0 \quad (\text{A.12})$$

(A.12) resulta de (A.4) e (A.2).

Somando os primeiros membros de (A.11) e (A.12) a (A.10) e rearranjando, temos:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = & \frac{1}{2} x^T (A^T P + P A) x - \mu(c) x^T (P b - \beta A^T h - \gamma h) + \\ & - [\beta h^T b + \gamma (\rho + K^{-1})] \mu^2(c) - \gamma \mu(c) (1 - \mu(c) / c) \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

Identificando os parâmetros  $\psi$  e  $K$  por meio de:

$$\beta h^T b + \gamma (\rho + K^{-1}) \equiv \frac{1}{2} \psi \quad (\text{A.14})$$

$$\beta A^T h + \gamma h \equiv K \quad (\text{A.15})$$

Resulta em:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = & \frac{1}{2} x^T (A^T P + P A) x - \mu(c) x^T (P b - K) + \\ & - \mu^2(c) \psi / 2 - \gamma \mu(c) (1 - \mu(c) / K c) \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

A última parcela de (A.16) é uma função  $-n(c)$ , semi-definida negativa, devido às hipóteses (a) e (b), se  $\gamma \geq 0$ ; quanto à soma das outras, o *Lema de Kalman-Yakubovich* afirma que existem matrizes  $P = P^T > 0$ ,  $M = M^T > 0$  e um vetor real  $q$  satisfazendo a:

$$A^T P + PA = -qq^T - M \quad (\text{A.17})$$

$$Pb - K = \sqrt{\psi} q \quad (\text{A.18})$$

Se e somente se:

$$H(s) \equiv \frac{1}{2} \psi + K^T (sI - A)^{-1} b \quad (\text{A.19})$$

É real positiva.

Sendo (A.17) e (A.18) verdadeiras (A.16) pode ser posta sob a forma:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \frac{1}{2} x^T (-qq^T - M)x - \mu(c) \sqrt{\psi} x^T q - \mu^2(c) \frac{\psi}{2} - n(c) = \\ &= \frac{-1}{2} x^T Mx - \frac{1}{2} [x^T q + \sqrt{\psi} \mu(c)]^2 - n(c) \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

Sendo válido o *Lema de Kalman-Yakubovich*, tem-se  $\sqrt{\psi}$  real,  $x^T q$  real e  $M > 0$ ;

$\dot{V}(x)$  é definida negativa e o sistema dinâmico dado é *globalmente assintoticamente estável*. Observando que nada se exigiu da função característica da não linearidade, controlador não linear, exceto a sua continuidade e a sua inclusão no setor  $[0, K)$ , pode-se afirmar então a existência da *estabilidade absoluta*  $[0, K)$  do sistema dinâmico (A.1) ou (A.2), (A.3), (A.4). A condição (A.19), mais as hipóteses  $\beta \geq 0$ ,  $\rho \geq 0$ ,  $\gamma \geq 0$ , são as condições suficientes para estabilidade absoluta.

Resta agora, para concluir a demonstração do Critério de Popov, trabalhar a condição suficiente (A.19). De fato, voltando aos parâmetros originais do sistema, por meio de (A.14) e (A.15).

$$\begin{aligned} H(s) &= \beta h^T b + \gamma(\rho + K^{-1}) + (\beta A^T h + \gamma h)^T (sI - A)^{-1} b = \\ &= \beta [h^T b + h^T A (sI - A)^{-1} b] + \gamma [(\rho + K^{-1}) + h^T (sI - A)^{-1} b] = \\ &= \beta s h^T (sI - A)^{-1} b + \gamma (G(s) + K^{-1}) \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Onde a primeira parcela foi obtida por meio da identidade:

$$I + A(sI - A)^{-1} \equiv I(sI - A)(sI - A)^{-1} + A(sI - A)^{-1} \equiv s(sI - A)^{-1}$$

Para a estabilidade, é suficiente que existam dois números  $\beta \geq 0$  e  $\gamma \geq 0$ , tais que:

$$H(s) = \beta s(G(s) - \rho) + \gamma(G(s) + K^{-1}) \quad (\text{A.22})$$

Seja real positiva.

$H(s)$  é uma função racional de  $S$  com coeficientes reais, pois  $G(s)$  também o é por hipótese. Então a função racional real positiva exige que:

- a)  $H(s)$  analítica no SPDA: verificada, pois  $G(s)$  sendo estável, não tem polos no SPDA, o mesmo ocorrendo com  $H(s)$ ;
- b)  $\text{Re } H(s) \geq 0$ , quando  $S$  percorre a curva formada pelo eixo  $j\omega$  e pela semicircunferência de raio  $\infty$  no SPD;

Essas condições são atendidas por meio da equação 4.3 deste trabalho. Dessa forma, conclui-se a demonstração do critério de Popov ao analisar as condições necessárias da planta a ser controlada.



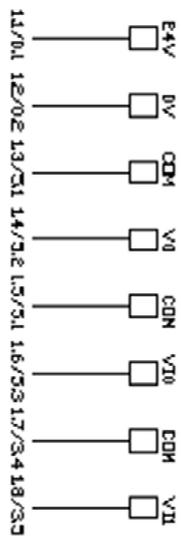
## APÊNDICE C - CIRCUITOS ELÉTRICOS DE CONTROLE

### BARRAMENTO CLP

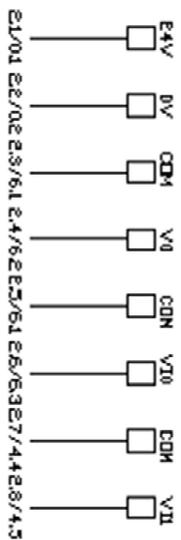
#### CPU CLP



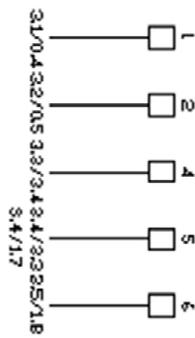
#### CARTÃO ANALÓGICO 1



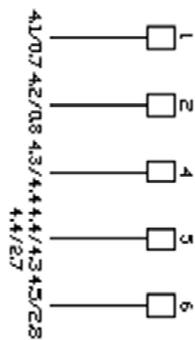
#### CARTÃO ANALÓGICO 2



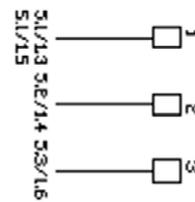
### BARRAMENTO INVERSOR J1



### BARRAMENTO INVERSOR J2



### POTÊNCIOMETRO J1



### POTÊNCIOMETRO J2



ITEM	DESCRIÇÃO	UFC	ROBÔ MANIPULADOR CENTAURO		
OCA	CHAVE CONTROLADORA P/ ALIMENTAÇÃO	DE TI	CONTROLADOR FUZZY	CIRCUITO DE CONTROLE	
OCV	CHAVE CONTROLADORA P/ VOL. TRÁFEGO				
RFF	SELE. PULSAÇÃO PAÍS				
04					
05					
06		OCD. DESENHO	DATA	ESCALA	PROJETISTA
07		03/03	13/07/2015	INDICADA	L. NUNES
08					
09					
10					

## APÊNDICE D – ENSAIO DE POSIÇÃO CONTROLADOR FUZZY

Quadro D.1 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante positivo. Coordenadas com valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refer.	1246	1682	1335	1670	1136	1945	1175	1652	1457	1208
1	1235	1688	1328	1680	1128	1944	1168	1651	1454	1216
2	1242	1684	1334	1680	1127	1944	1166	1645	1447	1211
3	1237	1684	1334	1661	1136	1940	1172	1645	1465	1218
4	1238	1680	1335	1667	1127	1939	1181	1647	1453	1198
5	1235	1688	1329	1678	1128	1940	1168	1658	1459	1206
6	1250	1688	1329	1663	1116	1947	1166	1660	1450	1216
7	1245	1683	1330	1663	1136	1944	1172	1660	1455	1218
8	1240	1674	1329	1667	1128	1947	1170	1645	1447	1218
9	1244	1687	1330	1663	1126	1947	1181	1648	1456	1211
10	1242	1684	1330	1678	1129	1948	1175	1644	1456	1213
11	1240	1681	1332	1672	1136	1944	1166	1656	1448	1216
12	1239	1685	1330	1678	1126	1949	1170	1645	1447	1215
13	1249	1685	1331	1660	1136	1939	1165	1669	1453	1198
14	1243	1670	1329	1677	1136	1948	1167	1649	1461	1218
15	1246	1683	1334	1679	1125	1941	1164	1654	1455	1216
16	1236	1684	1333	1662	1129	1949	1171	1656	1461	1218
17	1237	1683	1325	1680	1126	1941	1172	1662	1447	1218
18	1238	1675	1328	1675	1126	1948	1166	1656	1453	1213
19	1241	1678	1334	1662	1128	1940	1170	1660	1456	1217
20	1236	1685	1335	1663	1127	1935	1165	1662	1464	1218
21	1248	1683	1330	1678	1126	1950	1176	1659	1452	1213
22	1238	1680	1325	1678	1136	1940	1172	1656	1451	1216
23	1242	1684	1334	1680	1127	1944	1166	1645	1447	1211
24	1238	1680	1335	1667	1127	1939	1181	1647	1453	1198
25	1250	1688	1329	1663	1116	1947	1166	1660	1450	1216
26	1240	1674	1329	1667	1128	1947	1170	1645	1447	1218
27	1242	1684	1330	1678	1129	1948	1175	1644	1456	1213
28	1239	1685	1330	1678	1126	1949	1170	1645	1447	1215
29	1243	1670	1329	1677	1136	1948	1167	1649	1461	1218
30	1236	1684	1333	1661	1129	1949	1171	1656	1461	1218

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro D.2 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante negativo. Coordenadas com valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refér.	198	1682	118	1670	75	1945	296	1652	419	1208
1	198	1679	119	1681	76	1953	297	1648	413	1213
2	196	1675	108	1679	66	1953	297	1648	413	1209
3	188	1683	108	1663	76	1953	297	1645	413	1205
4	188	1679	119	1667	66	1954	297	1652	410	1209
5	191	1673	120	1681	66	1953	297	1648	417	1208
6	188	1679	108	1667	65	1955	297	1647	417	1205
7	199	1675	108	1664	68	1934	297	1645	419	1209
8	188	1683	118	1669	65	1953	297	1645	416	1213
9	203	1688	108	1663	66	1951	297	1660	411	1213
10	188	1675	108	1664	75	1939	297	1646	409	1205
11	188	1680	108	1675	66	1955	288	1645	409	1209
12	189	1674	108	1663	69	1953	297	1650	419	1213
13	189	1691	119	1663	76	1953	298	1650	419	1204
14	188	1684	108	1671	76	1952	298	1651	420	1208
15	199	1675	118	1663	66	1955	297	1656	418	1209
16	198	1672	108	1680	75	1951	299	1648	417	1209
17	199	1675	116	1672	72	1954	291	1645	411	1209
18	189	1674	126	1677	76	1953	297	1658	414	1209
19	188	1683	108	1668	66	1953	297	1648	419	1211
20	188	1691	108	1672	65	1952	291	1645	418	1209
21	188	1691	108	1663	76	1952	295	1650	413	1209
22	189	1692	108	1667	66	1955	297	1649	408	1213
23	187	1682	108	1665	66	1955	297	1649	412	1208
24	189	1681	119	1667	66	1953	289	1648	421	1212
25	190	1675	119	1664	66	1954	297	1653	410	1208
26	188	1675	109	1675	67	1952	293	1646	419	1208
27	195	1675	119	1672	66	1956	294	1648	419	1210
28	190	1675	120	1681	66	1953	288	1646	409	1209
29	188	1685	119	1664	75	1953	296	1650	419	1209
30	188	1683	112	1661	66	1953	298	1650	418	1209

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro D.3 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante positivo. Coordenadas convertidas para o espaço das juntas (graus) dos valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refer.	19,565	57,904	27,391	56,849	9,893	81,031	13,322	55,266	38,119	16,224
1	18,598	58,432	26,776	57,728	9,189	80,943	12,706	55,178	37,855	16,927
2	19,213	58,080	27,303	57,728	9,101	80,943	12,531	54,651	37,240	16,488
3	18,774	58,080	27,303	56,058	9,893	80,591	13,058	54,651	38,823	17,103
4	18,862	57,728	27,391	56,585	9,101	80,503	13,850	54,827	37,767	15,344
5	18,598	58,432	26,864	57,553	9,189	80,591	12,706	55,794	38,295	16,048
6	19,917	58,432	26,864	56,234	8,134	81,207	12,531	55,970	37,504	16,927
7	19,477	57,992	26,952	56,234	9,893	80,943	13,058	55,970	37,943	17,103
8	19,038	57,201	26,864	56,585	9,189	81,207	12,882	54,651	37,240	17,103
9	19,389	58,344	26,952	56,234	9,013	81,207	13,850	54,915	38,031	16,488
10	19,213	58,080	26,952	57,553	9,277	81,295	13,322	54,563	38,031	16,663
11	19,038	57,816	27,128	57,025	9,893	80,943	12,531	55,618	37,328	16,927
12	18,950	58,168	26,952	57,553	9,013	81,383	12,882	54,651	37,240	16,839
13	19,829	58,168	27,040	55,970	9,893	80,503	12,443	56,761	37,767	15,344
14	19,301	56,849	26,864	57,465	9,893	81,295	12,618	55,002	38,471	17,103
15	19,565	57,992	27,303	57,640	8,925	80,679	12,355	55,442	37,943	16,927
16	18,686	58,080	27,215	56,146	9,277	81,383	12,970	55,618	38,471	17,103
17	18,774	57,992	26,512	57,728	9,013	80,679	13,058	56,146	37,240	17,103
18	18,862	57,289	26,776	57,289	9,013	81,295	12,531	55,618	37,767	16,663
19	19,126	57,553	27,303	56,146	9,189	80,591	12,882	55,970	38,031	17,015
20	18,686	58,168	27,391	56,234	9,101	80,151	12,443	56,146	38,735	17,103
21	19,741	57,992	26,952	57,553	9,013	81,470	13,410	55,882	37,680	16,663
22	18,862	57,728	26,512	57,553	9,893	80,591	13,058	55,618	37,592	16,927
23	19,213	58,080	27,303	57,728	9,101	80,943	12,531	54,651	37,240	16,488
24	18,862	57,728	27,391	56,585	9,101	80,503	13,850	54,827	37,767	15,344
25	19,917	58,432	26,864	56,234	8,134	81,207	12,531	55,970	37,504	16,927
26	19,038	57,201	26,864	56,585	9,189	81,207	12,882	54,651	37,240	17,103
27	19,213	58,080	26,952	57,553	9,277	81,295	13,322	54,563	38,031	16,663
28	18,950	58,168	26,952	57,553	9,013	81,383	12,882	54,651	37,240	16,839
29	19,301	56,849	26,864	57,465	9,893	81,295	12,618	55,002	38,471	17,103
30	18,686	58,080	27,215	56,058	9,277	81,383	12,970	55,618	38,471	17,103

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro D.4 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante negativo. Coordenadas convertidas para o espaço das juntas (graus) dos valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refer.	-72,589	57,904	-79,624	56,849	-83,405	81,031	-63,972	55,266	-53,156	16,224
1	-72,589	57,640	-79,536	57,816	-83,317	81,734	-63,884	54,915	-53,683	16,663
2	-72,765	57,289	-80,503	57,640	-84,196	81,734	-63,884	54,915	-53,683	16,312
3	-73,468	57,992	-80,503	56,234	-83,317	81,734	-63,884	54,651	-53,683	15,960
4	-73,468	57,640	-79,536	56,585	-84,196	81,822	-63,884	55,266	-53,947	16,312
5	-73,205	57,113	-79,448	57,816	-84,196	81,734	-63,884	54,915	-53,332	16,224
6	-73,468	57,640	-80,503	56,585	-84,284	81,910	-63,884	54,827	-53,332	15,960
7	-72,501	57,289	-80,503	56,321	-84,021	80,064	-63,884	54,651	-53,156	16,312
8	-73,468	57,992	-79,624	56,761	-84,284	81,734	-63,884	54,651	-53,420	16,663
9	-72,149	58,432	-80,503	56,234	-84,196	81,558	-63,884	55,970	-53,859	16,663
10	-73,468	57,289	-80,503	56,321	-83,405	80,503	-63,884	54,739	-54,035	15,960
11	-73,468	57,728	-80,503	57,289	-84,196	81,910	-64,675	54,651	-54,035	16,312
12	-73,381	57,201	-80,503	56,234	-83,933	81,734	-63,884	55,090	-53,156	16,663
13	-73,381	58,696	-79,536	56,234	-83,317	81,734	-63,796	55,090	-53,156	15,872
14	-73,468	58,080	-80,503	56,937	-83,317	81,646	-63,796	55,178	-53,068	16,224
15	-72,501	57,289	-79,624	56,234	-84,196	81,910	-63,884	55,618	-53,244	16,312
16	-72,589	57,025	-80,503	57,728	-83,405	81,558	-63,708	54,915	-53,332	16,312
17	-72,501	57,289	-79,800	57,025	-83,669	81,822	-64,411	54,651	-53,859	16,312
18	-73,381	57,201	-78,920	57,465	-83,317	81,734	-63,884	55,794	-53,596	16,312
19	-73,468	57,992	-80,503	56,673	-84,196	81,734	-63,884	54,915	-53,156	16,488
20	-73,468	58,696	-80,503	57,025	-84,284	81,646	-64,411	54,651	-53,244	16,312
21	-73,468	58,696	-80,503	56,234	-83,317	81,646	-64,060	55,090	-53,683	16,312
22	-73,381	58,784	-80,503	56,585	-84,196	81,910	-63,884	55,002	-54,123	16,663
23	-73,556	57,904	-80,503	56,409	-84,196	81,910	-63,884	55,002	-53,771	16,224
24	-73,381	57,816	-79,536	56,585	-84,196	81,734	-64,587	54,915	-52,980	16,575
25	-73,293	57,289	-79,536	56,321	-84,196	81,822	-63,884	55,354	-53,947	16,224
26	-73,468	57,289	-80,415	57,289	-84,108	81,646	-64,235	54,739	-53,156	16,224
27	-72,853	57,289	-79,536	57,025	-84,196	81,998	-64,148	54,915	-53,156	16,400
28	-73,293	57,289	-79,448	57,816	-84,196	81,734	-64,675	54,739	-54,035	16,312
29	-73,468	58,168	-79,536	56,321	-83,405	81,734	-63,972	55,090	-53,156	16,312
30	-73,468	57,992	-80,151	56,058	-84,196	81,734	-63,796	55,090	-53,244	16,312

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro D.5 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante positivo. Coordenadas convertidas para o espaço cartesiano (mm) dos valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Refer.	394,879	410,062	340,867	459,508	339,962	360,091	450,102	359,942	450,235	459,811
1	399,056	403,970	341,204	456,296	344,818	355,892	454,370	354,913	449,351	459,876
2	396,491	407,834	336,988	459,418	345,364	355,362	458,008	352,457	456,126	453,667
3	399,609	404,780	345,690	458,534	342,264	360,120	454,743	356,659	440,762	467,913
4	400,780	404,971	342,240	459,366	347,666	355,355	448,917	363,242	456,752	454,303
5	399,056	403,970	341,420	456,731	346,659	355,890	451,378	356,110	449,570	460,655
6	389,652	413,049	348,285	455,980	349,932	349,500	451,612	355,062	452,165	457,109
7	395,059	409,556	347,585	456,514	340,422	360,098	448,324	359,205	447,891	461,094
8	402,221	405,554	346,456	456,196	343,437	355,885	455,836	355,262	453,518	455,560
9	393,888	409,346	347,585	456,514	344,527	354,829	448,488	363,410	449,817	459,924
10	396,491	407,834	340,718	457,254	342,430	356,408	453,523	358,576	449,066	460,457
11	399,087	406,304	342,063	458,029	340,422	360,098	453,324	354,381	453,566	455,718
12	397,916	406,107	340,718	457,254	343,606	354,824	455,836	355,262	454,638	454,752
13	391,637	412,166	348,255	456,882	342,724	360,123	448,293	355,866	456,752	454,303
14	402,139	406,967	341,878	456,686	338,581	360,066	455,766	353,866	443,626	465,198
15	394,430	410,162	337,446	459,378	347,834	354,294	455,263	352,642	448,644	460,565
16	400,230	404,166	345,937	458,056	341,969	356,403	450,591	357,850	443,626	465,198
17	400,057	404,675	343,301	454,720	347,290	354,827	447,463	359,533	453,518	455,560
18	403,017	404,428	343,494	456,067	344,067	354,827	453,324	354,381	451,181	458,385
19	399,808	406,601	345,233	458,587	346,659	355,890	449,424	357,827	447,560	461,517
20	399,782	404,271	344,071	459,168	349,507	355,337	451,300	354,706	441,479	467,236
21	393,169	411,370	340,718	457,254	343,146	354,821	446,541	361,788	451,884	457,692
22	400,780	404,971	344,217	454,626	342,264	360,120	450,041	358,541	451,463	457,802
23	396,491	407,834	336,988	459,418	345,364	355,362	458,008	352,457	456,126	453,667
24	400,780	404,971	342,240	459,366	347,666	355,355	448,917	363,242	456,752	454,303
25	389,652	413,049	348,285	455,980	349,932	349,500	451,612	355,062	452,165	457,109
26	402,221	405,554	346,456	456,196	343,437	355,885	455,836	355,262	453,518	455,560
27	396,491	407,834	340,718	457,254	342,430	356,408	453,523	358,576	449,066	460,457
28	397,916	406,107	340,718	457,254	343,606	354,824	455,836	355,262	454,638	454,752
29	402,139	406,967	341,878	456,686	338,581	360,066	455,766	353,866	443,626	465,198
30	400,230	404,166	346,394	458,003	341,969	356,403	450,591	357,850	443,626	465,198

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro D.6 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante negativo. Coordenadas convertidas para o espaço cartesiano (mm) dos valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Refer.	394,928	-410,015	339,649	-460,409	339,940	-360,112	450,129	-359,908	449,679	-460,355
1	394,575	-411,351	342,269	-455,198	340,617	-355,908	450,400	-361,037	446,814	-462,643
2	392,824	-414,336	334,179	-461,761	335,115	-361,094	450,400	-361,037	445,700	-464,110
3	388,712	-415,584	331,234	-468,513	340,617	-355,908	450,181	-362,401	444,578	-465,570
4	388,215	-417,358	339,819	-461,161	335,134	-360,634	450,681	-359,217	443,559	-466,157
5	389,379	-418,223	342,967	-454,673	335,115	-361,094	450,400	-361,037	448,264	-461,733
6	388,215	-417,358	331,986	-466,831	334,600	-360,688	450,327	-361,492	447,428	-462,832
7	394,728	-412,523	331,423	-468,093	335,745	-368,798	450,181	-362,401	449,955	-459,986
8	388,712	-415,584	339,470	-460,834	334,560	-361,608	450,181	-362,401	448,939	-460,581
9	398,730	-404,292	331,234	-468,513	335,074	-362,014	451,211	-355,572	445,391	-464,013
10	387,708	-419,128	331,423	-468,093	339,813	-362,871	450,255	-361,946	441,711	-468,291
11	388,341	-416,914	333,458	-463,455	335,153	-360,174	445,133	-368,584	442,843	-466,838
12	388,222	-418,975	331,234	-468,513	336,774	-359,547	450,542	-360,127	451,055	-458,509
13	390,305	-411,430	339,096	-462,854	340,617	-355,908	451,094	-359,435	448,568	-461,823
14	388,835	-415,140	332,727	-465,146	340,604	-356,369	451,163	-358,980	450,385	-459,664
15	394,728	-412,523	338,385	-463,374	335,153	-360,174	450,952	-357,395	449,249	-460,676
16	393,727	-414,460	334,358	-461,336	340,042	-357,351	451,506	-359,653	448,541	-461,365
17	394,728	-412,523	338,591	-460,601	338,441	-357,532	446,825	-366,531	444,274	-465,476
18	388,222	-418,975	346,471	-453,211	340,617	-355,908	451,082	-356,484	446,412	-463,426
19	388,712	-415,584	332,172	-466,410	335,115	-361,094	450,400	-361,037	450,506	-459,249
20	389,673	-412,028	332,911	-464,723	334,539	-362,068	446,825	-366,531	449,249	-460,676
21	389,673	-412,028	331,234	-468,513	340,604	-356,369	449,434	-361,509	445,700	-464,110
22	390,421	-410,984	331,986	-466,831	335,153	-360,174	450,471	-360,582	443,250	-466,058
23	387,950	-416,624	331,611	-467,673	335,153	-360,174	450,471	-360,582	444,707	-465,159
24	389,104	-415,875	339,819	-461,161	335,115	-361,094	445,933	-366,540	452,187	-457,493
25	388,992	-417,936	339,278	-462,431	335,134	-360,634	450,750	-358,762	443,277	-466,522
26	387,708	-419,128	334,169	-462,943	335,649	-361,039	448,024	-364,704	449,679	-460,355
27	392,188	-414,939	340,709	-459,037	335,171	-359,714	448,733	-363,107	450,231	-459,618
28	388,992	-417,936	342,967	-454,673	335,115	-361,094	445,212	-368,131	442,843	-466,838
29	388,957	-414,696	339,278	-462,431	340,070	-356,431	449,989	-360,818	449,955	-459,986
30	388,712	-415,584	333,729	-467,312	335,115	-361,094	451,094	-359,435	449,249	-460,676

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE E – ENSAIO DE POSIÇÃO CONTROLADOR PID

Quadro E.1– Posições atingidas durante os ensaios do quadrante positivo. Coordenadas com valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refer.	1246	1682	1335	1670	1136	1945	1175	1652	1457	1208
1	1236	1690	1325	1661	1126	1940	1155	1642	1450	1216
2	1237	1691	1324	1680	1125	1935	1156	1662	1447	1217
3	1236	1689	1326	1658	1146	1950	1161	1640	1470	1221
4	1237	1688	1326	1678	1125	1950	1165	1635	1450	1195
5	1235	1691	1327	1657	1125	1935	1155	1665	1462	1218
6	1253	1690	1328	1660	1125	1954	1163	1648	1447	1218
7	1235	1689	1327	1657	1127	1955	1162	1663	1450	1220
8	1237	1673	1325	1657	1125	1955	1165	1642	1447	1218
9	1238	1689	1325	1661	1143	1951	1162	1642	1449	1218
10	1237	1691	1326	1680	1146	1955	1161	1639	1450	1218
11	1238	1675	1326	1676	1146	1955	1163	1646	1442	1218
12	1227	1692	1346	1657	1126	1952	1186	1662	1447	1218
13	1260	1690	1343	1660	1126	1954	1160	1672	1439	1218
14	1237	1671	1326	1658	1127	1938	1160	1661	1464	1219
15	1256	1689	1344	1683	1125	1955	1165	1647	1465	1217
16	1230	1687	1323	1678	1126	1955	1163	1666	1463	1221
17	1253	1694	1326	1689	1127	1955	1186	1673	1448	1227
18	1259	1670	1343	1681	1147	1955	1161	1666	1464	1223
19	1256	1675	1346	1655	1128	1951	1185	1665	1460	1217
20	1235	1696	1324	1659	1127	1935	1160	1665	1468	1221
21	1254	1689	1325	1685	1126	1957	1188	1646	1452	1218
22	1236	1692	1326	1658	1131	1940	1160	1666	1445	1218
23	1237	1691	1325	1691	1126	1957	1164	1641	1446	1215
24	1235	1690	1346	1657	1127	1951	1160	1662	1453	1195
25	1260	1691	1325	1653	1126	1957	1163	1671	1461	1216
26	1237	1674	1325	1661	1129	1953	1163	1641	1446	1221
27	1238	1689	1326	1682	1145	1953	1165	1645	1455	1216
28	1237	1690	1325	1681	1126	1955	1162	1640	1445	1218
29	1237	1670	1324	1682	1126	1955	1144	1645	1465	1220
30	1235	1692	1326	1661	1126	1953	1161	1660	1465	1221

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro E.2 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante negativo. Coordenadas com valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refer.	198	1682	118	1670	75	1945	296	1652	419	1208
1	190	1675	120	1682	77	1955	299	1644	408	1218
2	186	1675	108	1679	66	1953	304	1647	413	1216
3	183	1694	107	1662	82	1954	290	1644	412	1218
4	185	1671	124	1665	65	1955	305	1647	410	1216
5	188	1670	120	1681	66	1953	287	1646	417	1210
6	183	1669	108	1667	65	1955	291	1647	417	1205
7	185	1672	108	1664	68	1934	289	1644	423	1209
8	187	1696	108	1667	65	1953	299	1644	416	1213
9	204	1692	108	1663	66	1951	289	1660	411	1213
10	185	1672	108	1664	70	1938	291	1645	409	1205
11	181	1695	108	1675	66	1955	288	1644	409	1209
12	178	1670	108	1663	69	1953	290	1659	423	1214
13	183	1695	119	1663	76	1953	299	1647	415	1203
14	207	1674	108	1671	76	1952	288	1656	421	1210
15	179	1665	121	1662	66	1955	288	1659	418	1209
16	188	1672	108	1680	70	1952	300	1647	417	1209
17	189	1670	116	1672	72	1954	289	1644	411	1209
18	181	1671	126	1677	76	1953	290	1657	414	1209
19	185	1693	108	1668	66	1953	287	1647	423	1212
20	184	1694	108	1672	65	1952	289	1644	417	1210
21	185	1696	108	1663	76	1952	300	1651	413	1209
22	180	1691	108	1667	66	1955	290	1645	408	1213
23	170	1692	108	1665	66	1955	289	1646	411	1216
24	185	1691	119	1667	66	1953	289	1644	421	1212
25	190	1670	119	1664	66	1954	287	1649	410	1215
26	185	1674	109	1675	67	1952	285	1644	421	1216
27	190	1691	119	1672	66	1956	285	1645	421	1211
28	188	1675	120	1681	66	1953	288	1645	409	1210
29	188	1690	119	1664	74	1953	290	1646	417	1209
30	188	1692	108	1661	68	1952	288	1643	415	1215

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro E.3 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante positivo. Coordenadas convertidas para o espaço das juntas (graus) dos valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refer.	19,565	57,904	27,391	56,849	9,893	81,031	13,322	55,266	38,119	16,224
1	18,686	58,608	26,512	56,058	9,013	80,591	11,563	54,387	37,504	16,927
2	18,774	58,696	26,424	57,728	8,925	80,151	11,651	56,146	37,240	17,015
3	18,686	58,520	26,600	55,794	10,772	81,470	12,091	54,211	39,262	17,367
4	18,774	58,432	26,600	57,553	8,925	81,470	12,443	53,771	37,504	15,081
5	18,598	58,696	26,688	55,706	8,925	80,151	11,563	56,409	38,559	17,103
6	20,181	58,608	26,776	55,970	8,925	81,822	12,267	54,915	37,240	17,103
7	18,598	58,520	26,688	55,706	9,101	81,910	12,179	56,234	37,504	17,279
8	18,774	57,113	26,512	55,706	8,925	81,910	12,443	54,387	37,240	17,103
9	18,862	58,520	26,512	56,058	10,508	81,558	12,179	54,387	37,416	17,103
10	18,774	58,696	26,600	57,728	10,772	81,910	12,091	54,123	37,504	17,103
11	18,862	57,289	26,600	57,377	10,772	81,910	12,267	54,739	36,800	17,103
12	17,894	58,784	28,359	55,706	9,013	81,646	14,289	56,146	37,240	17,103
13	20,796	58,608	28,095	55,970	9,013	81,822	12,003	57,025	36,536	17,103
14	18,774	56,937	26,600	55,794	9,101	80,415	12,003	56,058	38,735	17,191
15	20,445	58,520	28,183	57,992	8,925	81,910	12,443	54,827	38,823	17,015
16	18,158	58,344	26,336	57,553	9,013	81,910	12,267	56,497	38,647	17,367
17	20,181	58,959	26,600	58,520	9,101	81,910	14,289	57,113	37,328	17,894
18	20,708	56,849	28,095	57,816	10,860	81,910	12,091	56,497	38,735	17,543
19	20,445	57,289	28,359	55,530	9,189	81,558	14,201	56,409	38,383	17,015
20	18,598	59,135	26,424	55,882	9,101	80,151	12,003	56,409	39,086	17,367
21	20,269	58,520	26,512	58,168	9,013	82,086	14,465	54,739	37,680	17,103
22	18,686	58,784	26,600	55,794	9,453	80,591	12,003	56,497	37,064	17,103
23	18,774	58,696	26,512	58,696	9,013	82,086	12,355	54,299	37,152	16,839
24	18,598	58,608	28,359	55,706	9,101	81,558	12,003	56,146	37,767	15,081
25	20,796	58,696	26,512	55,354	9,013	82,086	12,267	56,937	38,471	16,927
26	18,774	57,201	26,512	56,058	9,277	81,734	12,267	54,299	37,152	17,367
27	18,862	58,520	26,600	57,904	10,684	81,734	12,443	54,651	37,943	16,927
28	18,774	58,608	26,512	57,816	9,013	81,910	12,179	54,211	37,064	17,103
29	18,774	56,849	26,424	57,904	9,013	81,910	10,596	54,651	38,823	17,279
30	18,598	58,784	26,600	56,058	9,013	81,734	12,091	55,970	38,823	17,367

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro E.4 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante negativo. Coordenadas convertidas para o espaço das juntas (graus) dos valores digitais obtidas pelo supervisor. Fonte: Autor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	teta 1	teta 2								
Refer.	-72,589	57,904	-79,624	56,849	-83,405	81,031	-63,972	55,266	-53,156	16,224
1	-73,293	57,289	-79,448	57,904	-83,229	81,910	-63,708	54,563	-54,123	17,103
2	-73,644	57,289	-80,503	57,640	-84,196	81,734	-63,268	54,827	-53,683	16,927
3	-73,908	58,959	-80,591	56,146	-82,789	81,822	-64,499	54,563	-53,771	17,103
4	-73,732	56,937	-79,096	56,409	-84,284	81,910	-63,180	54,827	-53,947	16,927
5	-73,468	56,849	-79,448	57,816	-84,196	81,734	-64,763	54,739	-53,332	16,400
6	-73,908	56,761	-80,503	56,585	-84,284	81,910	-64,411	54,827	-53,332	15,960
7	-73,732	57,025	-80,503	56,321	-84,021	80,064	-64,587	54,563	-52,804	16,312
8	-73,556	59,135	-80,503	56,585	-84,284	81,734	-63,708	54,563	-53,420	16,663
9	-72,062	58,784	-80,503	56,234	-84,196	81,558	-64,587	55,970	-53,859	16,663
10	-73,732	57,025	-80,503	56,321	-83,845	80,415	-64,411	54,651	-54,035	15,960
11	-74,084	59,047	-80,503	57,289	-84,196	81,910	-64,675	54,563	-54,035	16,312
12	-74,348	56,849	-80,503	56,234	-83,933	81,734	-64,499	55,882	-52,804	16,751
13	-73,908	59,047	-79,536	56,234	-83,317	81,734	-63,708	54,827	-53,508	15,784
14	-71,798	57,201	-80,503	56,937	-83,317	81,646	-64,675	55,618	-52,980	16,400
15	-74,260	56,409	-79,360	56,146	-84,196	81,910	-64,675	55,882	-53,244	16,312
16	-73,468	57,025	-80,503	57,728	-83,845	81,646	-63,620	54,827	-53,332	16,312
17	-73,381	56,849	-79,800	57,025	-83,669	81,822	-64,587	54,563	-53,859	16,312
18	-74,084	56,937	-78,920	57,465	-83,317	81,734	-64,499	55,706	-53,596	16,312
19	-73,732	58,872	-80,503	56,673	-84,196	81,734	-64,763	54,827	-52,804	16,575
20	-73,820	58,959	-80,503	57,025	-84,284	81,646	-64,587	54,563	-53,332	16,400
21	-73,732	59,135	-80,503	56,234	-83,317	81,646	-63,620	55,178	-53,683	16,312
22	-74,172	58,696	-80,503	56,585	-84,196	81,910	-64,499	54,651	-54,123	16,663
23	-75,051	58,784	-80,503	56,409	-84,196	81,910	-64,587	54,739	-53,859	16,927
24	-73,732	58,696	-79,536	56,585	-84,196	81,734	-64,587	54,563	-52,980	16,575
25	-73,293	56,849	-79,536	56,321	-84,196	81,822	-64,763	55,002	-53,947	16,839
26	-73,732	57,201	-80,415	57,289	-84,108	81,646	-64,939	54,563	-52,980	16,927
27	-73,293	58,696	-79,536	57,025	-84,196	81,998	-64,939	54,651	-52,980	16,488
28	-73,468	57,289	-79,448	57,816	-84,196	81,734	-64,675	54,651	-54,035	16,400
29	-73,468	58,608	-79,536	56,321	-83,493	81,734	-64,499	54,739	-53,332	16,312
30	-73,468	58,784	-80,503	56,058	-84,021	81,646	-64,675	54,475	-53,508	16,839

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro E.5 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante positivo. Coordenadas convertidas para o espaço cartesiano (mm) dos valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Refer.	394,879	410,062	340,867	459,508	339,962	360,091	450,102	359,942	450,235	459,811
1	397,538	404,786	351,991	453,715	347,750	354,824	465,156	344,115	452,165	457,109
2	396,467	405,496	343,999	454,193	350,596	354,262	456,156	348,438	453,892	455,291
3	397,987	404,684	352,664	454,075	332,095	365,185	462,811	348,015	436,006	472,044
4	397,814	405,193	343,519	455,154	343,690	354,294	462,776	349,929	459,938	451,359
5	397,709	404,277	352,423	454,556	350,596	354,262	455,411	348,259	442,911	465,879
6	386,843	415,019	350,355	455,274	341,849	354,276	458,354	350,883	453,518	455,560
7	398,607	404,073	352,423	454,556	340,299	355,315	452,500	352,794	450,664	458,175
8	404,531	403,586	353,816	453,472	341,388	354,269	459,820	351,213	453,518	455,560
9	396,743	405,904	351,991	453,715	333,313	363,636	461,432	349,092	452,117	456,950
10	396,467	405,496	342,603	455,246	329,795	365,086	463,232	347,829	451,416	457,643
11	403,017	404,428	344,435	455,059	329,795	365,086	459,203	350,525	457,000	452,066
12	402,195	399,470	339,020	464,637	342,225	354,812	439,636	369,064	453,518	455,560
13	382,362	419,151	339,782	463,218	341,304	354,800	449,722	352,913	459,077	449,957
14	405,424	403,360	352,664	454,075	348,126	355,351	454,436	351,060	441,098	467,494
15	385,380	416,708	328,519	464,631	341,388	354,269	457,700	352,111	441,143	467,655
16	402,592	400,789	345,611	453,568	340,844	354,793	450,672	353,991	441,052	467,333
17	385,035	415,371	338,477	455,628	340,299	355,315	434,849	370,720	449,431	458,642
18	392,026	416,718	330,151	464,062	329,234	365,592	451,756	352,606	439,569	468,521
19	391,693	415,406	339,936	464,541	341,595	355,867	438,900	368,850	444,718	464,256
20	395,462	404,775	353,599	453,053	349,507	355,337	452,725	351,743	437,453	470,703
21	386,657	415,523	341,010	454,942	339,923	354,776	445,419	367,881	450,009	459,026
22	396,639	404,987	352,664	454,075	345,017	357,483	452,297	351,912	454,914	454,166
23	396,467	405,496	338,258	455,186	339,923	354,776	460,781	350,325	455,336	454,054
24	398,159	404,175	339,020	464,637	342,141	355,342	454,009	351,232	457,855	453,471
25	381,909	419,235	355,640	453,217	339,923	354,776	448,523	354,817	444,384	464,677
26	404,084	403,698	351,991	453,715	340,128	356,376	461,318	349,617	453,094	455,668
27	396,743	405,904	341,686	455,336	331,275	364,620	458,549	351,753	448,644	460,565
28	396,916	405,395	342,843	454,766	340,844	354,793	462,276	348,725	454,914	454,166
29	405,870	403,246	343,082	454,285	340,844	354,793	469,645	336,795	439,998	468,428
30	397,260	404,378	351,294	454,255	341,765	354,806	454,324	351,586	439,616	468,684

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro E.6 – Posições atingidas durante os ensaios do quadrante negativo. Coordenadas convertidas para o espaço cartesiano (mm) dos valores digitais obtidas pelo supervisor.

Número do ciclo	P1		P2		P3		P4		P5	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Refer.	394,928	-410,015	339,649	-460,409	339,940	-360,112	450,129	-359,908	449,679	-460,355
1	388,992	-417,936	343,136	-454,244	341,185	-354,465	451,219	-361,472	444,643	-464,226
2	386,419	-420,316	334,179	-461,761	335,115	-361,094	454,185	-356,633	447,643	-461,539
3	386,859	-413,673	330,324	-469,440	343,888	-352,296	446,183	-367,670	447,485	-461,487
4	385,247	-422,673	342,994	-459,390	334,600	-360,688	454,732	-355,936	445,513	-463,595
5	387,058	-421,336	342,967	-454,673	335,115	-361,094	444,647	-368,814	448,818	-460,998
6	383,678	-424,734	331,986	-466,831	334,600	-360,688	446,980	-365,623	447,428	-462,832
7	385,380	-422,232	331,423	-468,093	335,745	-368,798	445,618	-368,354	452,770	-457,216
8	389,622	-410,399	331,986	-466,831	334,560	-361,608	451,219	-361,472	448,939	-460,581
9	399,778	-401,888	331,234	-468,513	335,074	-362,014	446,811	-361,085	445,391	-464,013
10	385,380	-422,232	331,423	-468,093	336,991	-365,928	446,825	-366,531	441,711	-468,291
11	385,708	-414,414	333,458	-463,455	335,153	-360,174	445,052	-369,038	442,843	-466,838
12	380,546	-427,227	331,234	-468,513	336,774	-359,547	447,296	-360,854	454,132	-455,360
13	386,978	-413,228	339,096	-462,854	340,617	-355,908	451,435	-360,108	445,443	-464,933
14	399,647	-408,091	332,727	-465,146	340,604	-356,369	445,972	-363,590	451,639	-458,234
15	380,504	-428,836	340,334	-462,235	335,153	-360,174	446,186	-362,225	449,249	-460,676
16	387,320	-420,453	334,358	-461,336	337,308	-359,490	451,987	-359,415	448,541	-461,365
17	387,704	-420,742	338,591	-460,601	338,441	-357,532	445,618	-368,354	444,274	-465,476
18	382,645	-425,030	346,471	-453,211	340,617	-355,908	447,157	-361,764	446,412	-463,426
19	388,010	-412,928	332,172	-466,410	335,115	-361,094	444,727	-368,360	453,589	-456,103
20	387,494	-413,079	332,911	-464,723	334,539	-362,068	445,618	-368,354	448,818	-460,998
21	388,361	-411,593	331,234	-468,513	340,604	-356,369	452,263	-357,594	445,700	-464,110
22	384,585	-416,782	331,986	-466,831	335,153	-360,174	446,262	-367,216	443,250	-466,058
23	378,273	-422,193	331,611	-467,673	335,153	-360,174	445,777	-367,447	446,224	-462,910
24	387,772	-413,818	339,819	-461,161	335,115	-361,094	445,618	-368,354	452,187	-457,493
25	388,349	-420,146	339,278	-462,431	335,134	-360,634	444,884	-367,453	445,236	-463,962
26	385,643	-421,350	334,169	-462,943	335,649	-361,039	443,348	-371,083	453,276	-456,008
27	390,936	-410,830	340,709	-459,037	335,171	-359,714	443,431	-370,630	451,914	-457,864
28	387,708	-419,128	342,967	-454,673	335,115	-361,094	445,133	-368,584	443,124	-466,473
29	389,555	-412,474	339,278	-462,431	339,523	-356,952	446,340	-366,763	448,541	-461,365
30	389,790	-411,583	330,854	-469,352	336,203	-360,523	444,971	-369,491	448,783	-460,532

Fonte: Elaborado pelo autor.