

# **Avaliação de Desempenho de Robôs Industriais Utilizando um Braço de Medição Portátil**

*por*

Eng. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto

**Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial  
Universidade Federal de Santa Catarina**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de  
Mestre em Metrologia na Universidade Federal de Santa Catarina,  
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 24 de setembro de 2001.

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ROBÔS INDUSTRIAIS UTILIZANDO UM  
BRAÇO DE MEDIÇÃO PORTÁTIL**

ENG. TIAGO LOUREIRO FIGARO DA COSTA PINTO

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de  
**“MESTRE EM METROLOGIA”**  
e aprovada na sua forma final pelo  
Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

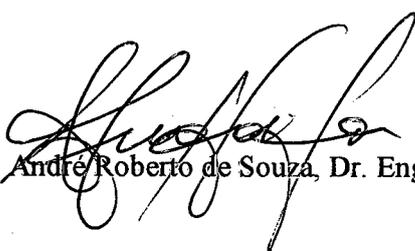
  
Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.  
Orientador

  
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

  
Prof. Werner Kraus Júnior, Ph. D.

  
Prof. André Roberto de Souza, Dr. Eng.

  
Walter Antônio Kapp, M. Eng.

## **Resumo**

Este trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação de desempenho de robôs industriais, baseada na utilização de um braço de medição portátil.

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho é realização da avaliação de desempenho de um robô industrial que esta em desenvolvimento na Universidade Federal de Santa Catarina.

Um estudo sobre as características que definem o desempenho de robôs industriais, assim como os principais sistemas para a avaliação de desempenho são apresentados.

A metodologia consiste basicamente em fazer medições com o braço de medição em um flange, especialmente projetado e fabricado, acoplado à interface mecânica de um robô e analisar os dados a partir de um algoritmo de cálculo.

A avaliação metrológica do sistema de medição é apresentada, utilizando diversos tipos de padrões e simulação computacional.

A metodologia proposta mostrou-se satisfatória para a realização da avaliação de desempenho de robôs, especialmente para as características do robô em desenvolvimento na Universidade Federal de Santa Catarina.

# Abstract

This work presents a method to evaluate the performance of industrial robots, using a portable coordinate measuring machine, also known as measuring arm.

The main motivation for this work is the performance evaluation of an industrial robot that is under development in the Federal University of Santa Catarina.

A study of the characteristics that define the performance of industrial robots and other systems used for performance evaluation are presented.

This methodology consists basically in making measurements with the portable arm coupled, whit an especial flange, in a robot and analyzing the collected data with a specific algorithm.

A metrological evaluation is presented using different kinds of standards and computer simulation.

The methodology proposed revealed to be very satisfactory for the performance evaluation of industrial robots, especially for the one under development in the Federal University of Santa Catarina.

**Dedico este trabalho ao Sol.  
Criador e mantenedor da vida neste Planeta.**

# Agradecimentos

São muitos os agradecimentos que vem à minha cabeça ao chegar nesta fase da vida. Primeiro, agradeço a esta oportunidade de aprender e re-aprender muitas coisas em mais esta vida sobre a Terra, relembrando que a verdadeira amizade é a melhor coisa que podemos cultivar.

Obrigado todas as consciências que se inter-relacionam para formar esta realidade em evolução a qual estamos inseridos, em especial a toda minha família, que fez de mim o que sou hoje.

Agradeço a esta ilha maravilhosa que me recebeu de braços abertos.

Obrigado ao Rafito e ao Rodrigo por serem minha família aqui, pela amizade, inúmeras conversas e debates construtivos durante todo o tempo que moramos juntos na casa da Floresta. Aos rangos feitos em conjunto, em especial aos incontáveis, inigualáveis, sempre inovadores *chapats*.

Obrigado a Lio que me ajudou e me agüentou enquanto escrevi este trabalho.

Obrigado a todas as grandes amizades feitas no ambiente Ufisquiano, gostaria de lembrar o nome de cada um, mas como não sou bom nisso, um axé para todos.

Muito obrigado a todas as pessoas que trabalham no laboratório, mesmo aquelas que não ajudaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Obrigado pela oportunidade de conhecer um ambiente universitário de verdade, no qual conheci inúmeras idéias, opiniões, culturas e atitudes diferentes, ampliando cada vez mais a universalidade dos meus pensamentos.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Sumário</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xv</b>

## Capítulo 1

<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Projeto Roboturb .....	2
1.1.1 Caracterização do problema.....	2
1.1.2 Meta.....	4
1.2 Justificativas para realização deste trabalho.....	5
1.3 Resultados esperados .....	6
1.4 Metodologia de trabalho.....	7
1.5 Resultados .....	8
1.6 Estrutura do trabalho.....	8

## Capítulo 2

<b>Avaliação de desempenho de robôs industriais</b>	<b>10</b>
2.1 Robôs industriais .....	10
2.1.1 Modelo cinemático .....	11
2.2 Justificativas para a avaliação de desempenho de robôs industriais ...	16
2.2.1 Fontes de erro em operações realizadas por robô .....	16
2.2.2 Programação de robôs 'on-line' e 'off-line' .....	17
2.2.3 Conseqüências dos erros .....	18
2.3 Avaliação de desempenho e calibração de robôs .....	19
2.3.1 Avaliação de desempenho .....	20
2.3.2 Calibração .....	20
2.4 Critérios de desempenho estabelecidos na norma ISO 9283 .....	21
2.4.1 Notações utilizadas .....	22
2.4.2 Condições para avaliação de desempenho .....	23
2.4.3 Posturas e percursos de avaliação .....	25
2.4.4 Critérios de desempenho de robôs .....	28
2.5 Princípio de funcionamento de sistemas de medição para avaliação de desempenho de robôs industriais .....	42
2.5.1 Sistemas de posicionamento de sensor .....	42
2.5.2 Sistemas de comparação de percurso .....	42
2.5.3 Sistemas que utilizam trilateração .....	43
2.5.4 Sistemas que utilizam coordenadas esféricas .....	46
2.5.5 Sistemas que utilizam triangulação .....	47
2.5.6 Sistemas de medição inercial .....	50
2.5.7 Sistemas que utilizam coordenadas cartesianas .....	50
2.5.8 Sistemas de desenho de percurso .....	51
2.5.9 Comparação entre sistemas de medição .....	52

## Capítulo 3

<b>Braço de medição</b>	<b>55</b>
3.1 Sistema de medição para desenvolver metodologia .....	55
3.2 Braços de medição .....	56

3.2.1	Princípio de funcionamento do braço de medição .....	56
3.2.2	Calibração de braços de medição .....	58
3.2.3	Braço de medição utilizado .....	61

## Capítulo 4

<b>Metodologia de avaliação proposta</b>		<b>63</b>
4.1	Concepção da metodologia proposta.....	63
4.1.1	Localização de um corpo rígido no espaço Cartesiano .....	63
4.1.2	Localização do sistema de coordenadas através do braço de medição 65	
4.1.3	Flange de medição.....	67
4.1.4	Modelo matemático para localização do sistema de coordenadas...	71
4.2	Utilizando a metodologia.....	75
4.2.1	Preparando os ensaios.....	75
4.2.2	Fazendo medições .....	78
4.2.3	Analisando os dados .....	81

## Capítulo 5

<b>Ensaio e resultados</b>		<b>83</b>
5.1	Fontes de incerteza.....	83
5.2	Ensaio de avaliação .....	84
5.2.1	Objetivos gerais dos ensaios .....	84
5.2.2	Verificação do braço de medição .....	85
5.2.3	Determinação do diâmetro da haste de alinhamento.....	85
5.2.4	Levantamento geométrico do flange de medição.....	87
5.2.5	Ensaio de trajetória.....	91
5.2.6	Ensaio de determinação de tendência do braço de medição.....	96
5.2.7	Ensaio de alinhamento.....	100
5.2.8	Ensaio de Força .....	101
5.3	Simulação.....	107
5.3.1	Algoritmo de simulação .....	107
5.3.2	Resultados da simulação.....	108
5.4	Resultados.....	109

5.5	Estudo de caso.....	111
5.5.1	Ensaio de postura.....	111
5.5.2	Ensaio de velocidade.....	112

## Capítulo 6

<b>Conclusão</b>		<b>116</b>
6.1	A metodologia de avaliação.....	116
6.1.1	Utilização da Metodologia.....	117
6.1.2	Resultados.....	117
6.1.3	Vantagens e desvantagens de utilizar a metodologia.....	119
6.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	120
6.3	Considerações finais.....	121
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>122</b>

## Apêndice A

<b>Correção do modelo cinemático</b>	<b>128</b>
--------------------------------------	------------

## Apêndice B

<b>Equipamentos e softwares utilizados</b>	<b>131</b>	
B.1	Equipamentos utilizados.....	131
B.2	Softwares utilizados.....	132

## Apêndice C

<b>Flange de medição</b>	<b>133</b>
--------------------------	------------

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Rotor de turbina hidráulica de grande porte.....	2
Figura 1.2 Detalhe de um rotor erodido por cavitação. ....	3
Figura 1.3 Modelo preliminar do manipulador entre pás adjacentes do rotor simulando recuperação da superfície.....	4
Figura 1.4 Manipulador em desenvolvimento no Projeto Roboturb.....	6
Figura 2.1 Parâmetros cinemáticos Denavit-Hartenberg [3]. ....	13
Figura 2.2 Roboturb e sistema de coordenadas segundo notação Denavit- Hartenberg. ....	13
Figura 2.3 Sistema de coordenadas do efetuador em relação ao sistema de coordenadas base [3].....	15
Figura 2.4 Repetitividade de posicionamento em uma operação de solda a arco [1].....	18
Figura 2.5 Influência da repetitividade de posição e orientação em operações de montagem [1].....	19
Figura 2.6 Sistema de coordenadas utilizado [14].....	22
Figura 2.7 Sistema de coordenadas [14]. ....	23
Figura 2.8 Exemplo de cubo de teste no volume de trabalho do robô [14].....	25
Figura 2.9 Planos de teste [14]. ....	26
Figura 2.10 Posições para os testes estáticos [14]. ....	27
Figura 2.11 Planos que contem os percursos a serem testados [14]. ....	27
Figura 2.12 Exemplos de percurso [14].....	28
Figura 2.13 Postura comandada e postura atingida [14].....	29
Figura 2.14 Tendência e repetitividade de posicionamento [14].....	30
Figura 2.15 Tendência e repetitividade de orientação [14]. ....	31

Figura 2.16 Ciclos de medição. ....	33
Figura 2.17 Ciclos de teste.....	34
Figura 2.18 Gráfico da variação nas características de postura. ....	35
Figura 2.19 Erros de percurso [14].....	36
Figura 2.20 Características de velocidade de percurso [14].....	39
Figura 2.21 Percurso comandado e alcançado para o tecimento. ....	41
Figura 2.22 Sistema cubo-berço para ensaio de repetitividade de postura [25].....	42
Figura 2.23 Sistema de comparação com guia mecânica [25].....	43
Figura 2.24 Sistema de comparação com feixe Laser [25]. ....	43
Figura 2.25 Princípio da trilateração [26].....	44
Figura 2.26 Interferômetro multi laser tracking [25]. ....	45
Figura 2.27 Trena 3D [15].....	45
Figura 2.28 Coordenadas esféricas [25]. ....	46
Figura 2.29 Um laser interferométrico com laser <i>tracking</i> para determinação de posição [25].....	46
Figura 2.30 Princípio da triangulação [25]. ....	47
Figura 2.31 Sistema de triangulação por laser <i>tracking</i> [25].....	48
Figura 2.32 Sistema de laser <i>scanning</i> [25].....	48
Figura 2.33 Sistema de triangulação com laser <i>tracking</i> e sensor CCD [25]. ....	49
Figura 2.34 Sistema com teodolitos [25]. ....	49
Figura 2.35 Sistema com duas câmeras [25].....	50
Figura 2.36 Sistema de medição inercial [25].....	50
Figura 2.37 Sistema bidimensional de digitalização com CCD [25].....	51
Figura 2.38 Sistema com máquina de medir por coordenadas [25].....	51
Figura 2.39 Método de desenho de percurso [25]. ....	52
Figura 3.1 Configuração antropóide [42].....	57
Figura 3.2 Volume de medição da configuração antropóide [42].....	57
Figura 3.3 Braço de medição SCARA e seu volume de medição [42]. ....	58
Figura 3.4 Calibração de braços de medição utilizando a medição de um comprimento constante [42]. ....	60
Figura 3.5 Calibração de braços de medição com auxílio da interferometria [42].....	60

Figura 3.6 Braço de medição disponível no Labmetro.....	62
Figura 4.1 Localização de um corpo rígido através de seis graus de liberdade [1].....	64
Figura 4.2 Determinação da posição e orientação com base em três pontos. .	64
Figura 4.3 Interface mecânica do robô, flange e seus sistemas de coordenadas. ....	65
Figura 4.4 Apalpador posicionado no assento de medição. ....	66
Figura 4.5 Localização do centro da esfera do apalpador no assento através da MMC.....	67
Figura 4.6 Desenho da interface mecânica do robô UP6 Motoman [45].....	68
Figura 4.7 Flange de medição. ....	69
Figura 4.8 Seção e detalhe do flange de medição.....	70
Figura 4.9 Vetores definidos em função da posição do centro do apalpador...	73
Figura 4.10 Posição de repouso do braço de medição. ....	76
Figura 4.11 Medição do círculo projetado no plano para alinhamento.....	76
Figura 4.12 Montagem do flange de medição. ....	77
Figura 4.13 Medição manual. ....	78
Figura 4.14 Comunicação robô-braço para medição de velocidade.....	79
Figura 4.15 Percurso para as medições de velocidade. ....	80
Figura 4.16 Montagem do ímã no flange de medição e furo para a passagem do campo magnético através do flange. ....	81
Figura 5.1 Diagrama tipo “Espinha de Peixe” contendo as principais fontes de incerteza do sistema de avaliação de desempenho.....	84
Figura 5.2 Máquina de Medir Longitudinal ou Máquina de Abbe. ....	86
Figura 5.3 Centro do apalpador em relação ao SCF.....	87
Figura 5.4 Calibração do apalpador.....	88
Figura 5.5 Alinhamento do sistema de coordenadas do flange de medição. ...	89
Figura 5.6 Apalpador encaixado no assento pelo modo auto-centrante. ....	90
Figura 5.7 Sistema Abbe Longa.....	92
Figura 5.8 Realizando as medições.....	93
Figura 5.9 Flange com transdutor de temperatura e indicador. ....	93
Figura 5.10 Gráfico que mostra o erro na determinação da distância de deslocamento do flange (carro) em função da posição. ....	95

Figura 5.11 Gráfico que mostra o erro na determinação da distância de deslocamento do carro em função da posição através de medições no cone.....	95
Figura 5.12 Detalhe do padrão escalonado sendo medido com o braço de medição.....	97
Figura 5.13 Medição no padrão escalonado. ....	98
Figura 5.14 Gráfico da tendência na medição de distância através do braço de medição. ....	99
Figura 5.15 Medição de anel padrão com o braço de medição.....	101
Figura 5.16 Percorso percorrido para determinação dos esforços nas medições de velocidade.....	102
Figura 5.17 Tartilope e direção dos esforços medidos pelo transdutor.....	103
Figura 5.18 Gráfico da força de medição resultante para cada velocidade em cm/min. ....	104
Figura 5.19 Gráfico da força de medição na direção X em função da posição para cada velocidade em cm/min. ....	105
Figura 5.20 Gráfico da força de medição na direção Y em função da posição para cada velocidade em cm/min. ....	105
Figura 5.21 Gráfico da força de medição na direção Z em função da posição para cada velocidade em cm/min. ....	106
Figura 5.22 Gráfico da força de medição manual. ....	107
Figura 5.23 Planilha para cálculo da incerteza expandida na determinação da localização do sistema de coordenadas da interface mecânica. ....	109
Figura 5.24 Gráfico com fontes de incerteza .....	110
Figura 5.25 Gráfico para indicação do período de aquisição para as medições de velocidade.....	114

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Tabela de comparação da capacidade de cada sistema de medição [25].	52
Tabela 2.2	Comparação do desempenho dos sistemas de medição [25].	53
Tabela 5.1	Resultado das medições de posição de cada assento em relação ao sistema de coordenadas do Flange de medição.	90
Tabela 5.2	Repetitividade de posicionamento do apalpador no assento de medição.	91
Tabela 5.3	Resultados das medições de deslocamento do flange de medição.	94
Tabela 5.4	Resultados da calibração da tendência na medição de distâncias com o braço de medição	98
Tabela 5.5	Principais resultados da simulação.	108
Tabela 5.6	Tendência de posicionamento.	112
Tabela 5.7	Tendência de orientação.	112
Tabela 5.8	Resultados das medições de características de velocidade.	114
Tabela 6.1	Resultados alcançados com o desenvolvimento da metodologia, divididos em resultados dos ensaios e magnitude mínima da característica do robô.	118

## Lista de Símbolos

C – correção

Re – repetitividade

U – incerteza de medição expandida

VVC – valor verdadeiro convencional

K – fator de abrangência

SCF – sistema de coordenadas do flange de medição

SCB – sistema de coordenadas do braço de medição

SCR – sistema de coordenadas do robô

SCP – sistema de coordenadas intermediário

SCM – sistema de coordenadas da interface mecânica do robô

MMC – máquina de medir por coordenadas

CCD – Sigla em inglês: *Coupled Charge Device*

SCARA – Sigla em inglês: *Selective Compliance Assembly Robot Arm*

Labmetro – Laboratório de Metrologia e Automatização

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

Fundação CERTI – Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras

# Capítulo 1

## Introdução

O Robô industrial é uma máquina com significantes características de versatilidade e flexibilidade. É um manipulador multifuncional programável, desenhado para mover materiais, partes, ferramentas ou dispositivos especiais através de movimentos variáveis programados para a realização de uma variedade de tarefas [3].

Na industria moderna, uma das operações mais realizadas por robôs industriais é a solda a arco. Isto se deve principalmente à melhoria da qualidade de deposição de material, à possibilidade de substituição do operário em trabalhos executados em ambientes insalubres, ao aumento da produtividade e à redução de custos [1].

Contudo, conhecer o desempenho de determinado robô é essencial para classificá-lo como apto ou não apto a realizar determinada tarefa. Isso se torna tanto mais crítico quanto maior for a exigência da tarefa a ser realizada [2].

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver uma metodologia para a avaliação de desempenho de um robô industrial que está sendo desenvolvido no âmbito do Projeto Roboturb. O Roboturb será utilizado para fazer o mapeamento da forma geométrica da superfície de pás do rotor de turbinas hidráulicas e, posteriormente, realizar a deposição de material através de solda a arco de maneira a corrigir os defeitos na superfície decorrentes da erosão por cavitação.

## 1.1 Projeto Roboturb

O Projeto Roboturb é um projeto que está sendo desenvolvido em conjunto pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e o Instituto Tecnológico Central de Pesquisa e Desenvolvimento (LACTEC) e visa desenvolver um sistema automatizado e dedicado à recuperação de turbinas hidráulicas de grande porte.

### 1.1.1 Caracterização do problema

Unidades hidráulicas utilizadas para geração de energia elétrica são freqüentemente máquinas de grande porte. Seus rotores são construídos em aço de elevada resistência, podendo apresentar mais de 9 m de diâmetro (tipo Francis) e massa de até 200 toneladas. O custo de um destes rotores pode chegar a US\$ 2.000.000, valor relativamente baixo se comparado ao lucro cessante de uma turbina destas parada em horário de elevada demanda, que pode ultrapassar US\$ 20.000 por hora [4]. As proporções de um destes rotores de turbina hidráulica de grande porte podem ser visualizadas na Figura 1.1.

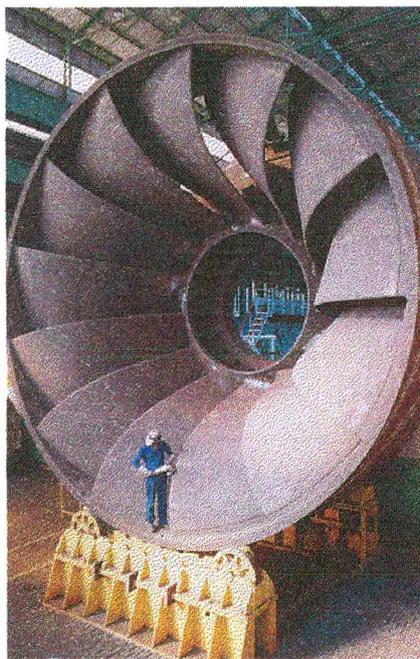


Figura 1.1 Rotor de turbina hidráulica de grande porte.

O perfil hidráulico do rotor deve ser projetado para apresentar elevada eficiência hidráulica e condições de escoamento adequadas. Mas, mesmo com

grandes avanços nas técnicas de modelamento numérico em mecânica dos fluidos, ainda não se consegue evitar em 100% dos casos o fenômeno da cavitação em turbinas hidráulicas. Em turbinas mais antigas, que ainda estarão em uso por pelo menos mais meio século, este problema é ainda mais intenso [4].

Como a substituição de rotores é tecnicamente complexa e economicamente inviável, a erosão do rotor por cavitação deve ser mantida sob controle. Isto é realizado por um processo de deposição de material “in loco” com a finalidade de recompor o perfil original da turbina. Tipicamente esta operação é realizada manualmente [4].

As regiões erodidas são, freqüentemente, regiões de difícil acesso e desfavoráveis à deposição do material, o que torna o trabalho bastante insalubre para o soldador. Uma foto mostrando um detalhe de um rotor erodido por cavitação pode ser visualizada na Figura 1.2.

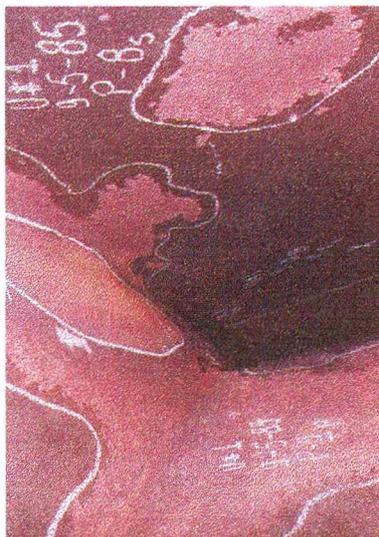


Figura 1.2 Detalhe de um rotor erodido por cavitação.

Testes em laboratório têm demonstrado uma forte dependência entre a homogeneidade da superfície reconstituída por soldagem e a resistência à erosão por cavitação [4]. Outro ponto interessante é de que a resistência à erosão é muito maior em depósitos feitos por soldagem automática do que em depósitos feitos por soldagem manual [4].

### 1.1.2 Meta

O Projeto Roboturb envolve o desenvolvimento da tecnologia e de um sistema capaz de realizar a recuperação de superfícies erodidas por cavitação em rotores de turbinas hidráulicas de grande porte. Seu elemento central é um manipulador, integrado ao processo de soldagem, capaz de operar no espaço confinado do canal entre pás adjacentes do rotor.

O manipulador deverá realizar o mapeamento dos defeitos da superfície, efetuar a deposição de material na superfície erodida por processo de soldagem robotizada, tratar e dar acabamento à superfície. Outra contribuição importante é que o sistema deverá iterativamente controlar a forma obtida da pá de modo a recompor a geometria ideal de projeto [4]. Uma foto de um modelo preliminar, utilizado para determinar a adequação da concepção do manipulador a ser desenvolvido, pode ser visualizado dentro do espaço confinado de pás adjacentes do rotor na Figura 1.3.

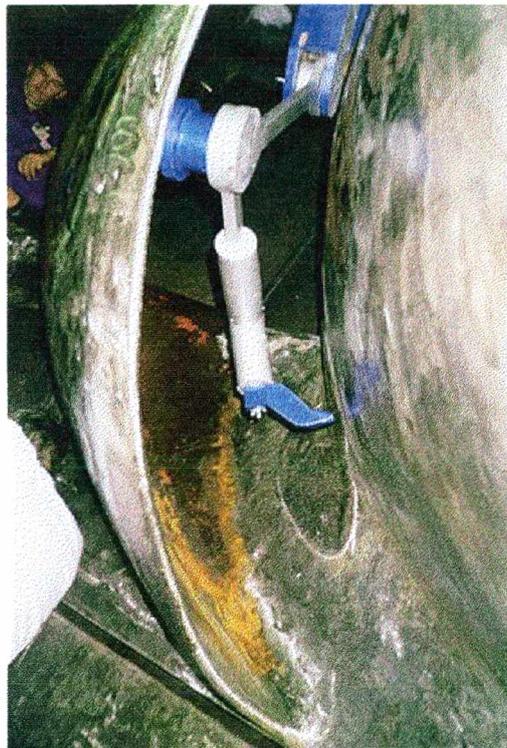


Figura 1.3 Modelo preliminar do manipulador entre pás adjacentes do rotor simulando recuperação da superfície.

Uma vez operacional, este sistema permitirá:

- Maximizar a resistência à erosão por cavitação das turbinas pela preservação da forma original, otimização do uso de material e qualidade do acabamento superficial da camada depositada, elevando o tempo entre reparos em 50% (exemplo, de 16.000 h para 24.000 h);
- Reduzir o consumo de arame entre 15% e 20% (normalmente ~ 1000 kg por rotor);
- Reduzir o tempo de soldagem em 40%;
- Reduzir o tempo de esmerilhamento pós-soldagem em 50%;
- Reduzir o tempo de re-trabalho após inspeção em 60%;
- Reduzir o custo total de recuperação de turbinas hidráulicas de grande porte em 50% (atualmente US\$ 170.000 por rotor e 16 dias de trabalho).

Para atingir estas metas será necessário construir um manipulador especial capaz de posicionar e orientar a tocha de soldagem e um sistema de medição laser com uma incerteza de posicionamento não superior a 0,4 mm [4].

## **1.2 Justificativas para realização deste trabalho**

Uma vez que o sistema automatizado que está sendo desenvolvido no âmbito do Projeto Roboturb irá realizar operações complexas, é de suma importância que o desempenho deste sistema automatizado seja condizente com as tarefas a serem realizadas. Uma foto do elemento central do projeto, o manipulador, pode ser vista na Figura 1.4.

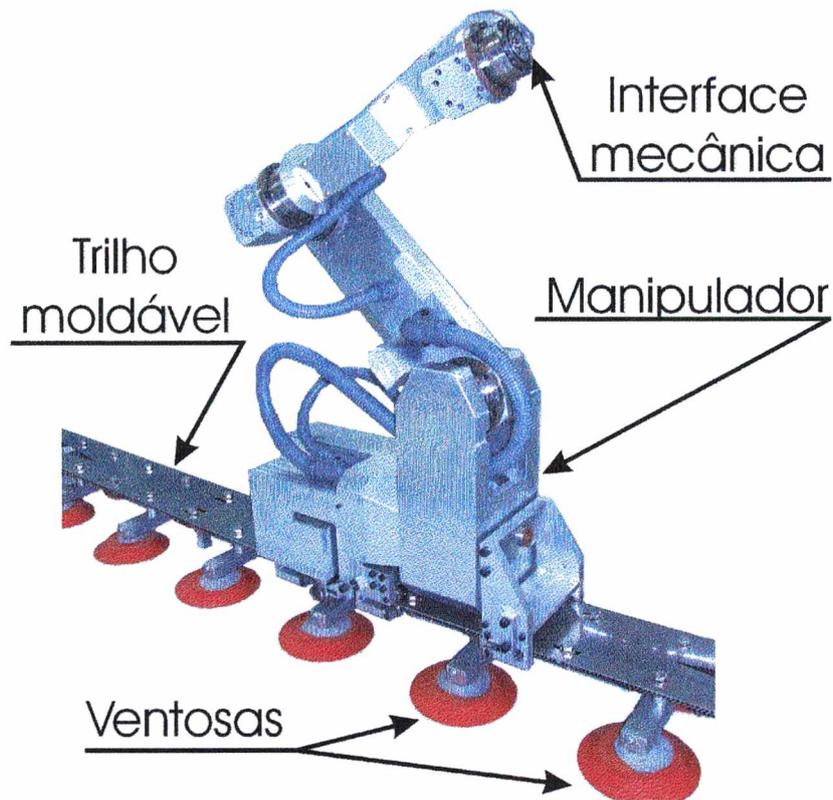


Figura 1.4 Manipulador em desenvolvimento no Projeto Roboturb.

Um erro demasiadamente grande no posicionamento da ferramenta acoplada ao manipulador pode acarretar uma deposição de material de baixa qualidade, desvios na forma da pá e até avarias devido a colisões.

É muito difícil prever todas as variáveis de projeto para que o desempenho do sistema automatizado (manipulador) seja perfeitamente conhecido previamente.

Para se conhecer o desempenho de robôs industriais normalmente é utilizado um sistema de medição externo ao robô de modo a fazer uma comparação entre as variáveis programadas no robô e as variáveis medidas externamente ao robô.

Com os dados extraídos da avaliação de desempenho do sistema, poderão ser otimizadas variáveis de projeto de modo a melhorar o desempenho de futuras implementações do sistema [5].

### **1.3 Resultados esperados**

A metodologia desenvolvida deve ser capaz de realizar a avaliação de

desempenho em ambiente de laboratório, de modo a permitir a otimização de variáveis para garantir o funcionamento do sistema dentro de tolerâncias especificadas no projeto, e ainda realizar medições no ambiente de trabalho do manipulador (desde que respeitados os limites estabelecidos pelo fabricante), garantindo assim a confiabilidade do sistema.

Como o projeto prevê um erro de posicionamento da ferramenta acoplada ao manipulador de 0,4 mm, o sistema de medição deve ter uma incerteza na determinação da posição da ferramenta de no máximo 0,1 mm (incerteza de medição dever ser no máximo 25% da magnitude da característica avaliada), segundo norma específica para avaliação de desempenho de robôs industriais (ISO9283).

A utilização de um sistema de medição denominado braço de medição reúne as características que podem alcançar tais objetivos e está disponível no Labmetro.

## **1.4 Metodologia de trabalho**

Para o desenvolvimento da metodologia foi feita uma pesquisa de modo a levantar quais as características que determinam o desempenho estático e dinâmico de um robô industrial, assim como levantar quais são os métodos e equipamentos utilizados, atualmente, para realizar a avaliação de desempenho, tanto em ambiente de laboratório, como em ambiente industrial.

Com estes dados conhecidos, foi escolhido um sistema de medição denominado braço de medição para o desenvolvimento da metodologia de avaliação de desempenho, pois este reúne as características desejáveis, de portabilidade, robustez, grande volume de medição e incerteza de medição condizente (0,1 mm) com o sistema a ser avaliado.

A metodologia consiste basicamente em localizar a posição de três assentos através do encaixe do apalpador do braço de medição. Então é utilizado um algoritmo de cálculo que determina a localização e a orientação do sistema de coordenadas da interface mecânica do manipulador. Desta maneira o desempenho do manipulador pode ser avaliado.

A metodologia foi avaliada com a realização de vários ensaios de modo a garantir a confiabilidade dos resultados, inclusive com um estudo de caso com

medições em um robô industrial.

## **1.5 Resultados**

A metodologia desenvolvida mostrou ser de fácil utilização, com reduzido tempo de “set-up”, agilidade na realização dos ensaios, robusta, e pode ser aplicada tanto em ambiente de laboratório como em um ambiente normal de trabalho.

Com base na análise dos resultados dos ensaios e de uma simulação computacional, o sistema de medição denominado braço de medição, foi considerado apto a realizar a avaliação de desempenho do manipulador desenvolvido no projeto Roboturb e também pode ser utilizado para a avaliação de desempenho de outros robôs industriais com características semelhantes.

## **1.6 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está estruturada em seis Capítulos.

Capítulo 1 - Introdução.

Capítulo 2 - Avaliação de desempenho de robôs industriais: descreve as características que determinam o desempenho de robôs e ilustra o princípio de funcionamento dos principais tipos de equipamentos de medição utilizados na avaliação de robôs.

Capítulo 3 – Braço de medição: justifica a escolha do braço de medição para o desenvolvimento da metodologia, dá uma visão geral sobre o princípio de funcionamento de braços de medição, ilustra alguns sistemas para calibração de braços de medição utilizados atualmente e ainda expõe características do braço de medição utilizado.

Capítulo 4 - Metodologia de avaliação proposta: expõe a concepção da metodologia desenvolvida e explica como utilizá-la. Detalha o funcionamento do flange de medição e do algoritmo de cálculo utilizado.

Capítulo 5 - Ensaios e resultados: explica o objetivo de cada ensaio e da simulação realizada para a validação da metodologia desenvolvida, assim como descreve a realização de cada ensaio e apresenta os resultados. Apresenta um estudo de caso realizado num robô industrial.

Capítulo 6 – Conclusão: apresenta as conclusões que resultaram da realização desta dissertação, as principais vantagens e desvantagens de se utilizar a metodologia desenvolvida e propõe novos trabalhos a serem realizados de forma a dar continuidade a este tema.

Apêndice A – Correção do modelo matemático: apresenta como fazer a correção do modelo cinemático de robôs industriais, com base em medições feitas com um sistema de medição externo ao robô.

Apêndice B - Equipamentos e softwares utilizados: apresenta uma lista simplificada dos principais equipamentos e softwares utilizados no desenvolvimento desta dissertação;

Apêndice C - Flange de medição: ilustra o desenho técnico utilizado para a fabricação do flange de medição.

## **Capítulo 2**

# **Avaliação de desempenho de robôs industriais**

Este capítulo trata sobre a avaliação de desempenho e calibração de robôs industriais e a diferença entre esses conceitos.

Apresenta os motivos para se fazer uma avaliação das posições no volume de trabalho do robô e estabelece que características de seu desempenho devem ser avaliadas. Este capítulo mostra e compara diversas concepções de sistemas de avaliação.

Apresenta também as justificativas para a escolha do sistema de medição utilizado para desenvolver a metodologia proposta.

### **2.1 Robôs industriais**

O surgimento de robôs industriais deve-se principalmente ao desenvolvimento de duas tecnologias: o telecomando e o controle numérico [6] [20].

O telecomando foi desenvolvido para permitir o manejo de materiais radioativos à distância. Resume-se em um dispositivo mecânico que transforma os movimentos de um ser humano em movimentos correspondentes em um local remoto. O controle numérico é um esquema de gerar ações de controle baseadas em dados armazenados [6] [20].

As principais vantagens do emprego de um robô no ambiente industrial são a redução do custo da mão de obra e o aumento da flexibilidade quando comparada com a de máquinas de aplicação específica a determinado produto. Além disso, o robô pode proporcionar um aumento da produtividade, melhorar as condições de trabalho realizando tarefas repetitivas e tediosas ou executar trabalhos perigosos [6].

Devido à flexibilidade de programação, o robô industrial é um típico componente de sistemas automáticos programáveis. Robôs são utilizados tanto em sistemas fixos de manufatura como em sistemas flexíveis de manufatura [3].

Um robô industrial é constituído por [3]:

- Uma estrutura mecânica ou manipulador, que consiste de uma seqüência de corpos rígidos (elos) conectados por meio de articulações (juntas); um manipulador é caracterizado por um “braço” que assegura mobilidade, um “pulso” que confere destreza e um efetuator final (ex: ferramenta) que realiza a tarefa programada;
- Atuadores, que colocam o manipulador em movimento através da movimentação das juntas; os motores são usualmente elétricos e hidráulicos, e ocasionalmente pneumáticos;
- Sensores, que medem as condições do manipulador (ex: *encoder* para medir posição angular) e em alguns casos as condições do ambiente de trabalho;
- Um sistema de controle (computador) que permite o controle e supervisão dos movimentos do manipulador.

### 2.1.1 Modelo cinemático

Um robô industrial antropomórfico é basicamente uma série de corpos rígidos numa cadeia cinemática aberta. O movimento da interface mecânica<sup>1</sup> do

---

<sup>1</sup> Interface mecânica é o flange do robô utilizado para a fixação das ferramentas utilizadas na realização das tarefas programadas.

robô é causado pelos movimentos dos elos intermediários entre a base e o último elo. Assim, a postura<sup>2</sup> da interface mecânica pode ser determinada, sabendo a posição e a orientação de cada elo em série, da base até o final da cadeia [20].

A notação *Denavit-Hartenberg*, que pode ser usada para descrever a cadeia cinemática do robô, é um método sistemático de descrever esta relação cinemática. Ela usa o mínimo número de parâmetros para descrever completamente a relação cinemática entre os elos do robô [20].

A notação *Denavit-Hartenberg*, ilustrada na Figura 2.1, é definida conforme os seguintes passos [3]:

- Define-se o eixo  $z_i$  coincidente ao eixo da junta  $i+1$ ;
- Coloca-se a origem  $O_i$  na intersecção do eixo  $z_i$  com a normal comum<sup>3</sup> aos eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$ . Também coloque  $O_i$  na intersecção da normal comum com o eixo  $z_{i-1}$ ;
- Escolhe-se o eixo  $x_i$  ao longo da normal comum aos eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$ , com direção da junta  $i$  para a junta  $i+1$ ;
- Escolhe-se o eixo  $y_i$  conforme a regra da mão direita.

Esta notação deixa de ser única nos seguintes casos:

- Para o primeiro elo apenas a direção do eixo  $z_0$  é especificada,  $O_0$  e  $x_0$  pode ser escolhida arbitrariamente;
- No último elo (elo  $n$ ) apenas a escolha do eixo  $x_n$  é definida, portanto  $z_n$  pode ser arbitrariamente definida;
- Quando uma junta é prismática, apenas a direção  $z_{i-1}$  é definida.

---

<sup>2</sup> Postura é a posição e orientação do sistema de coordenadas da interface mecânica ou ferramenta acoplada ao robô em relação a um sistema de coordenadas base.

<sup>3</sup> A normal comum entre duas linhas é a linha que determina a menor distância entre estas duas linhas[3].

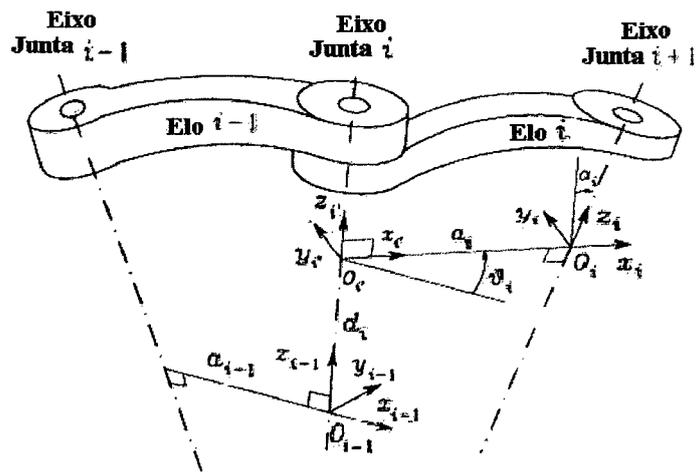


Figura 2.1 Parâmetros cinemáticos Denavit-Hartenberg [3].

Uma vez que os sistemas de coordenadas de cada elo foram determinados, a posição do sistema de coordenadas  $i$ , em relação ao sistema de coordenadas  $i-1$ , pode ser completamente especificado com os seguintes parâmetros:

$a_i$  : distância entre  $O_i$  e  $O_{i-1}$ ;

$d_i$  : coordenada de  $O_i$  ao longo de  $z_{i-1}$ ;

$\alpha_i$  : ângulo entre o eixo  $z_{i-1}$  e  $z_i$  sobre o eixo  $x_i$ , positivo quando a rotação for no sentido anti-horário;

$\theta_i$  : ângulo entre o eixo  $x_{i-1}$  e  $x_i$  sobre o eixo  $z_{i-1}$ , positivo quando a rotação for no sentido anti-horário.

A Figura 2.2 mostra um desenho esquemático do robô que está sendo desenvolvido no âmbito do projeto Roboturb, e seu sistema de coordenadas segundo a notação Denavit-Hartenberg, na posição 0.

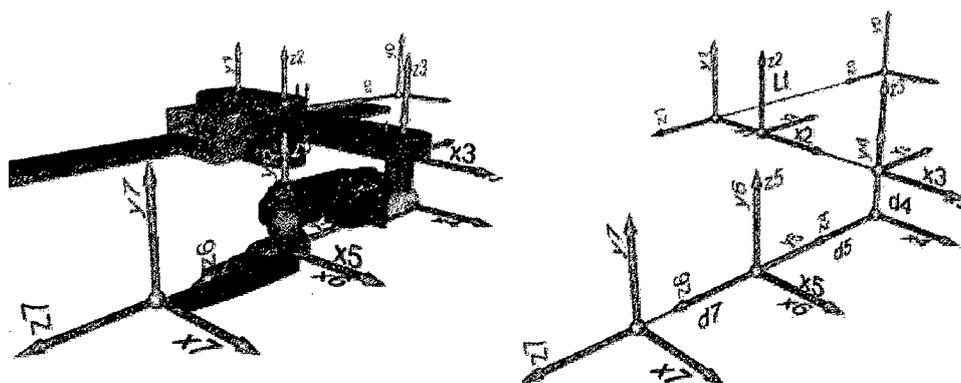


Figura 2.2 Roboturb e sistema de coordenadas segundo notação Denavit-Hartenberg.

Dois dos parâmetros ( $a_i$  e  $\alpha_i$ ) são sempre constantes e dependem apenas da geometria do elo  $i$  entre duas juntas. Dos dois parâmetros restantes, apenas um é variável dependendo do tipo de junta entre o elo  $i-1$  e o elo  $i$ . Assim, se a junta  $i$  for uma junta de revolução,  $\theta_i$  é variável e  $d_i$  é constante, e se for uma junta prismática  $d_i$  é variável e  $\theta_i$  é constante.

Com isto é possível expressar a transformação entre o sistema de coordenadas  $i$  e o sistema de coordenadas  $i-1$  de acordo com a seguinte matriz de transformação homogênea [3]:

$$A_i^{i-1}(q_i) = A_i^{i-1} A_i^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Note que a matriz de transformação é função apenas da variável da junta  $i$ , que é  $\theta_i$  para junta de revolução e  $d_i$  para junta prismática.

A notação Denavit-Hartenberg permite construir uma função da cinemática direta<sup>4</sup> pela composição das transformações dos sistemas de coordenadas de cada junta, expressa pela Equação 2.1, em uma única matriz de transformação homogênea. Assim a posição e orientação do sistema de coordenadas  $n$  em relação ao sistema de coordenadas base, conforme Figura 2.3, é dado por [3]:

$$T_n^0(q) = A_1^0(q_1) A_2^1(q_2) \dots A_n^{n-1}(q_n) \quad (2.2)$$

---

<sup>4</sup> Cinemática direta é relação que estabelece a posição do efetuador no espaço cartesiano dada à posição de cada junta do robô.

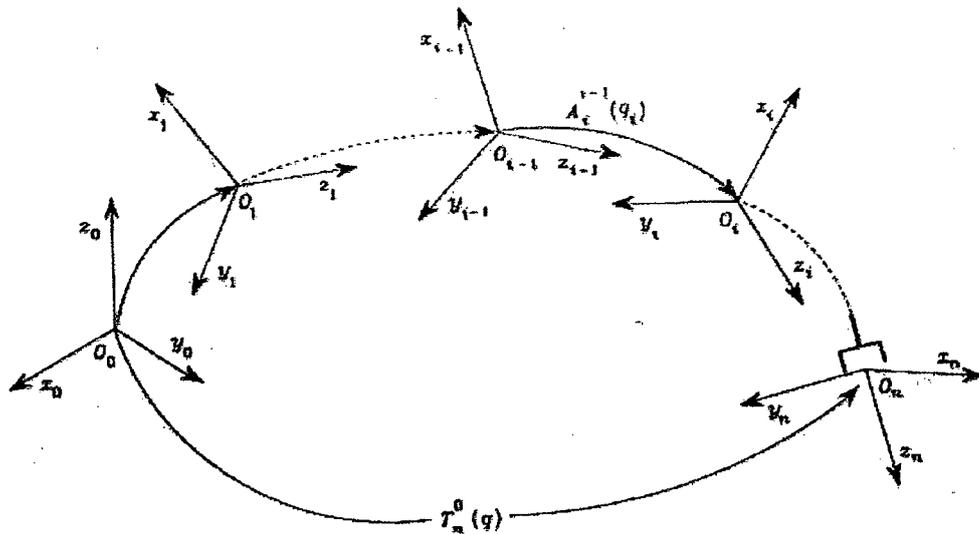


Figura 2.3 Sistema de coordenadas do efetuador em relação ao sistema de coordenadas base [3].

A posição do efetuador também pode ser determinada utilizando o menor número de coordenadas, respeitando a geometria da estrutura. A orientação pode ser determinada em termos da mínima representação descrevendo a rotação do sistema de coordenadas do efetuador em relação ao sistema de coordenadas da base.

Desta maneira é possível descrever a postura do efetuador da seguinte forma:

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \Phi \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Onde  $p$  é a posição do efetuador e  $\Phi$  é sua orientação.

O vetor  $x$  é definido no volume de trabalho do robô, e este volume é normalmente chamado de espaço operacional.

De outra maneira, o espaço de junta pode ser definido como:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Onde  $q_i = \theta_i$  para junta de revolução e  $q_i = d_i$  para junta prismática.

Considerando a dependência da posição e orientação em relação às variáveis de junta, a Equação 2.2 pode ser escrita de outra forma:

$$x = k(q) \tag{2.5}$$

Esta equação permite conhecer as variáveis do espaço operacional a partir das variáveis do espaço de junta.

## 2.2 Justificativas para a avaliação de desempenho de robôs industriais

Conhecer o desempenho de determinado robô é essencial para a classificá-lo como apto ou não apto a realizar determinada tarefa. Isso se torna mais crítico quanto maior for a exigência da tarefa a ser realizada [2].

A grande maioria dos fabricantes de robôs industriais apenas informam a resolução<sup>5</sup> e a repetitividade de posicionamento<sup>6</sup>, deixando de especificar a tendência de posicionamento<sup>7</sup>. Isto não é crítico quando a programação é realizada *on line*, ou seja, quando a ferramenta acoplada ao robô é posicionada manualmente e sob a observação do programador, através de um controle. Mas, com o aumento da complexidade das tarefas realizadas por robô esta característica de desempenho está cada vez sendo mais requisitada pelos usuários, principalmente para a programação *off line*, como será mostrado adiante[2] [7].

### 2.2.1 Fontes de erro em operações realizadas por robô

Enquanto a repetitividade de posicionamento de robôs industriais está na ordem de 1 mm (podendo chegar a menos de 0,1 mm) a tendência de posicionamento é consideravelmente maior, podendo chegar a 15 mm ou mais [2] [8] [9] [10] [11].

Os fatores que mais contribuem para os erros de posicionamento, percurso e velocidade<sup>8</sup> do robô são [1] [8] [10] [12] [13] [14]:

- Erro na determinação dos parâmetros do modelo cinemático; ou

---

<sup>5</sup> Resolução é a mínima alteração incremental nas coordenadas da interface mecânica [28].

<sup>6</sup> Repetitividade de posicionamento expressa a dispersão das posições alcançadas em resposta a uma posição comandada [21].

<sup>7</sup> Tendência de posicionamento expressa a componente sistemática do erro de posicionamento em resposta ao posicionamento programado [21].

<sup>8</sup> Os erros de posicionamento, percurso e velocidade são os desvios em relação à posição, ao percurso e à velocidade ideal programada.

seja, os parâmetros de projeto podem diferir da geometria real fabricada;

- Erro na determinação da posição “zero”; a posição “zero” do encoder difere da posição “zero” da estrutura mecânica;
- Rigidez finita dos elos; o que causa deformações diferentes para cada posição dos elos;
- Incerteza de medição dos “encoders”; causando um erro na determinação da posição dos elos do robô;
- Folga nos redutores, correias, harmônicos e juntas; ocasionando histerese no posicionamento;
- Variações de temperatura; que deformam a estrutura mecânica;
- Carga inercial e vibrações quando em movimento; podendo causar deformações nos elos;
- Desgaste das juntas e engrenagens com o tempo de uso; que causam uma folga maior do que a considerada, por exemplo numa calibração anterior;
- Algoritmo de controle e transformações de coordenadas; onde são realizados truncamentos;

A maioria destes erros podem ser compensados se forem introduzidos parâmetros no modelo cinemático que os levem em consideração[13].

### **2.2.2 Programação de robôs ‘on-line’ e ‘off-line’**

A programação ‘on-line’ consiste em movimentar a ferramenta acoplada ao robô até a posição desejada pelo operador, utilizando o controle manual. Já a programação ‘off-line’ consiste em programar as tarefas a serem realizadas pelo robô em um computador considerando o modelo geométrico do robô e do ambiente (modelo virtual) [10].

A maioria dos robôs industriais são projetados de forma que a repetitividade de posicionamento seja pequena, enquanto se permite que a tendência de posicionamento seja muito maior [2] [8] [9] [10].

Para entender melhor, considere uma tarefa de solda ponto. Na programação ‘on line’, o programador leva a ferramenta com um controle manual até a marca na chapa a ser soldada, então o ponto é gravado no

programa. Para o programador, não importa se aquele ponto tem as coordenadas (1500, 800, 700) ou (1505, 795, 695) e sim se a ferramenta está na posição correta [10]. Assim somente a repetitividade de posicionamento vai influenciar na operação de soldagem [15].

Agora considere o caso da programação 'off-line'. Por exemplo, um ponto de solda é programado para a posição (1500, 800, 700), mas na realidade a posição soldada é (1505, 795, 695). Isto decorre porque a tendência de posicionamento é desconhecida.

Uma grande vantagem da programação 'off-line' esta na redução de tempo ocioso de utilização do robô, já que o programa para a realização das tarefas pode ser confeccionado em outro computador enquanto o robô está em operação. Este é o motivo da calibração de robôs ter crescido na indústria [10].

### 2.2.3 Conseqüências dos erros

Os erros causados por diversas influências, como visto na Seção 2.2.1, podem acarretar em prejuízos, ou até na impossibilidade de realizar uma determinada tarefa. Como exemplo, é possível citar o caso de operações de soldagem a arco e a ponto, onde a repetitividade de posicionamento influencia principalmente nas posições do início e final do cordão, como pode ser visto na Figura 2.4, e no ponto a ser soldado respectivamente. A repetitividade de orientação não é tão crítica em ambas as aplicações [1].

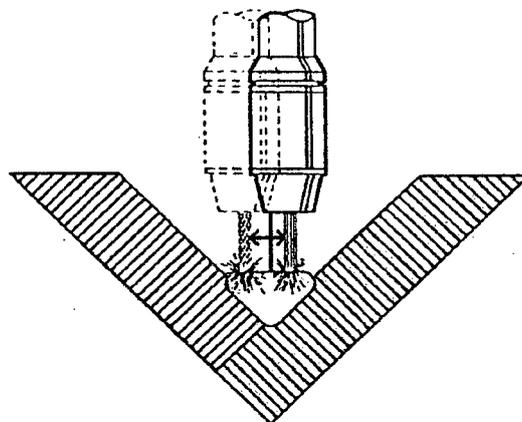


Figura 2.4 Repetitividade de posicionamento em uma operação de solda a arco [1].

Nas montagens efetuadas por robôs industriais, tanto a repetitividade de posição, quanto a de orientação, são críticas, como pode ser verificado na Figura 2.5. Em muitos casos utilizam-se sensores para detectar e corrigir os desvios causados por esses erros no posicionamento do atuador [1].

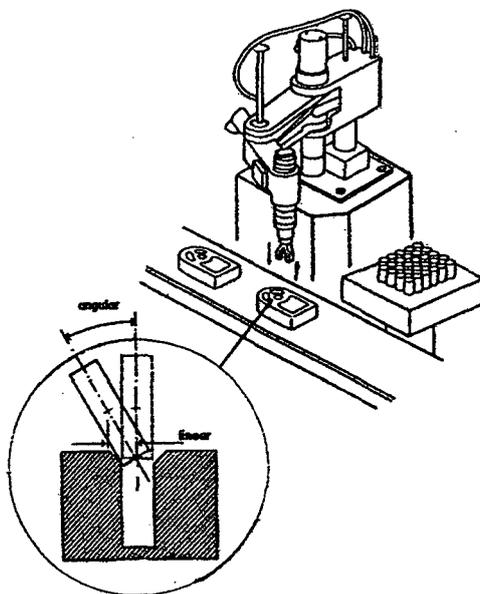


Figura 2.5 Influência da repetitividade de posição e orientação em operações de montagem [1].

Quando o robô é utilizado em operações de manipulação de peças por programação *on-line*:— estampagem, forjamento, injeção e usinagem — um erro de repetitividade significativo pode causar danos às peças manipuladas [1]. O posicionamento incorreto de uma peça a ser usinada na placa de um torno, por exemplo [1].

Um erro que pode causar grandes danos é passível de acontecer quando a programação é realizada *off-line*, e um determinado objeto não está modelado, ou está modelado de forma incorreta no ambiente virtual de programação. Com isso ocorre uma colisão que pode acarretar em danos à peça ou ao próprio robô.

### 2.3 Avaliação de desempenho e calibração de robôs

Nesta seção será abordada a diferença entre o que é a avaliação de desempenho de robôs industriais e o que é a calibração de robôs. Será descrito quais são os passos para se fazer uma calibração, assim como será feita uma

breve descrição da correção de modelos cinemáticos de acordo com dados provindos de medições com sistemas de medição externos ao robô.

### **2.3.1 Avaliação de desempenho**

A avaliação de desempenho visa ajudar o entendimento entre fabricantes e usuários de robôs industriais, assim como facilitar a escolha de um robô para uma aplicação específica. Pode ainda ajudar a verificar se os parâmetros de projeto resultaram em um equipamento de acordo com as especificações desejadas [21]. Um conceito que às vezes é confundido com a avaliação de desempenho é o da calibração de robôs que visa melhorar o desempenho do robô durante a realização de suas tarefas rotineiras.

Segundo o vocabulário internacional de metrologia [16], “Calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões”, ou seja, é a comparação do sistema de medição em análise com um padrão, com o objetivo de obter os valores de correção para a estimativa dos erros sistemáticos, e uma estimativa para os erros aleatórios presentes no sistema.

Com isto observa-se que existe uma diferença entre o conceito de calibração utilizado em metrologia e em robótica, já que em robótica este conceito engloba também a realização da correção, ou ajuste, do modelo cinemático do robô.

### **2.3.2 Calibração**

A calibração, como utilizado em robótica, é um procedimento que melhora o desempenho do robô sem modificar sua estrutura mecânica e sua arquitetura de controle [2] [17].

Uma das maneiras de melhorar o desempenho do robô é construí-lo com juntas e elos mais rígidos, e com tolerâncias de fabricação mais estreitas. Normalmente este tipo de solução se mostra de alto custo e trabalhosa. Uma solução seria a identificação dos erros de cada robô, e corrigi-los através de

compensações no controlador, através da calibração [8] [18].

O procedimento de calibração de robôs pode ser dividido em quatro partes:

1. Modelamento do robô e de seus erros;
2. Medição de diversas posturas do robô através de um sistema de medição externo;
3. Identificação dos parâmetros do modelo do robô e de seus erros;
4. Correção do modelo do robô utilizado pelo controlador.

Modelamento refere-se à escolha de uma relação entre os parâmetros do robô e a posição da interface mecânica. O modelo selecionado deve conter os fatores considerados significativos na contribuição dos erros de posicionamento e orientação da interface mecânica do robô.

O próximo passo é a coleta de dados de medições da posição da interface mecânica do robô com um sistema de medição externo. Esses dados são processados resultando em novos coeficientes para o modelo cinemático do robô.

Uma maneira de realizar os cálculos de forma a obter novos coeficientes do modelo cinemático pode ser vista no Apêndice A.

Como último passo o novo modelo é implementado no controlador do robô [8].

Na teoria, a tendência de posicionamento pode ser reduzida no máximo até a magnitude da repetitividade de posicionamento [15][19]. A calibração do robô utiliza normalmente de 25 a 50 pontos de medição no volume de trabalho do robô [10].

## **2.4 Critérios de desempenho estabelecidos na norma ISO 9283**

Como o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para avaliação de desempenho de robôs apresenta-se a norma ISO 9283 [21].

A norma ISO 9283 tem a finalidade de facilitar o entendimento entre usuários e fabricantes de robôs industriais, definir as características mais importantes de desempenho e descrever como elas devem ser especificadas e

quantificadas.

O usuário desta norma deve definir quais características de desempenho devem ser quantificadas de acordo com suas próprias necessidades, já que a norma não define quais são os testes para cada tipo de robô específico.

Os testes descritos são destinados para o desenvolvimento e verificação de especificações de robôs, mas também podem ser usados para testes de protótipos, modelos e aceitação de robôs.

### 2.4.1 Notações utilizadas

A tendência, a repetitividade e o desempenho dinâmico do robô são definidos a partir da interface mecânica existente na extremidade do robô, onde são fixados as ferramentas e os dispositivos empregados na execução de tarefas [14]. A posição desta interface geralmente é dada em termos de três coordenadas cartesianas e sua orientação através de três ângulos. De acordo com a norma ISO 9787 [23] a representação da orientação da extremidade do robô é feita através dos ângulos  $a$ ,  $b$  e  $c$ , respectivamente em torno dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , cujo sentido positivo está indicado na Figura 2.6.

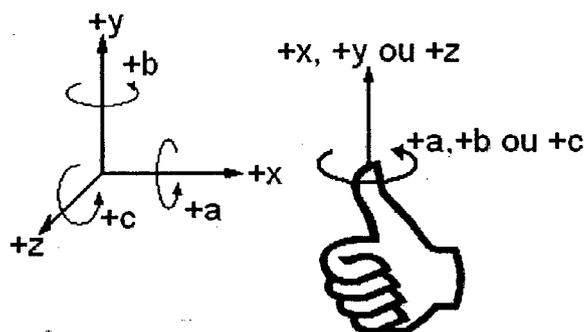


Figura 2.6 Sistema de coordenadas utilizado [14].

A Figura 2.7 mostra os sistemas de coordenadas fixados na base do robô  $(x_1, y_1, z_1)$  e na interface mecânica  $(x_m, y_m, z_m)$  de acordo com a norma ISO 9787. Neste caso a postura da interface mecânica é formada pelas três coordenadas cartesianas da origem do sistema  $(x_m, y_m, z_m)$  em relação ao sistema da base  $(x_1, y_1, z_1)$ , e pelos três ângulos em torno dos eixos  $x_1$ ,  $y_1$ , e  $z_1$  que determinam a orientação do sistema  $(x_m, y_m, z_m)$  [14][23].

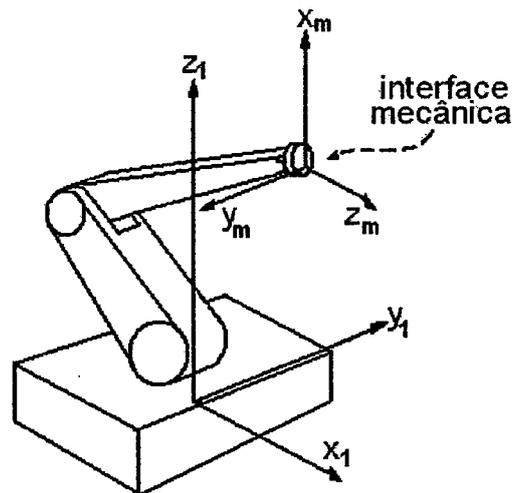


Figura 2.7 Sistema de coordenadas [14].

### 2.4.2 Condições para avaliação de desempenho

Neste item serão descritas as condições em que o robô deve estar submetido para a realização dos testes [21].

#### **Montagem do robô.**

O robô deve ser montado e fixado de acordo com as especificações do fabricante do equipamento. O robô deve estar totalmente operacional, com todos os alinhamentos necessários, e todos testes funcionais já realizados.

#### **Pré-aquecimento.**

Os testes devem ser realizados após o período de pré-aquecimento, estabelecido pelo fabricante. Esta condição só não é válida para o teste de desvio das características de postura.

#### **Ajustes.**

Quaisquer tipos de ajuste que possam influenciar nos resultados dos testes devem ser mantidos constantes e bem caracterizados durante a realização dos testes.

#### **Condições de operação.**

Todas as condições de operação estabelecidas pelo fabricante, como tensão de alimentação, pressão de ar, condições eletromagnéticas do ambiente, entre outros, devem ser supridas dentro dos níveis especificados.

#### **Temperatura.**

A temperatura ambiente ( $\theta$ ) de onde os testes serão realizados deve ser

mantida na faixa  $(\theta \pm 2)$  °C. Idealmente a temperatura deve ser 20 °C, mas se a temperatura média ambiente for outra, esta deve ser explicitada no relatório dos testes. O robô e os instrumentos de medição devem estar no ambiente de medição tempo suficiente para o equilíbrio térmico, sendo recomendado 24 h.

#### **Sistema de coordenadas.**

Os dados de posição e orientação devem ser expressos no sistema de coordenadas da base do robô ou no sistema de coordenadas definido pelo sistema de medição.

Caso o sistema de coordenadas definido seja outro, uma relação deve ser estabelecida, por medição, para que os resultados sejam expressos num sistema de coordenadas comum. A referência e os pontos medidos para esta transformação devem estar dentro do volume onde serão realizadas as medições e o mais distantes possível.

#### **Estabilização.**

As medições estáticas devem ser realizadas após a estabilização da posição alcançada, se não for definido de outra forma.

#### **Sistema de medição.**

O erro máximo do sistema de medição não deve ser superior a 25% da amplitude da característica a ser quantificada. A frequência de aquisição, no caso de medições dinâmicas, deve ser alta o suficiente para garantir a representação da característica a ser quantificada.

#### **Carga.**

Todos os testes devem ser executados com 100% da carga admitida, ou seja, massa, posição do centro de gravidade e momentos de inércia, de acordo com as especificações do fabricante.

Para avaliar características que tenham dependência com a carga aplicada a interface mecânica do robô, outros valores de carga podem ser utilizados. Quando uma parte do sistema de medição for fixada ao robô, sua massa e posição devem ser consideradas como parte da carga de teste.

#### **Velocidades.**

As características de postura devem ser quantificadas com a máxima velocidade entre as posturas programadas. Outros testes podem ser realizados com 50% e 10% da velocidade máxima entre as posturas programadas.

A velocidade máxima para cada teste depende do formato e tamanho do percurso. O robô deve atingir esta velocidade em pelo menos 50% da extensão do percurso.

#### **Testes de compatibilidade eletromagnética.**

O relatório técnico ISO/TR 11062 [24] estabelece outras condições ambientais para testes de imunidade a descargas eletromagnéticas, imunidade a variação da tensão de alimentação, imunidade a explosão, imunidade a quedas de tensão, pequenas interrupções e picos de tensão de alimentação, entre outros.

Para este tipo de avaliação são comparados os resultados de avaliação de desempenho em condições normais de funcionamento (por exemplo tensão de alimentação dentro da faixa estabelecida pelo fabricante) com os resultados da avaliação de desempenho em condições estabelecidas pela ISO/TR 11062 (por exemplo interrupções de 20 ms na tensão de alimentação).

#### **2.4.3 Posturas e percursos de avaliação**

Este item descreve como definir as posturas e percursos a serem programadas no robô para a realização dos testes.

##### **Postura.**

As posturas programadas, para os ensaios estáticos, devem estar em um plano dentro de um cubo virtual no volume de trabalho do robô. Quando o robô tem um movimento em um dos eixos, maior em relação aos demais, o cubo pode ser substituído por um paralelepípedo retangular. A posição do cubo no volume de trabalho do robô deve ser ilustrada no relatório dos testes. Um exemplo é mostrado na Figura 2.8.

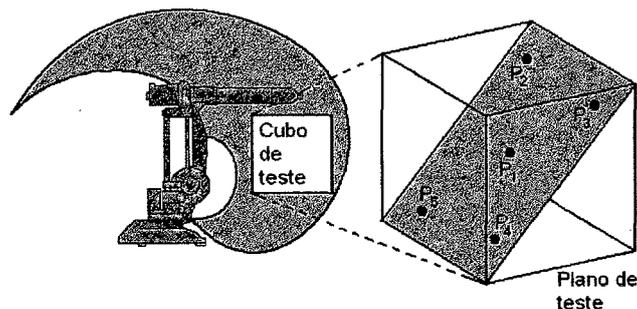


Figura 2.8 Exemplo de cubo de teste no volume de trabalho do robô [14].

Um único cubo, com vértices designados de C1 até C8, conforme Figura 2.9, é localizado no volume de trabalho do robô de modo a satisfazer os seguintes requisitos: (a) o cubo deve estar localizado na parte do volume de trabalho com a maior utilização e (b) o cubo deve ser o maior possível, com as arestas paralelas ao sistema de coordenadas do robô.

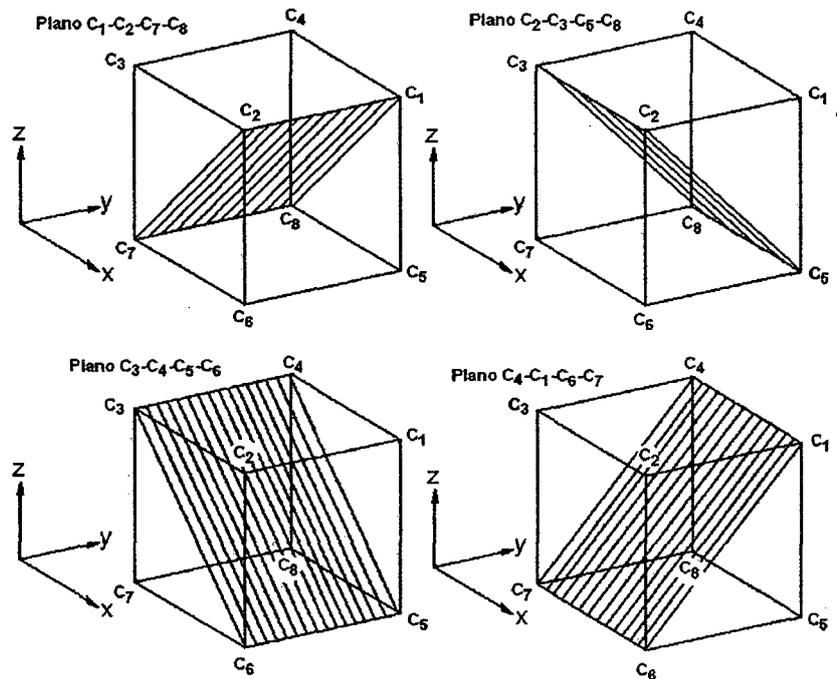


Figura 2.9 Planos de teste [14].

Um dos planos, mostrados na Figura 2.9, deve ser escolhido para os testes.

Cinco pontos, localizados nas diagonais do plano de medição (P1 até P5) são utilizados nos testes de postura. A postura P1 é a intersecção das diagonais do plano de teste, e é o centro do cubo. As posturas de P2 a P5 estão localizadas a uma distância de  $(10 \pm 2) \%$  do comprimento da diagonal (L) medida a partir das arestas do cubo, conforme Figura 2.10.

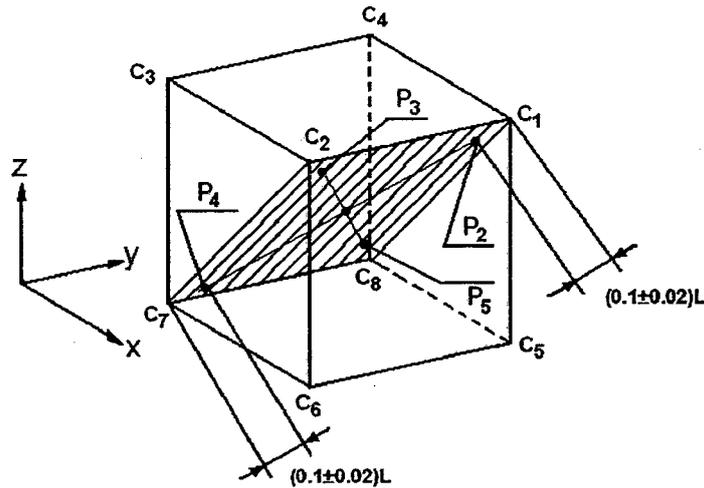


Figura 2.10 Posições para os testes estáticos [14].

Os ciclos de teste são estabelecidos para cada característica de desempenho, mostrados mais adiante.

**Percursos.**

Os percursos a serem testados devem estar localizados em um dos quatro planos mostrados na Figura 2.11

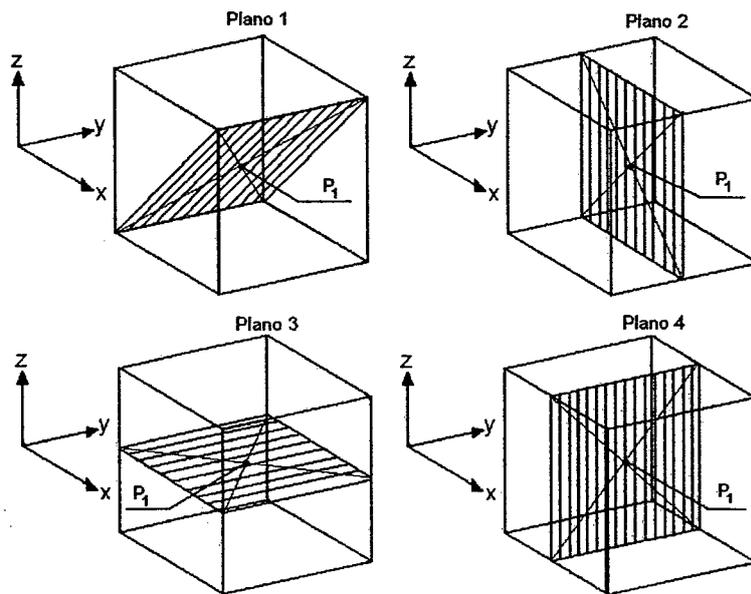


Figura 2.11 Planos que contem os percursos a serem testados [14].

Para robôs com seis eixos deve ser utilizado o Plano 1, a não ser que outro seja especificado pelo fabricante. Os percursos devem ter forma linear ou circular. Outros tipos de percursos podem ser utilizados se especificado pelo fabricante, desde que explicitado no relatório dos testes.

Um exemplo de forma e dimensão de percursos é mostrado na Figura 2.12.

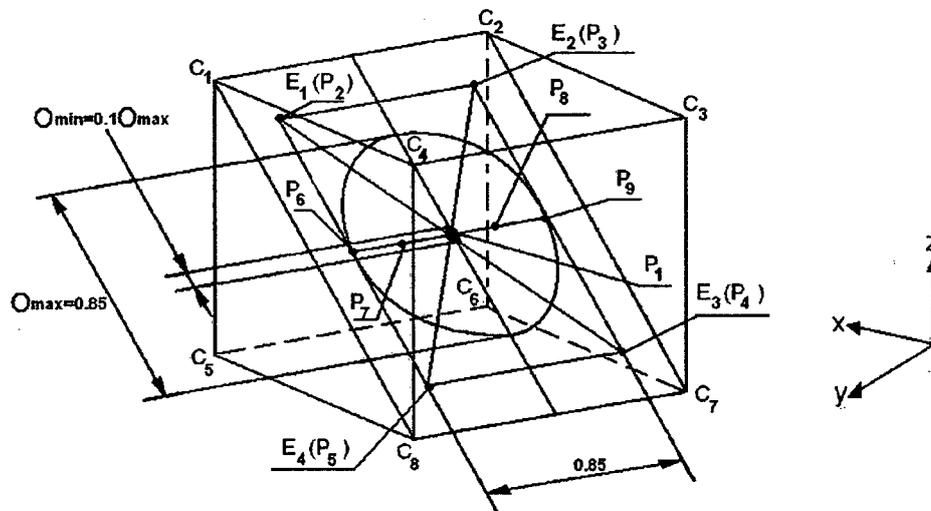


Figura 2.12 Exemplos de percurso [14].

Para comparar características de desempenho entre diferentes robôs, os seguintes parâmetros devem ser os mesmos: tamanho do cubo de teste, mesma carga aplicada ao manipulador, velocidades, percursos, ciclos de medição e condições ambientais [21] [22].

#### 2.4.4 Critérios de desempenho de robôs

Aqui serão expostos alguns dos critérios de desempenho estabelecidos em norma para a avaliação de desempenho de robôs industriais [21]. A norma ISO9283 estabelece uma série de critérios que visam avaliar os mais diversos tipos de robôs. Estes critérios estão listados abaixo:

- Tendência e repetitividade de postura;
- Variação multidirecional na tendência de postura;
- Tendência e repetitividade de distância;
- Tempo de estabilização de postura;
- Sobrepasso;
- Variação das características de postura;
- Intercambiabilidade;
- Tendência e repetitividade de percurso;
- Tendência de percurso na reorientação;

- Desvios de canto;
- Características de velocidade de percurso;
- Tempo mínimo de posicionamento;
- Flexibilidade estática;
- Desvios de tecimento<sup>9</sup>.

A norma ISO9283 não especifica quais destes critérios devem ser quantificados a um robô específico, mas apresenta em seu anexo B um guia para ajudar na seleção dos testes para alguns tipos de aplicação [21].

Como este trabalho visa desenvolver uma metodologia para avaliar um robô, especialmente para ser utilizado na soldagem a arco, serão analisadas apenas as características de desempenho aplicáveis a este robô em específico.

#### Características de postura.

As características de postura quantificam as diferenças que ocorrem entre uma postura programada, ou comandada, e a postura atingida, e as variações na postura alcançada para uma série de repetições da postura programada.

Entende-se como postura programada uma postura que foi definida por programação *on-line*, por entrada manual de dados, ou programação *off-line*. Por outro lado, entende-se como postura atingida a postura real alcançada pelo robô, em modo automático, em resposta à postura comandada. A Figura 2.13 ilustra as definições acima.

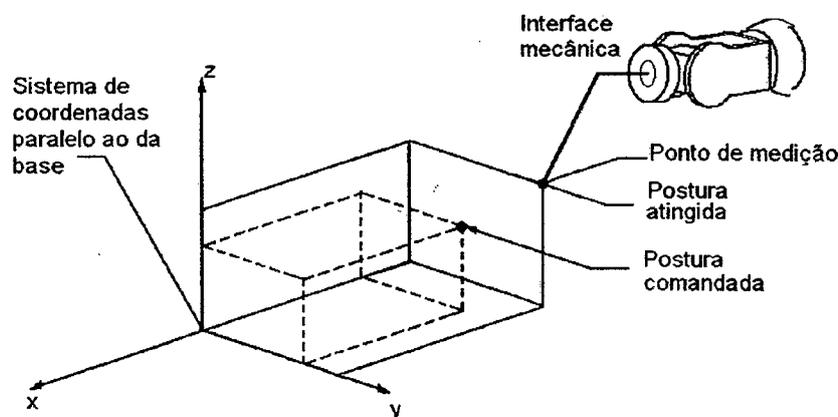


Figura 2.13 Postura comandada e postura atingida [14].

<sup>9</sup> Tecimento é um tipo de movimento em zigue-zague utilizado em soldagem.

O modo de programação das posturas de teste deve ser explicitado no relatório dos testes.

**Tendência de postura.**

A tendência de postura é a diferença entre a postura comandada e a média das posturas atingidas quando a aproximação é realizada pela mesma direção. É dividida em:

1. Tendência de posicionamento ( $AP_p$ ): é a diferença entre uma posição comandada e a média das posições atingidas como mostra a Figura 2.14

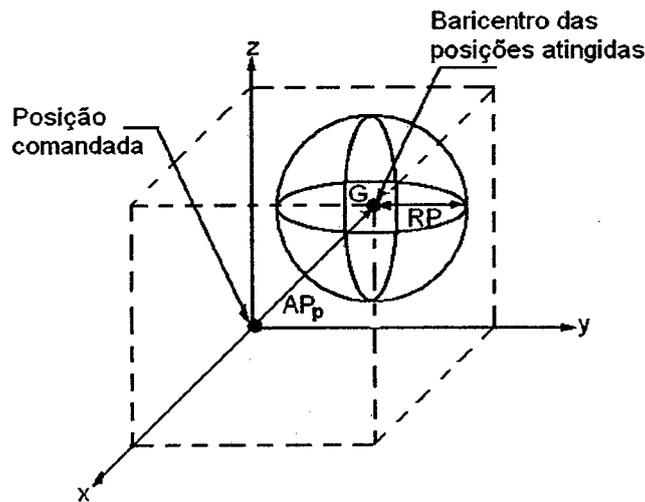


Figura 2.14 Tendência e repetitividade de posicionamento [14].

A tendência de posicionamento deve ser calculada com as seguintes fórmulas:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \tag{2.6}$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c) \tag{2.7}$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c) \tag{2.8}$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c) \tag{2.9}$$

onde:

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  e  $\bar{z}$  são as coordenadas do baricentro (G) das posições atingidas após a repetição das posições atingidas  $n$  vezes;

$x_c$ ,  $y_c$  e  $z_c$  são as coordenadas da posição comandada;

2. Tendência de orientação ( $AP_a$ ,  $AP_b$ ,  $AP_c$  para rotações em A, B e C

respectivamente): é a diferença entre a orientação angular comandada e a média das orientações angulares atingidas como mostrada na Figura 2.15.

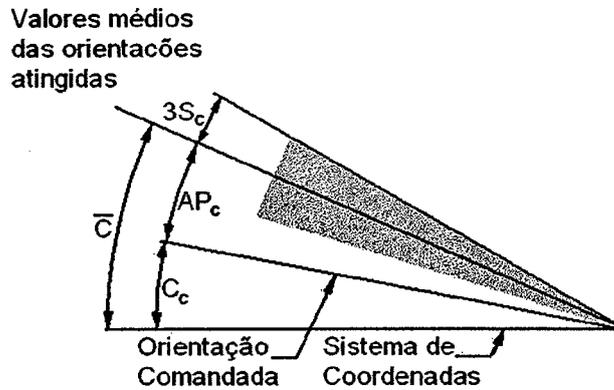


Figura 2.15 Tendência e repetitividade de orientação [14].

A tendência de orientação deve ser calculada com as seguintes fórmulas:

$$AP_a = (\bar{a} - a_c) \quad (2.10)$$

$$AP_b = (\bar{b} - b_c) \quad (2.11)$$

$$AP_c = (\bar{c} - c_c) \quad (2.12)$$

onde:

$\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$  são as médias dos valores dos ângulos obtidos para a mesma postura repetida  $n$  vezes;

$a_c$ ,  $b_c$  e  $c_c$ , são os ângulos da postura comandada;

**Repetitividade de postura.**

A repetitividade de postura (RP) expressa a dispersão das posturas atingidas após  $n$  visitas à mesma postura comandada na mesma direção. É quantificada através da:

1. Repetitividade de posicionamento, que é o raio da esfera centrada no baricentro (G) do grupo de pontos atingidos calculado a partir da média dos raios de cada ponto atingido e do desvio padrão dos raios dos pontos atingidos em relação ao baricentro (Figura 2.14);

A repetitividade de posicionamento deve ser calculada com a seguinte fórmula:

$$RP_i = \bar{l} + 3S_l \quad (2.13)$$

Onde:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (2.14)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (2.15)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (2.16)$$

Sendo que:

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  e  $\bar{z}$  são as coordenadas do baricentro (G) das posições atingidas após a repetição das posições atingidas  $n$  vezes;

$x_j$ ,  $y_j$  e  $z_j$  são as coordenadas da  $j$ -ésima posição atingida.

2. Repetitividade de orientação, que é a faixa de três desvios padrão das medidas angulares em torno dos valores médios dos ângulos de orientação (Figura 2.15), e deve ser calculada com as seguintes fórmulas:

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (2.17)$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \quad (2.18)$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}} \quad (2.19)$$

$a_j$ ,  $b_j$  e  $c_j$  são os ângulos da  $j$ -ésima orientação alcançada;

$\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  e  $\bar{c}$  são as médias dos ângulos das orientações alcançadas.

Este critério pode ser calculado mesmo se as posições não forem normalmente distribuídas.

Os ciclos de movimentação da interface mecânica, para a realização das medições, podem ser visualizados na Figura 2.16.

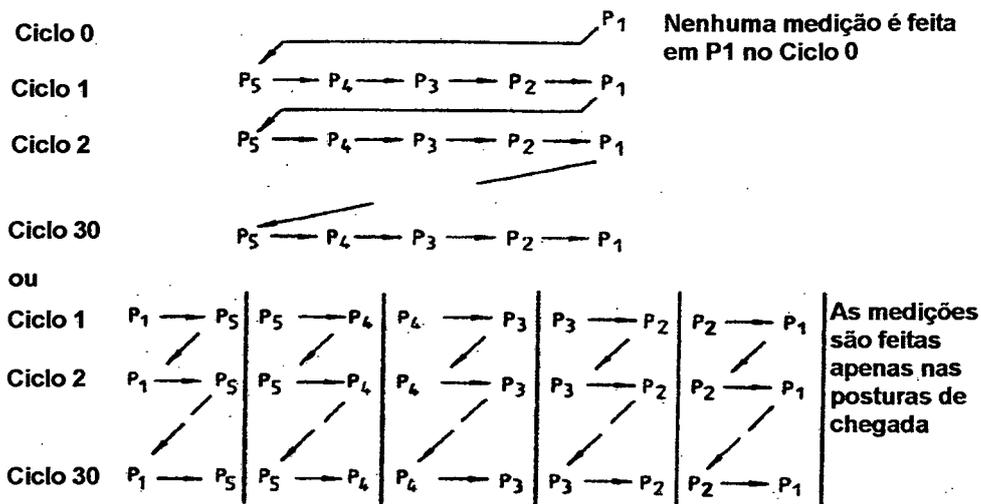


Figura 2.16 Ciclos de medição.

Para cada postura atingida todas as características de postura podem ser quantificadas.

As direções de aproximação da postura comandada devem ser próximas das direções utilizadas na programação do robô para os testes.

**Variação nas características de postura.**

A variação nas características de postura quantifica a variação devida ao aquecimento normal que o robô sofre até atingir a temperatura estável de funcionamento, durante o tempo T.

As medições devem começar com o robô frio, ou seja, logo depois da chave geral ser acionada e continuarem por várias horas até a estabilização térmica do equipamento.

A seguinte seqüência deve ser obedecida:

- Programar os ciclos de teste e aquecimento;
- Desligar o robô por 8 (oito) horas;
- Religar o robô e começar imediatamente as medições.

O ciclo de medição é realizado de modo que a interface mecânica do robô se mova de P2 até P1 dez vezes. As medições são realizadas somente em P1. Todas as juntas do robô devem se mover.

O ciclo de aquecimento deve ser programado de tal forma que todas as juntas se movimentem 70% de seu alcance com a velocidade máxima, durante dez minutos.

Os ciclos devem ser alternados, conforme Figura 2.17, durante oito horas ou até que a diferença entre os últimos cinco ciclos de medição não ultrapasse 10% da maior variação ocorrida na primeira hora de medição.

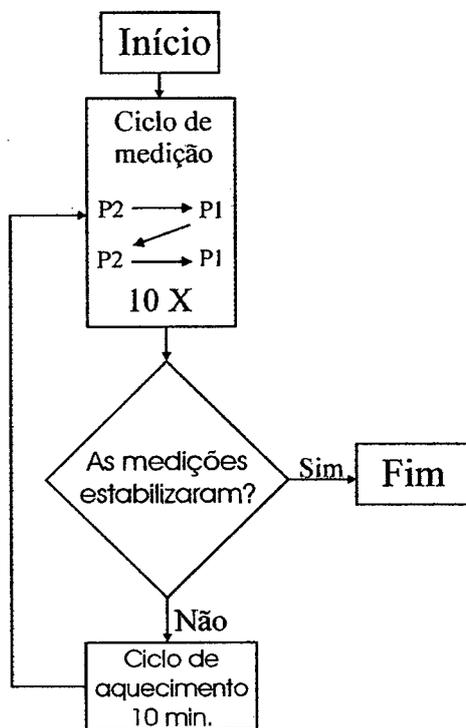


Figura 2.17 Ciclos de teste.

As medições são usadas para calcular a tendência e a repetitividade nas características de postura, que podem ser divididas em:

1. Variação na tendência de postura (dAP), que é quantificada através das seguintes fórmulas:

$$dAP_p = |AP_{t=1} - AP_{t=T}| \tag{2.20}$$

$$dAP_a = |AP_{at=1} - AP_{at=T}| \tag{2.21}$$

$$dAP_b = |AP_{bt=1} - AP_{bt=T}| \tag{2.22}$$

$$dAP_c = |AP_{ct=1} - AP_{ct=T}| \tag{2.23}$$

2. Variação na repetitividade de postura (dRP), que é quantificada através das seguintes fórmulas:

$$dRP_p = |RP_{t=1} - RP_{t=T}| \tag{2.24}$$

$$dRP_a = |RP_{at=1} - RP_{at=T}| \tag{2.25}$$

$$dRP_b = |RP_{bt=1} - RP_{bt=T}| \quad (2.26)$$

$$dRP_c = |RP_{ct=1} - RP_{ct=T}| \quad (2.27)$$

Os resultados são os valores máximos e devem ser expressos conforme a Figura 2.18.

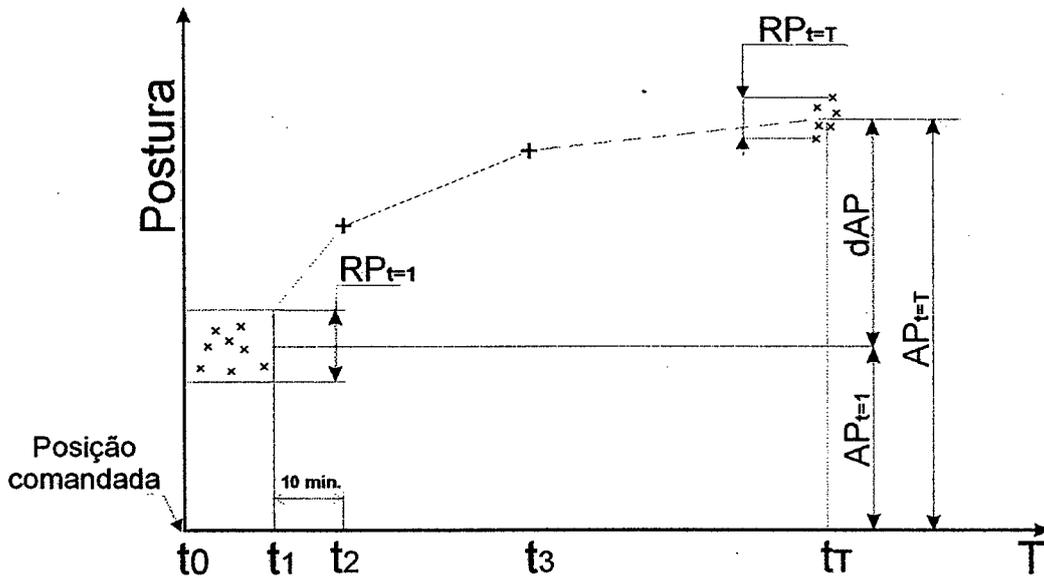


Figura 2.18 Gráfico da variação nas características de postura.

**Sobrepasso.**

O sobrepasso quantifica a capacidade do robô fazer uma parada suave. É a máxima distância da posição alcançada após a passagem pela banda limite (repetitividade de postura). É quantificada como o máximo valor atingido na posição P1 realizando três repetições.

**Características de percurso.**

A definição de tendência e repetitividade de percurso é independente da forma do percurso comandado. A Figura 2.19 ilustra genericamente estas características.

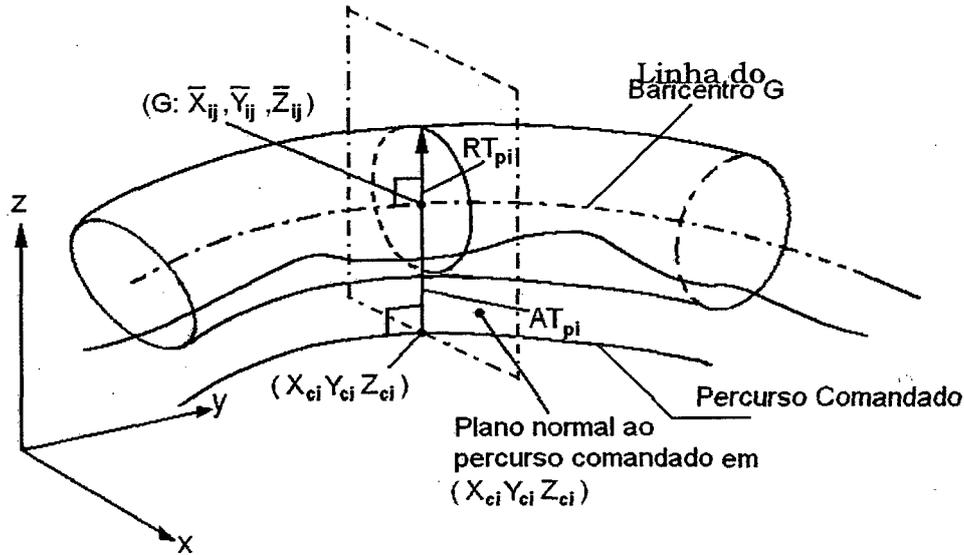


Figura 2.19 Erros de percurso [14].

**Tendência de percurso.**

A tendência de percurso caracteriza a habilidade do robô mover a sua interface mecânica ao longo de um percurso comandado na mesma direção  $n$  vezes, e é o máximo desvio da média obtido na posição (ATp) e orientação (ATa, ATb e ATc) durante estes movimentos.

Esses valores são calculados com as seguintes fórmulas:

$$AT_p = \max \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_{ci})^2} \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.28)$$

Onde:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (2.29)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.30)$$

$$\bar{z}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (2.31)$$

Sendo que, dependendo da velocidade e do tipo de trajetória, o número de pontos ( $m$ ) ao longo do percurso deve ser escolhido e explicitado no relatório dos testes.

Os valores  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$  e  $z_{ci}$  são as coordenadas do  $j$ -ésimo ponto do percurso programado.

Os valores  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$  e  $z_{ij}$  são as coordenadas da intersecção da  $j$ -ésima posição alcançada e o  $j$ -ésimo plano normal.

E os máximos desvios da orientação comandada no percurso são calculados com as fórmulas a seguir:

$$AT_a = \max|\bar{a}_i - a_{ci}| \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.32)$$

$$AT_b = \max|\bar{b}_i - b_{ci}| \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.33)$$

$$AT_c = \max|\bar{c}_i - c_{ci}| \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.34)$$

Onde:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2.35)$$

$$\bar{b}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (2.36)$$

$$\bar{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (2.37)$$

Sendo que:

$a_{ci}$ ,  $b_{ci}$  e  $c_{ci}$  são as orientações comandadas na posição  $(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$ ;

$a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  e  $c_{ij}$  são as orientações alcançadas na posição  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ .

Enquanto que o cálculo de tendência na trajetória é feita em planos ortogonais ao percurso programado, as medições podem ser feitas em função de tempo ou distância.

#### **Repetitividade de percurso.**

A repetitividade de percurso expressa a variação da posição e orientação durante a realização dos movimentos no percurso comandado.

A repetitividade de posição no percurso (RT), para um percurso realizado  $n$  vezes, é o raio do círculo no plano normal com o centro na linha de baricentro, como é mostrado na Figura 2.19. É expressa através de:

$$RT_p = \max RT_{pi} = \max[\bar{l}_i + 3s_{li}] \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.38)$$

onde:

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij} \quad (2.39)$$

$$S_{\bar{l}_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}} \quad (2.40)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2} \quad (2.41)$$

Com as mesmas variáveis definidas anteriormente.

A repetitividade de orientação no percurso, que é o máximo desvio da orientação em relação à média, é expressa através de:

$$RT_a = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n-1}} \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.42)$$

$$RT_b = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - \bar{b}_i)^2}{n-1}} \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.43)$$

$$RT_c = \max 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - \bar{c}_i)^2}{n-1}} \rightarrow i = 1 \dots m \quad (2.44)$$

Com as mesmas variáveis definidas anteriormente.

Para a determinação dos parâmetros de percurso, o percurso comandado deve ser realizado dez vezes, onde todos os parâmetros podem ser quantificadas de uma só vez.

#### **Características de velocidade de percurso.**

O desempenho, a respeito das características de velocidade, é dividido em três critérios:

- Tendência de velocidade de percurso (AV);
- Repetitividade de velocidade de percurso (RV);
- Flutuação na velocidade de percurso (FV).

O gráfico na Figura 2.20 demonstra estes conceitos.

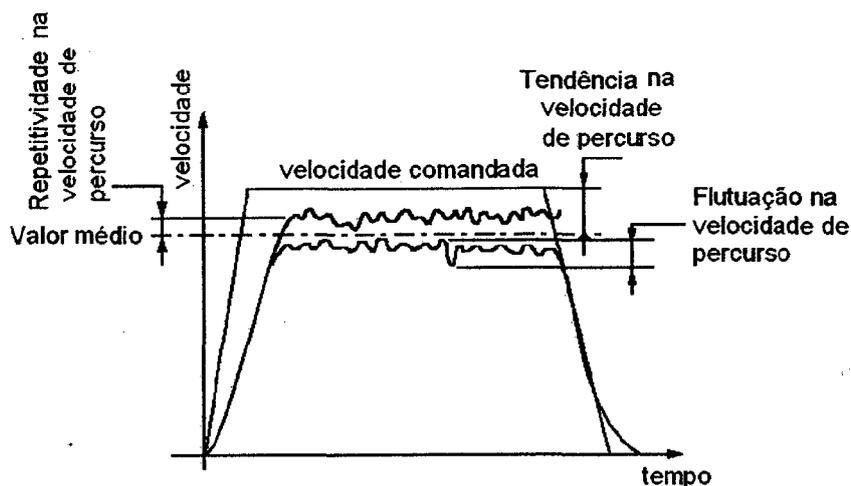


Figura 2.20 Características de velocidade de percurso [14].

As características de velocidade de percurso devem ser realizadas no mesmo percurso utilizado nos ensaios de características de percurso, com  $n = 10$  repetições.

A tendência de velocidade de percurso é definida como sendo a diferença entre a velocidade comandada e a média das velocidades atingidas nos  $n$  percursos, e é expressa em percentagem da velocidade comandada. AV é calculada da seguinte forma:

$$AV = \frac{\bar{v} - v_c}{v_c} \times 100 \quad (2.45)$$

onde:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{v}_j \quad (2.46)$$

$$\bar{v}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_{ij} \quad (2.47)$$

onde:

$v_c$  é a velocidade comandada;

$v_{ij}$  é a velocidade alcançada na  $i$ -ésima medição da  $j$ -ésima repetição da trajetória;

$m$  é o número de medições ao longo do percurso.

A repetitividade de velocidade de percurso é a medida de quanto varia a velocidade alcançada em resposta à velocidade comandada. Deve ser expressa

em porcentagem em relação à velocidade comandada e é calculada da seguinte forma:

$$RV = \pm \left( \frac{3S_v}{v_c} \times 100 \right) \quad (2.48)$$

onde:

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{v}_j - \bar{v})^2}{n-1}} \quad (2.49)$$

com as variáveis definidas anteriormente.

A flutuação na velocidade de percurso é o máximo desvio da velocidade alcançada durante um percurso para a velocidade comandada. É calculada da seguinte forma:

$$FV = \max \left[ \max_{i=1}^m (v_{ij}) - \min_{i=1}^m (v_{ij}) \right] \rightarrow j = 1 \dots n \quad (2.50)$$

com as variáveis definidas anteriormente.

Todas as características de velocidade devem ser quantificadas utilizando o mesmo procedimento.

#### **Desvios de tecimento.**

O tecimento é a combinação de um ou mais movimentos superpostos sobre um percurso, normalmente utilizado para solda a arco. As características que quantificam os desvios de tecimento são:

- Erro de amplitude do tecimento (WS);
- Erro de frequência de tecimento (WF).

O percurso a ser comandado e um exemplo de percurso alcançado pode ser visto na Figura 2.21.

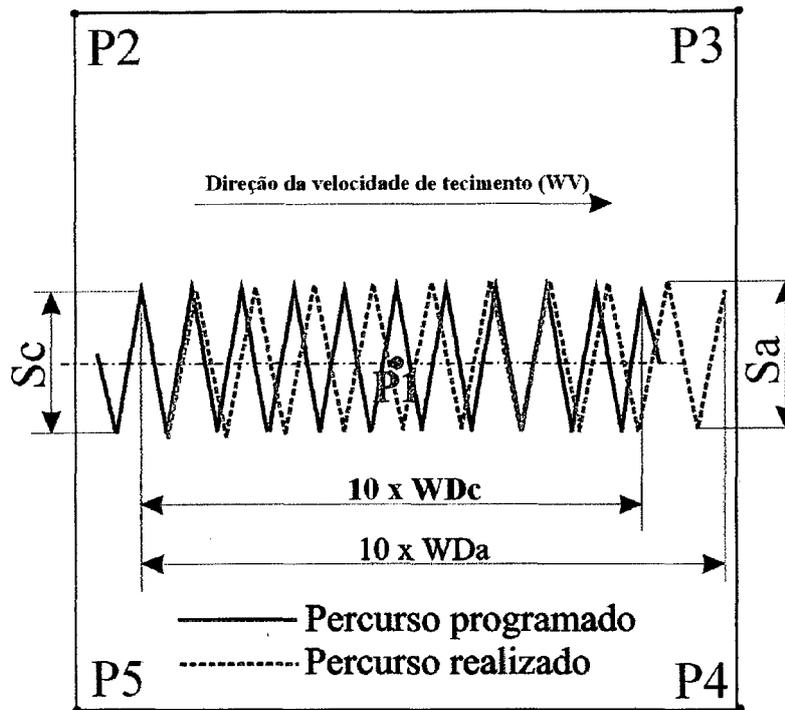


Figura 2.21 Percurso comandado e alcançado para o tecimento.

O erro de amplitude de tecimento é a diferença da amplitude comandada e a média das amplitudes alcançadas, e é expresso em porcentagem através da fórmula:

$$WS = \frac{S_a - S_c}{S_c} \times 100 \quad (2.51)$$

O erro de frequência de tecimento é a diferença entre a frequência espacial comandada e a média das frequências espaciais alcançadas, e é expresso em porcentagem através da fórmula:

$$WF = \frac{F_a - F_c}{F_c} \times 100 \quad (2.52)$$

onde:

$$F_a = 10 \times \frac{WV_a}{10WD_a} \quad (2.53)$$

$$F_c = 10 \times \frac{WV_c}{10WD_c} \quad (2.54)$$

onde:

WVc é a velocidade de tecimento comandada;

WVa é a velocidade alcançada;

W<sub>Dc</sub> é o comprimento de um período do tecimento comandado;

W<sub>Da</sub> é a média dos comprimentos alcançados dos períodos.

## 2.5 Princípio de funcionamento de sistemas de medição para avaliação de desempenho de robôs industriais

Diversos são os tipos de sistemas de medição que podem ser utilizados para a avaliação de desempenho e calibração de robôs industriais. A seguir são analisados os princípios de funcionamento de diversos sistemas de avaliação. Alguns sistemas têm a capacidade de quantificar características de postura e percurso e alguns tem limitações, como será visto adiante.

### 2.5.1 Sistemas de posicionamento de sensor

As características de postura podem ser quantificadas usando um dispositivo, que contém suficientes transdutores de deslocamento ou proximidade, que se aproxima vagarosamente de um cubo. Processando os dados dos transdutores é possível localizar a interface mecânica do robô através de seis graus de liberdade [1].

Um sistema típico, também chamado de sistema cubo-berço, está ilustrado na Figura 2.22. Pode também ser utilizado fixando o cubo no robô e o berço em uma bancada [1].

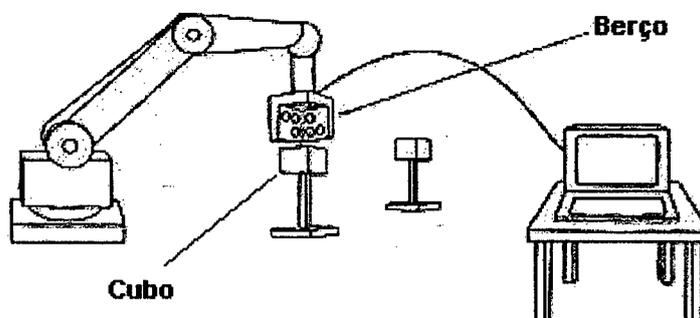


Figura 2.22 Sistema cubo-berço para ensaio de repetitividade de postura [25].

### 2.5.2 Sistemas de comparação de percurso

#### Comparação com guia mecânica.

Este método é baseado na comparação do percurso alcançado com o

percurso programado que pode ser uma guia mecânica de precisão, linear ou circular. A Figura 2.23 mostra um sistema de sensores de proximidade, no dispositivo acoplado à interface do robô. Este dispositivo quantifica os desvios no percurso em relação à guia padrão. Se um número suficiente de transdutores de proximidade forem utilizados, é possível quantificar os erros de posição e orientação no percurso.

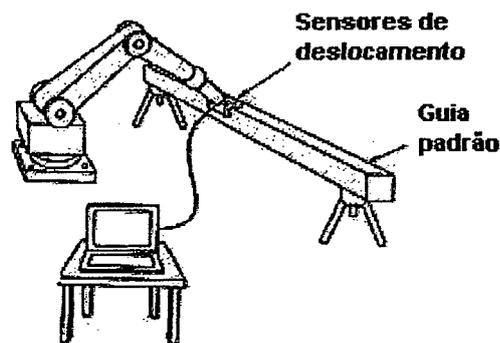


Figura 2.23 Sistema de comparação com guia mecânica [25].

#### **Comparação com guia LASER.**

A tendência e repetitividade de percurso, ao longo de um feixe de laser, podem ser quantificadas utilizando um transdutor fotossensível que tem a capacidade de detectar o erro de posicionamento do laser em relação ao seu centro. O sistema é exemplificado na Figura 2.24.

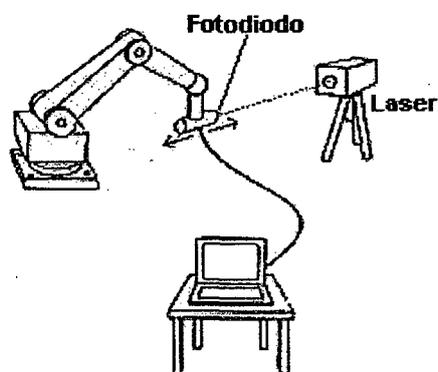


Figura 2.24 Sistema de comparação com feixe Laser [25].

### **2.5.3 Sistemas que utilizam trilateração**

Trilateração é um método de determinar as coordenadas cartesianas  $(x,y,z)$  de um ponto P tomando como base os valores da distância de três pontos

de observação (L1, L2 e L3) e as distâncias entre esses pontos de observação (LB1, LB2 e LB3). A Figura 2.25 ilustra o princípio da trilateração.

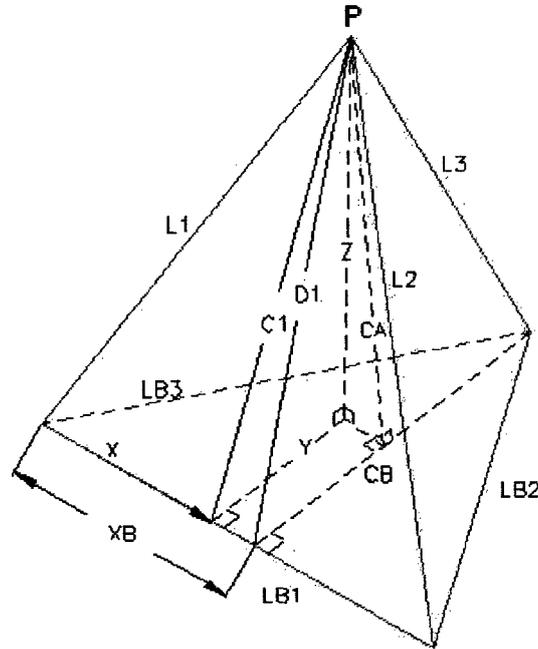


Figura 2.25 Princípio da trilateração [26].

Abaixo são ilustrados alguns exemplos de sistemas que utilizam o princípio da trilateração.

#### **Interferômetro *Multi-laser tracking*.**

Este método é baseado no uso de três lasers interferométricos, com dois eixos servo controlados cada um, que seguem uma mira localizada na interface mecânica do robô (Figura 2.26). A posição da interface pode ser quantificada com a informação da distância de cada laser interferométrico. A orientação, por sua vez, pode ser quantificada se seis feixes de laser e três miras forem empregadas.

O sistema *tracking* consiste em motores e espelhos que mantêm o laser sempre apontado para o dispositivo na interface do robô [26].

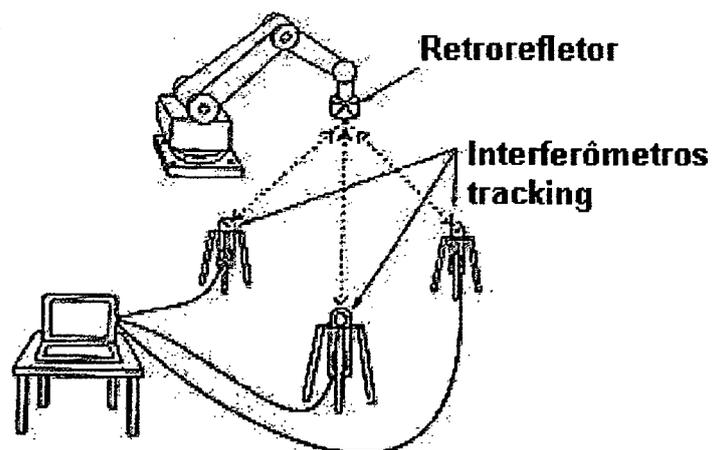


Figura 2.26 Interferômetro multi laser tracking [25].

### Trena 3D.

Este método é baseado na conexão de três cabos, originários de três dispositivos fixos, à interface mecânica do robô. Sabendo-se a distância entre os dispositivos fixos e o comprimento dos cabos é possível determinar a posição da interface do robô. O comprimento dos cabos, mantidos sempre sob tensão constante, é medido por potenciômetros ou *encoders* [15][27][28]. Este sistema pode ser utilizado também para medições dinâmicas [15][29][30][31].

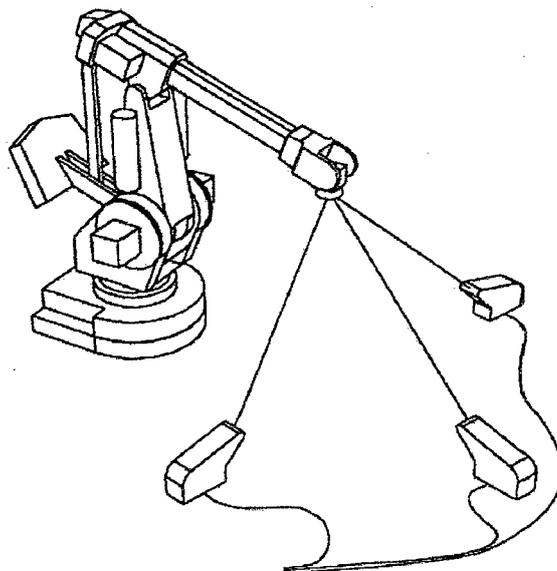


Figura 2.27 Trena 3D [15].

### 2.5.4 Sistemas que utilizam coordenadas esféricas

Sistemas que utilizam coordenada esférica para determinar as coordenadas cartesianas  $(x,y,z)$  de um ponto no espaço podem ser utilizadas, desde que meçam a distância ( $D$ ), o azimute ( $\alpha$ ) e a elevação ( $\beta$ ), como mostra a Figura 2.28.

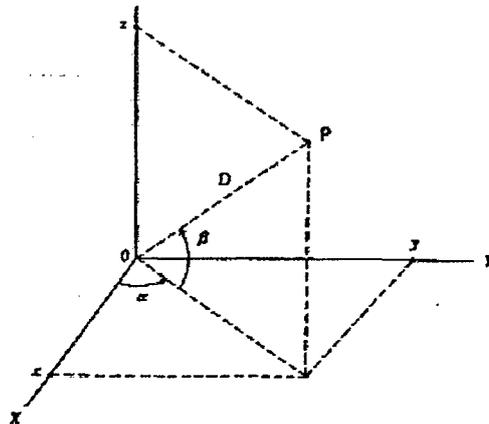


Figura 2.28 Coordenadas esféricas [25].

#### Um interferômetro com laser *tracking*.

Um exemplo de método utilizado em medição por coordenadas esféricas é o do interferômetro com laser *tracking*. A Figura 2.29 mostra um montagem típica deste sistema. A posição do robô pode ser determinada a partir da distância calculada pelo laser interferométrico. O azimute e a elevação são obtidos através dos dados dos *encoders* do sistema *tracking*.

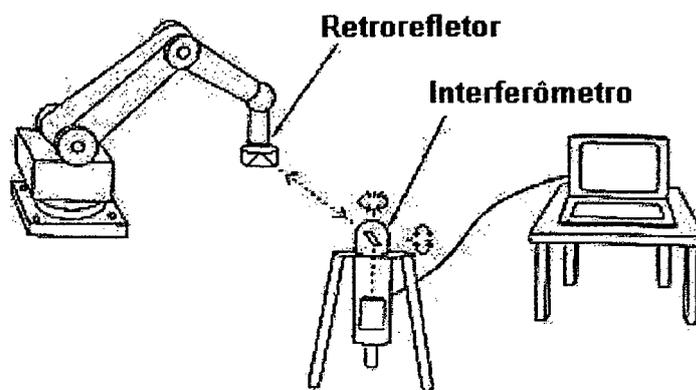


Figura 2.29 Um laser interferométrico com laser *tracking* para determinação de posição [25].

### 2.5.5 Sistemas que utilizam triangulação

Triangulação é um método que pode ser usado para determinar a posição de um ponto no espaço. A Figura 2.30 mostra o princípio de triangulação bi dimensional, onde as coordenadas cartesianas (x,y) do ponto P podem ser determinadas pela distância B1B2 e dois azimutes  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ . Para determinar a terceira coordenada cartesiana (z), o mesmo princípio de triangulação é utilizado.

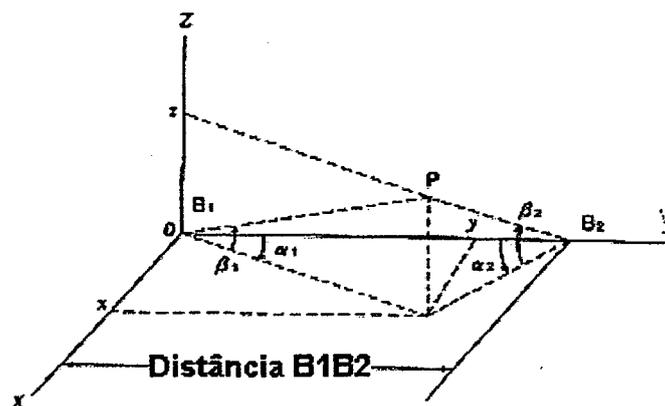


Figura 2.30 Princípio da triangulação [25].

#### Sistemas ópticos de *tracking* por triangulação.

Nesses métodos a posição da interface do robô pode ser determinada com dois conjuntos de dados do azimute e da elevação dados por dois conjuntos de dois eixos de sistemas ópticos dotados de sistemas de *tracking* [33]. Estes métodos podem ser utilizados para medições estáticas e dinâmicas. A Figura 2.31, a Figura 2.32 e a Figura 2.33 mostram sistemas típicos que utilizam este princípio.

No sistema de laser *tracking* mostrado na Figura 2.31, dois feixes laser originários de dois sistemas *tracking* são continuamente apontados para um retrorefletor montado na interface do robô [33].

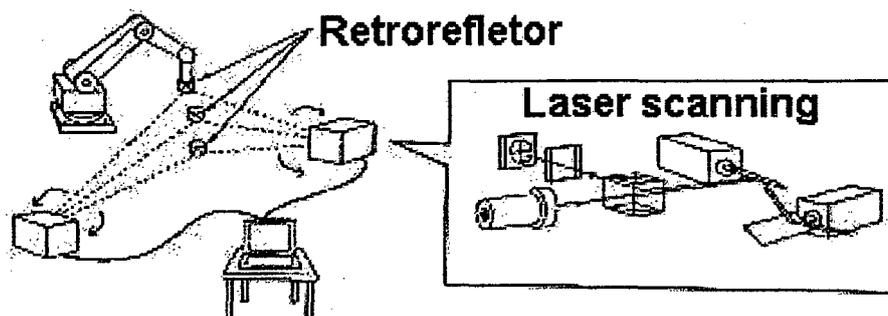


Figura 2.31 Sistema de triangulação por laser *tracking* [25].

O sistema de laser *scanning*, mostrado na Figura 2.32, é baseado na detecção de luz que incide num alvo montado na interface do robô. Esta luz é proveniente de três *scanners* que emitem um plano de luz cada. Quando um plano de luz incide no detector, sua inclinação é determinada através de encoders, e a posição do efetuador do robô pode ser calculada através dos dados da inclinação dos três planos. Dois *scanners* emitem um plano de luz vertical cada um e outro um plano horizontal de luz.

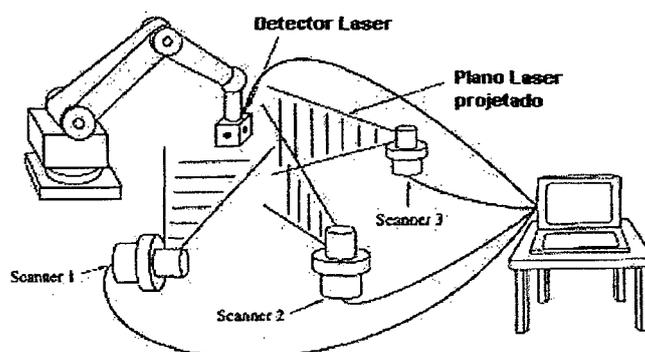


Figura 2.32 Sistema de laser *scanning* [25].

A orientação da interface do robô pode ser determinada se dois feixes de laser incidirem num dispositivo cúbico equipado com dois sensores CCD em faces adjacentes do cubo com mostra a Figura 2.33.

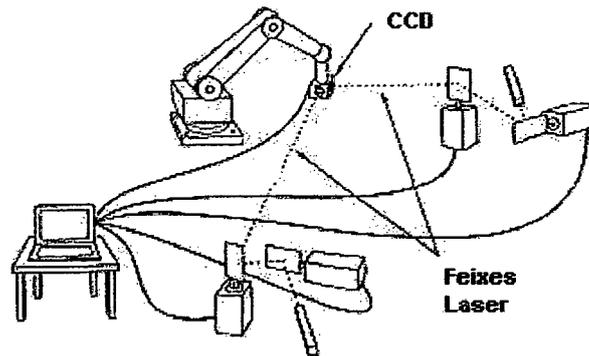


Figura 2.33 Sistema de triangulação com laser *tracking* e sensor CCD [25].

**Sistema que utilizam teodolitos.**

A posição da interface do robô pode ser determinada utilizando dois conjuntos de valores de azimute e elevação usando dois, ou mais, teodolitos apontados para um alvo na interface do robô, como mostra a Figura 2.34. A orientação pode ser calculada se forem utilizados pelo menos três alvos. Teodolitos manuais podem ser utilizados apenas para medições estáticas.

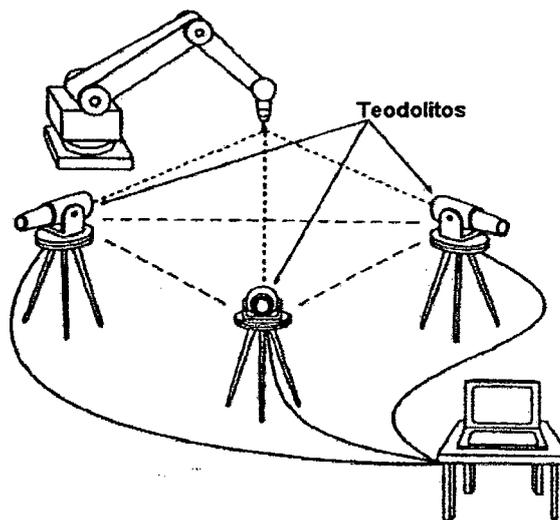


Figura 2.34 Sistema com teodolitos [25].

**Sistema com câmeras.**

A posição da interface do robô pode ser determinada com imagens capturadas com duas câmeras (CCD) que captam a posição de um alvo luminoso no robô (Figura 2.35.). A distância e os ângulos entre as câmeras devem ser conhecidos, para poder determinar a posição da interface do robô com base na posição do alvo no sistema de coordenadas da câmera.

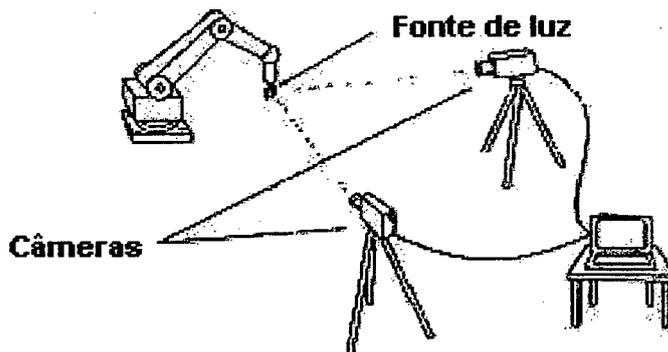


Figura 2.35 Sistema com duas câmeras [25].

### 2.5.6 Sistemas de medição inercial.

As características de postura e percurso podem ser determinadas se forem utilizados três acelerômetros e três giroscópios montados na interface do robô. Não é necessário nenhum outro dispositivo externo se a condição inicial do robô for conhecida. A Figura 2.36 mostra este sistema.

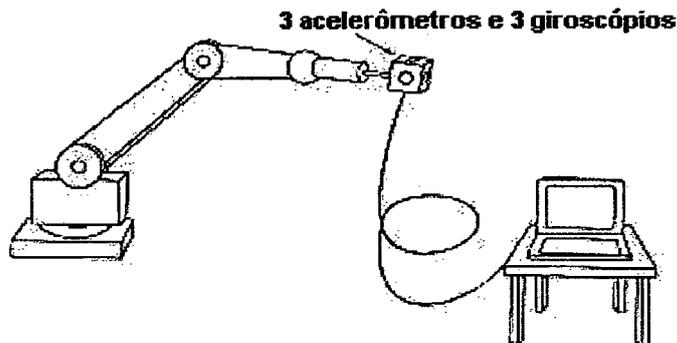


Figura 2.36 Sistema de medição inercial [25].

### 2.5.7 Sistemas que utilizam coordenadas cartesianas

Estes sistemas quantificam diretamente a posição no espaço do sistema de coordenadas cartesiano.

**Sistemas de digitalização bidimensional.** A posição do robô pode ser definida em um plano bidimensional (x,y ou y,z ou z,x) utilizando-se uma câmera de alta resolução montada no robô [34][35]. A câmera conta linhas de uma escala de precisão montada no plano de teste, como ilustra a Figura 2.37.

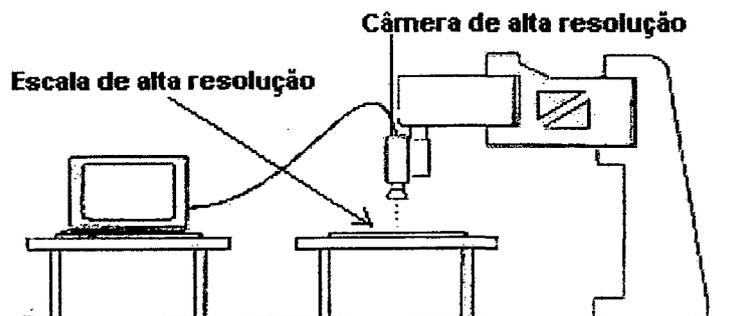


Figura 2.37 Sistema bidimensional de digitalização com CCD [25].

#### **Máquina de medir por coordenadas.**

A posição da interface do robô pode ser determinada utilizando-se uma máquina de medir por coordenadas, determinando a posição de um objeto de dimensões conhecidas fixado ao robô. Se três ou mais posições forem medidas em um cubo fixado ao robô, a orientação pode também ser calculada. Pode ser utilizado um braço de medição para realizar a mesma função [36]. A Figura 2.38 ilustra esse método.

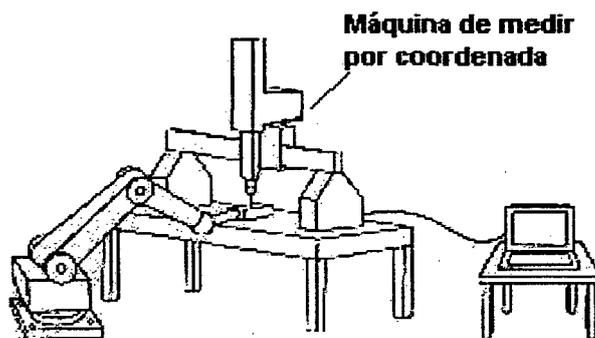


Figura 2.38 Sistema com máquina de medir por coordenadas [25].

### **2.5.8 Sistemas de desenho de percurso**

O percurso bidimensional pode ser determinado fazendo um desenho da mesma no papel. Podem ser utilizadas canetas elétricas, jato de tinta e mecânicas.

A Figura 2.39 representa um método que utiliza papel de fax e uma caneta que sensibiliza este tipo de papel. Se for utilizada uma caneta que gera pulsos, podem ser determinadas características de velocidade também.

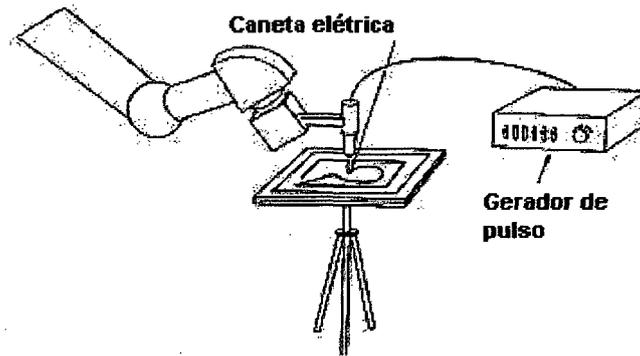


Figura 2.39 Método de desenho de percurso [25].

### 2.5.9 Comparação entre sistemas de medição

Apesar da norma ISO 9283 definir uma série de características de desempenho de robôs industriais, dificilmente um único sistema de medição possui a capacidade para avaliar todas estas características. Cada sistema tem sua vantagem e sua limitação. A seguir é feita uma comparação entre os sistemas. A Tabela 2.1 mostra uma comparação da capacidade de avaliar as características de desempenho de cada sistema de medição, extraída da ISOTR 13309.

Tabela 2.1 Tabela de comparação da capacidade de cada sistema de medição [25].

Métodos de medição		Características de desempenho													
		Tendência de postura	Repetitividade de postura	Var. Multi-dir. tendência postura	Tendência de distância	Repetitividade de distância	Tempo de estabilização postura	Sobrepasse	Variação características de postura	Tempo mínimo de posicionamento	Flexibilidade estática	Tendência de percurso	Repetitividade de percurso	Desvio de canto	Velocidade de percurso
Posicionamento de sensor		2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	-	-	-
Comparação de percurso	Comparação com guia mecânica	4	4	4	-	-	-	-	4	-	4	4	4	-	-
	Comparação com guia laser	4	4	4	3	3	4	-	4	4	3	4	4	4	4
Trilateração	Interferómetro multi laser tracking	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3
	Trilateração ultra sónica	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4
	Trena 3D	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	4
Coordenada Polar	Um interferómetro com laser tracking	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3
	Estação total de medição	1	3	3	3	3	-	-	3	4	3	-	-	-	-
Triangulação	Escala linear	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4
	Triangulação ótica com tracking	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3
	Teodolito	1	3	3	3	3	-	-	3	-	3	-	-	-	-
Medição inercial	Câmeras	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3
		2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
Coordenadas Cartesianas	Digitalização bi-dimensional	4	4	4	4	4	4	4	4	-	4	4	4	4	4
	Máquina de medir por coordenadas	-	-	-	4	4	-	-	-	-	3	-	-	-	-
Desenho de percurso		-	-	-	4	4	-	4	-	4	-	4	4	3	3

Legenda [25]:

**1:** Esses sistemas têm a capacidade de fazer uma auto-calibração, e fazer as medidas no sistema de coordenadas da base do robô;

**2:** Esses sistemas somente fazem as medidas de tendência de postura e percurso relativa;

**3:** Apenas robôs com desempenho considerado médio podem ser testados com esses sistemas;

**4:** O desempenho pode ser quantificado com algumas limitações, entre elas: apenas a posição ou a orientação pode ser quantificada; as características de percurso podem ser quantificadas apenas em percursos limitados; apenas robôs com limitado sobrepasso podem ser avaliados; a incerteza do sistema de avaliação limita a sua aplicação a determinadas características; a medição é limitada ao número de graus de liberdade do equipamento de teste; volume de medição menor do que o cubo especificado na norma ISO 9283; frequência de aquisição muito baixa.

-: Sistema não apto a quantificar esta característica de desempenho.

Com a Tabela 2.1 é possível verificar que a maioria dos sistemas utilizados para avaliação de desempenho de robôs industriais possuem mais limitações do que capacidades de avaliar a grande gama de características dos robôs.

A Tabela 2.2 mostra uma comparação dos desempenhos dos diferentes sistemas de avaliação de robôs industriais [25].

Tabela 2.2 Comparação do desempenho dos sistemas de medição [25].

	Erro máximo	Medição	Máx Velocidade	Período de aquisição	Graus de liberdade
Sistemas de medição	mm		m/s	ms	
Posicionamento de sensor	0,03	Estática			3 a 6
Comparação com guia mecânica	0,3	Dinâmica			3 a 6
Comparação com guia laser	0,04	Dinâmica	10	0,01	2 a 3
Interferômetro multi laser tracking	0,01	Dinâmica	6	10 a 100	3 a 6
Trilateração ultra sônica	4	Dinâmica		100 a 1000	3 a 6
Trena 3D	0,3	Dinâmica	5	0,5	3
Um interferômetro com laser tracking	0,07	Dinâmica	6	0,01 a 500	3
Estação total de medição	3	Dinâmica	1	500 a 3000	3
Escala linear	1,1	Dinâmica			3
Triangulação ótica com tracking	0,15	Dinâmica	2 a 10	1	3
Teodolito	1	Estática			3 a 6
Câmeras	0,3	Dinâmica	10	0,2 a 4	3 a 6
Medição inercial	0,04	Dinâmica	5	3	3
Digitalização bi-dimensional	0,7	Dinâmica	0,5 a 3	10 a 100	2
Máquina de medir por coordenadas	0,01	Estática			3 a 6
Desenho de percurso	0,7	Dinâmica			2

Os valores colocados na Tabela 2.2 são apenas valores típicos de catálogo de fabricante, portanto podem ser encontrados no mercado sistemas com desempenho diferentes dos colocados aqui.

A maioria dos sistemas não quantifica erros em seis graus de liberdade, e vários deles necessitam de dispositivos extras para poder fazê-lo.

Um outro item a ser levado em consideração para a escolha de um sistema é o preço. Os preços podem variar bastante, sendo que os sistemas mais caros são os que utilizam *laser tracking*.

## Capítulo 3

# Braço de medição

Este capítulo apresenta os motivos para a escolha do braço de medição para desenvolver a metodologia de avaliação de desempenho de robôs industriais. Também dá uma visão geral sobre braços de medição (máquina de medir por coordenadas portátil) e apresenta características do braço de medição utilizado.

### 3.1 Sistema de medição para desenvolver metodologia

O sistema braço de medição, ainda pouco difundido no Brasil, reúne características desejáveis para a avaliação de desempenho de robôs, entre elas:

- Sistema totalmente portátil;
- Possui certificado de calibração do fabricante;
- Possui a possibilidade de ser utilizado *in-loco*, já que o fabricante garante as características metrológicas do sistema de (15 a 25) °C.
- Possui sistema de aquisição e processamento de dados;
- Incerteza de medição condizente com as características que se deseja medir;
- Possível abertura para novas aplicações do sistema;
- Grande volume de medição;
- Pode ser usado para quantificar diversos parâmetros de desempenho de robôs.

Por ser uma tecnologia inovadora, de níveis de incerteza compatíveis ( $U_{95\%}=0,1$  mm), e que usuários deste sistema o recomendaram fortemente para utilizá-lo na avaliação de desempenho do manipulador Roboturb, a hipótese de utilizar este sistema de medição para desenvolver uma metodologia para avaliação de robôs foi testada.

## **3.2 Braços de medição**

Atualmente, observa-se uma crescente utilização das máquinas de medir por coordenadas com eixos cartesianos (MMC) em medições geométricas no ambiente industrial. As principais vantagens das MMC frente aos outros sistemas são a sua configuração cinemática simples e a sua baixa incerteza de medição. Apesar destas vantagens, as MMC são relativamente lentas e pesadas, e ainda necessitam de um local para sua instalação fixa, além de necessitarem de uma mesa de medição própria onde o mensurando é posicionado [42].

Visando tornar as MMC mais rápidas e convenientes para atuação em ambientes industriais, desenvolveram-se os chamados “robôs de medição”. A principal diferença entre as MMC comuns e esses “robôs” é a inexistência de uma mesa de medição. Porém, as limitações quanto à necessidade de uma instalação fixa e dificuldade para transporte do sistema de medição para o local onde o mensurando se encontra ainda são mantidas. Introduce-se então o braço de medição [42].

### **3.2.1 Princípio de funcionamento do braço de medição**

Um braço de medição é um sistema manual, composto de eixos rotativos, podendo ser encontrado em duas configurações principais (antropóide e SCARA) e cujas incertezas de medição (da ordem de 0,1 mm) são maiores se comparadas às MMC convencionais [42][46] (da ordem de 0,005 mm).

Na primeira configuração têm-se juntas articuladas na extremidade de segmentos retos que possibilitam movimentos parecidos com o braço de um ser humano, como na Figura 3.1 e seu volume de trabalho como na Figura 3.2.

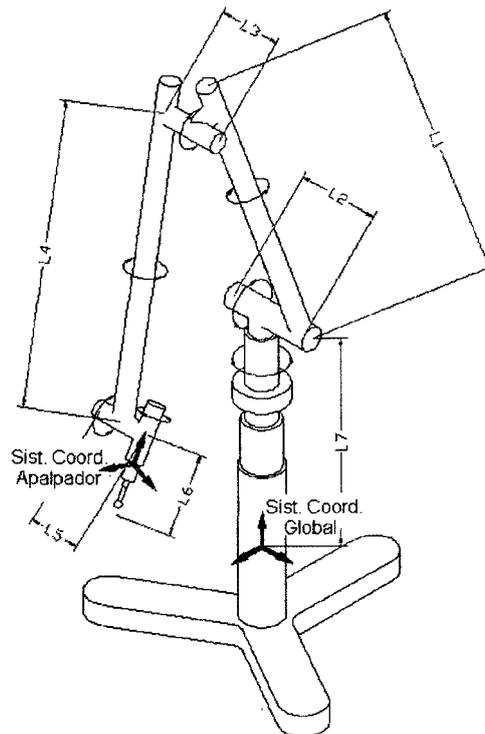


Figura 3.1 Configuração antropóide [42].

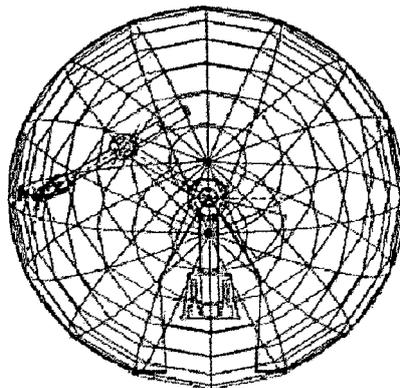


Figura 3.2 Volume de medição da configuração antropóide [42].

Na configuração SCARA (“Selective Compliance Assembly Robot Arm”), tem-se um sistema híbrido de movimentação (cilíndrico e horizontal) o que permite uma boa maneabilidade, incertezas de medição mais reduzidas (da ordem de 0,01 mm) e velocidade de operação mediana.

Contudo, a configuração SCARA não permite uma grande flexibilidade no plano vertical. A Figura 3.3 mostra uma ilustração contendo a princípio dessa configuração e seu volume de medição.

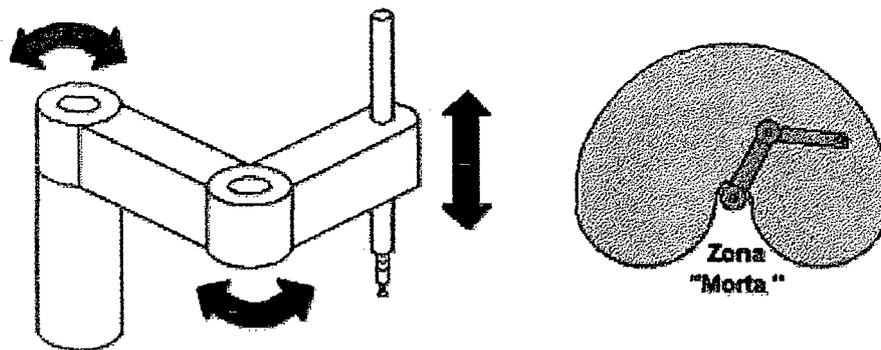


Figura 3.3 Braço de medição SCARA e seu volume de medição [42].

Na extremidade do braço de medição há um apalpador rígido. Portanto para se medir as coordenadas de um ponto, deve-se posicionar manualmente o apalpador sobre o mensurando e então fazer a leitura das coordenadas indicadas no mostrador do equipamento ou através da tela de um microcomputador. Neste caso, a comunicação do braço com o computador é feita através de softwares especialmente desenvolvidos para tal finalidade, permitindo não apenas a visualização dos dados, mas um pós-processamento adequado, como por exemplo, compensação do raio do apalpador em medições de cilindros.

A determinação das coordenadas dos pontos apalpados é feita através do cálculo da posição e orientação do sistema de coordenadas local do apalpador em relação a um sistema de coordenadas global do braço de medição.

Para tanto matrizes de transformação de coordenadas são aplicadas a partir das informações de rotação, e translação no caso da configuração SCARA, de cada junta e do comprimento de cada segmento do braço (Figura 3.1). O ângulo de cada junta é medido por um transdutor de deslocamento angular (*encoder*) de precisão. Na medição do deslocamento de translação, no caso da configuração SCARA, escalas eletro-ópticas podem ser utilizadas [42].

### 3.2.2 Calibração de braços de medição

As incertezas com que são determinadas as coordenadas de um ponto qualquer no espaço através do braço de medição resultam da ação combinada, principalmente, dos seguintes fatores [42]:

- Incerteza dos transdutores de deslocamento angular;
- Erro na determinação da referência (*off-set*);
- Erro na determinação do comprimento de cada segmento;
- Variação de temperatura;
- Folgas;
- Rigidez finita;
- Força de medição;
- Calibração do apalpador;
- Aproximações numéricas.

Apesar de alguns fabricantes utilizarem normas de máquinas de medir por coordenadas convencionais, uma metodologia específica deve ser adotada para calibração dos braços de medição. Entretanto, não se tem conhecimento, até o presente momento de nenhuma norma nacional ou internacional que regulamente a calibração deste tipo de sistema [46].

Existe um método que utiliza um dispositivo especial, formado por uma barra contendo um conjunto de esferas, furos e blocos padrões em posições pré-determinadas. Este dispositivo é montado sobre um braço telescópico que tem a capacidade de ajustar a barra em várias posições no espaço.

Para a calibração, tanto o dispositivo quanto o braço de medição são colocados sobre uma mesa de granito. Então, são feitas medições dos padrões na barra em diferentes posições e orientações dentro do volume de medição do braço. Através de um programa computacional os dados são analisados e a incerteza do braço estimada.

Outro método utilizado em calibrações de braços de medição é mostrado na Figura 3.4. Consiste de uma barra com uma esfera numa extremidade e um cone na outra. No cone o apalpador do braço de medição é ajustado, enquanto que a esfera da outra extremidade da barra é acoplada a um encaixe magnético na base do braço de medição.

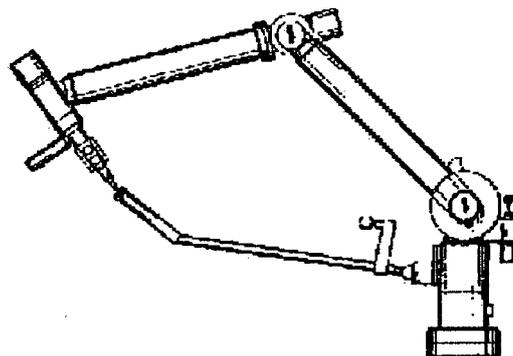


Figura 3.4 Calibração de braços de medição utilizando a medição de um comprimento constante [42].

Com este dispositivo, um comprimento fixo disposto em diferentes posições e orientações no volume de medição do braço é medido e o módulo do vetor formado entre o centro da esfera no encaixe magnético e o centro da esfera do apalpador é calculado, devendo o mesmo permanecer constante durante toda a calibração.

Em outro método, utiliza-se um dispositivo especial que se desloca sobre uma barra cerâmica, onde o braço de medição é acoplado. O deslocamento deste dispositivo é medido tanto por um laser interferométrico quanto pelo braço de medição, sendo estes dados comparados e utilizados para a calibração [46]. O esquema deste dispositivo pode ser visualizado na Figura 3.5.

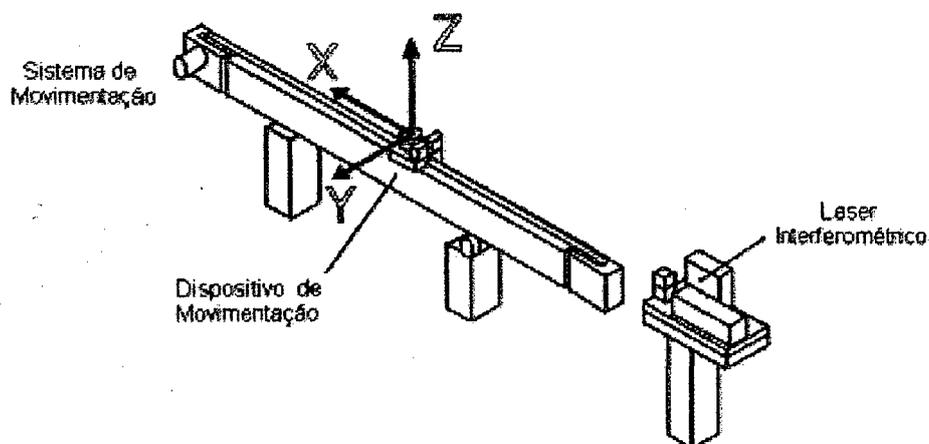


Figura 3.5 Calibração de braços de medição com auxílio da interferometria [42].

A barra cerâmica deve ser disposta em diferentes posições e orientações dentro do volume de medição do braço.

### 3.2.3 Braço de medição utilizado

No desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho foi utilizado um braço de medição disponível no Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina.

Este braço de medição é desmontável, e pode ser montado em quatro diferentes configurações. Entretanto, cada configuração tem um volume e incerteza de medição distintos. Apenas duas destas configurações estão calibradas.

A configuração utilizada para o trabalho é a 631, cujas especificações fornecidas pelo fabricante são mostradas a seguir:

- Fabricante: ROMER;
- Número de série: 963;
- Modelo: Armony;
- Volume de medição (diâmetro da esfera): 2700 mm;
- Incerteza de medição:  $\pm 0,1$  mm;
- Graus de liberdade: seis;
- Número de eixos: seis;
- Sensores: um apalpador base com esfera de aço de diâmetro 15 mm, um apalpador com esfera de rubi de diâmetro 6mm e um apalpador de ponta seca.
- Material: Segmentos de fibra de carbono e juntas de liga de alumínio;
- Software: G-PAD e GDS versão 2.0;
- Desmontável para facilitar o transporte.
- Possui contrapeso.

Uma foto do braço de medição utilizado pode ser visualizada na Figura 3.6.



Figura 3.6 Braço de medição disponível no Labmetro.

O braço de medição foi montado em um tripé especialmente fabricado para braços de medição, o que facilitou muito o posicionamento espacial e garantiu a restrição de movimentos durante os experimentos.

## Capítulo 4

# Metodologia de avaliação proposta

Este capítulo expõe a concepção da metodologia desenvolvida e explica como utilizá-la. Detalha também pontos importantes como o flange de medição e o algoritmo de cálculo utilizado.

### 4.1 Concepção da metodologia proposta

Esta seção detalha a teoria envolvida na metodologia proposta e procura explicar o funcionamento do algoritmo de cálculo.

#### 4.1.1 Localização de um corpo rígido no espaço Cartesiano

A localização de um corpo rígido pode ser completamente descrita pela sua posição e orientação [20], como ilustrado na Figura 4.1, em relação a um sistema de coordenadas fixo. Assim é possível afirmar que o corpo está localizado através de seis graus de liberdade ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ).

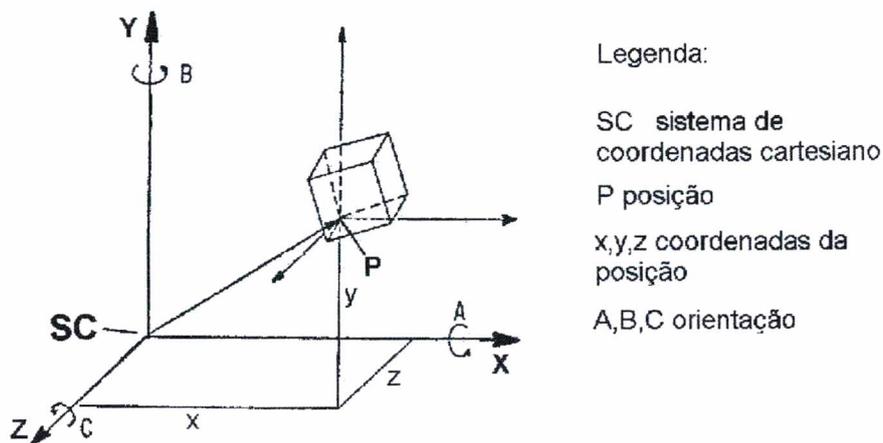


Figura 4.1 Localização de um corpo rígido através de seis graus de liberdade [1].

Desta maneira, é possível concluir que determinadas as coordenadas  $(x, y, z)$  de três pontos não colineares localizados em um corpo rígido em relação a um sistema de coordenadas fixo, somente uma única posição e orientação deste corpo é caracterizada em relação a este mesmo sistema de coordenadas.

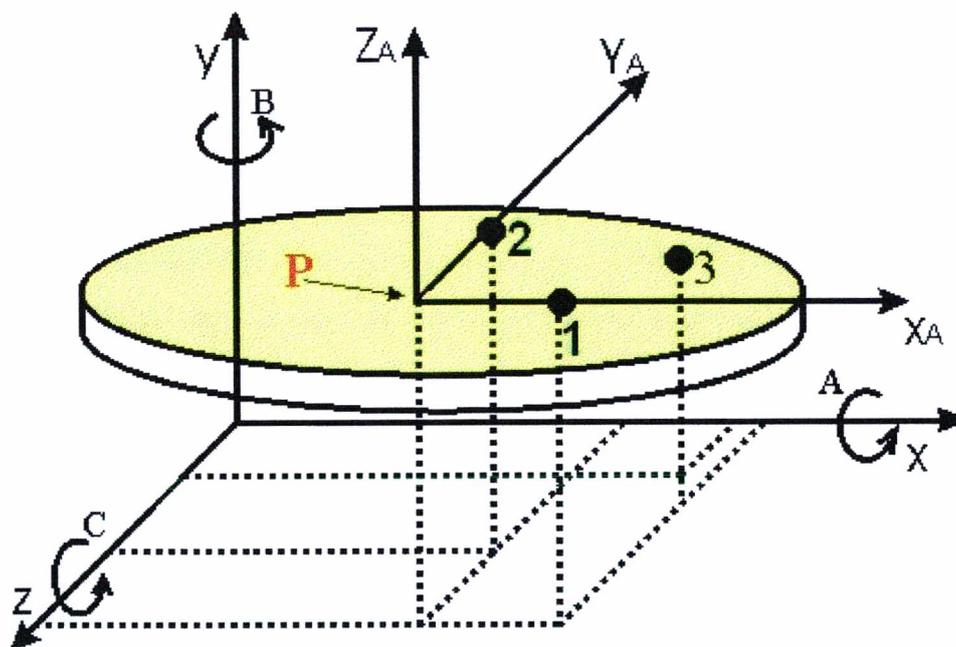


Figura 4.2 Determinação da posição e orientação com base em três pontos.

Determinada a localização dos pontos 1, 2 e 3 em relação ao sistema de coordenadas base  $(X, Y, Z)$  e em relação ao sistema de coordenadas do corpo rígido  $(XF, YF, ZF)$  é possível, a partir de um algoritmo de cálculo, determinar a posição  $(P)$  e a orientação  $(A, B, C)$  do sistema de coordenadas do corpo rígido em relação ao sistema de coordenadas base. A metodologia de avaliação de

desempenho proposta é baseada neste princípio, ilustrado na Figura 4.2.

#### 4.1.2 Localização do sistema de coordenadas através do braço de medição

No desenvolvimento da metodologia foi utilizado um flange montado na interface mecânica do robô. Com este dispositivo, especialmente fabricado para o desenvolvimento da metodologia, buscou-se localizar o sistema de coordenadas da interface mecânica do robô utilizando o braço de medição.

O dispositivo foi fabricado de tal forma que, quando devidamente montado no robô, seu sistema de coordenadas fique alinhado ao sistema de coordenadas da interface mecânica.

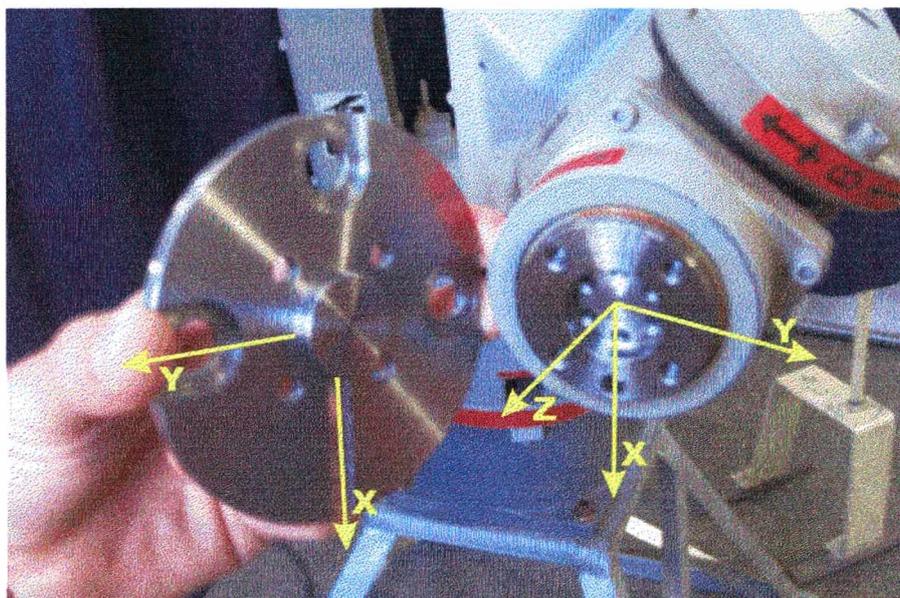


Figura 4.3 Interface mecânica do robô, flange e seus sistemas de coordenadas.

Para a determinação dos três pontos necessários para a localização do sistema de coordenadas do flange, através do braço de medição, são localizados três pontos não colineares no flange que garantem uma boa repetitividade de posicionamento do apalpador. A Figura 4.4 mostra o apalpador do braço de medição encaixado em um dos assentos de medição. Cada assento se constitui de três esferas ( $\varnothing = 4$  mm cada) coladas no flange à  $120^\circ$  onde o apalpador se apóia.

Os assentos foram construído de forma a garantir uma repetitividade de posicionamento de alta qualidade ( $Re_{95\%} 3D = 0,0005$  mm medido na máquina

de medir por coordenadas convencional).

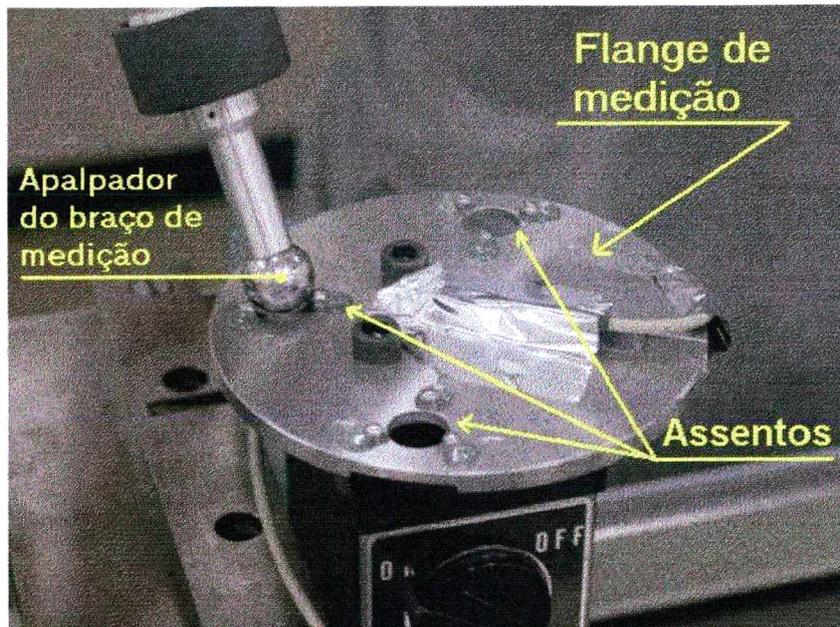


Figura 4.4 Apalpador posicionado no assento de medição.

Esta metodologia pode ser utilizada também para determinar a posição e a orientação de uma ferramenta acoplada ao robô. Para isto basta ser possível determinar a localização de três pontos não colineares, através do braço de medição, que garantam uma boa repetitividade de posicionamento na própria ferramenta, e saber a localização destes pontos em relação ao sistema de coordenadas da ferramenta.

Outra maneira de localizar o sistema de coordenadas da ferramenta em relação ao sistema de coordenadas base do robô é fazer as medições com o flange para localizar o sistema de coordenadas da interface, e depois fazer a transformação da postura da interface para a postura da ferramenta montada nesta. Para isto é necessário o modelo da ferramenta, que pode ser levantado numa máquina de medir por coordenadas convencional, por exemplo [41].

No caso do flange utilizado para as medições, as coordenadas do centro da esfera de aço do apalpador, em relação ao sistema de coordenadas do flange, quando encaixado no assento foram determinados numa máquina de medir por coordenadas convencional, como mostra a Figura 4.5.

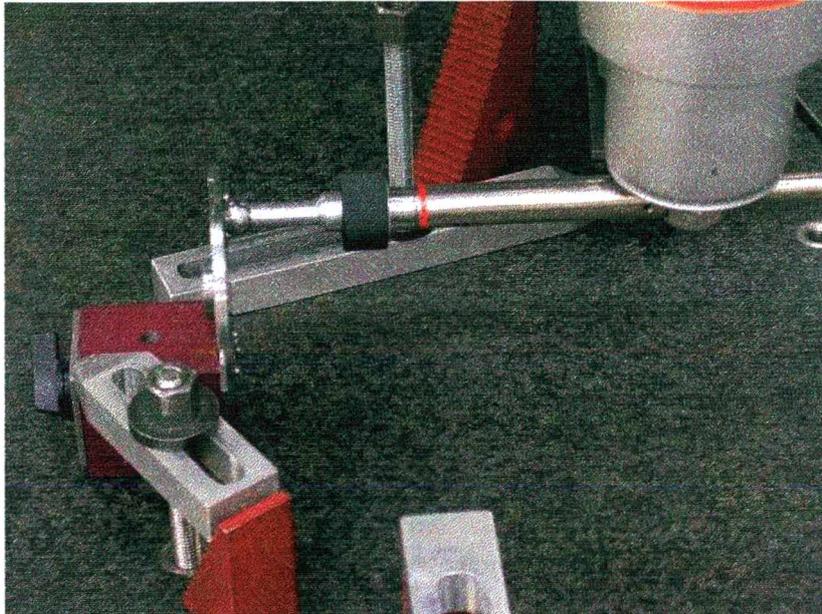


Figura 4.5 Localização do centro da esfera do apalpador no assento através da MMC.  
Os detalhes da realização deste ensaio serão mostrados no Capítulo 5.

#### 4.1.3 Flange de medição

O flange de medição é uma peça especialmente fabricada para as medições, utilizando a metodologia proposta. Consiste em um dispositivo fabricado em aço carbono, com esferas de rolamento coladas, para serem utilizadas como assentos (apoios isostáticos) dedicados ao encaixe do apalpador do braço de medição.

Esta seção é dedicada ao detalhamento da concepção do flange de medição.

##### **Concepção do flange de medição**

O flange de medição tem a função de, através de medições feitas com o braço de medição, determinar a postura da interface mecânica do robô.

O flange de medição foi projetado e fabricado de forma a:

- Minimizar os erros de alinhamento entre o sistema de coordenadas do flange e o sistema de coordenadas da interface mecânica do robô;
- Minimizar a repetitividade de posicionamento da esfera do apalpador quando encaixada no assento;

- Facilitar a sua montagem e a desmontagem no robô;
- Minimizar os efeitos térmicos na incerteza de medição;
- Facilitar a fabricação e minimizar custos.

A Figura 4.6 mostra o desenho técnico da interface do robô UP6 Motoman. Como se pode observar, existem dois furos ( $25H7$  e  $6H7$ ) que foram utilizados para o encaixe e alinhamento com o flange de medição, e que formam uma cadeia de dimensões<sup>1</sup> com a posição relativa entre os dois furos.

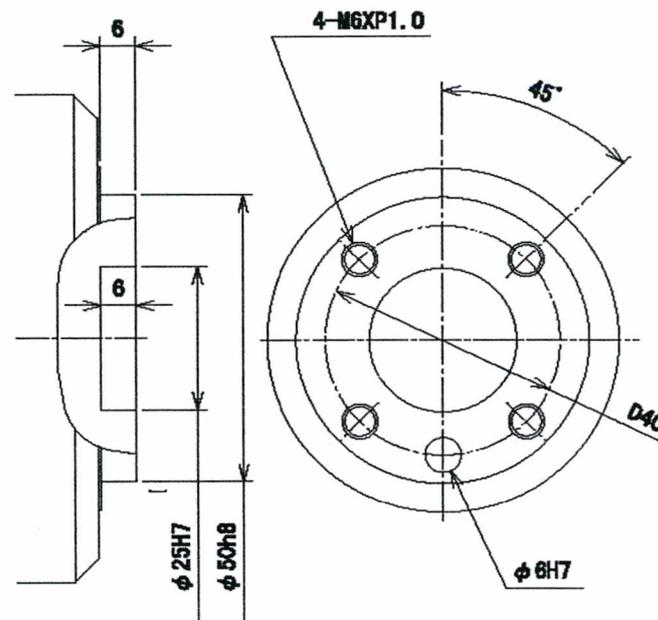


Figura 4.6 Desenho da interface mecânica do robô UP6 Motoman [47].

A cadeia de dimensões não foi totalmente especificada, pois apenas as tolerâncias de fabricação dos furos são indicadas, deixando de indicar a tolerância de posição entre os centros destes furos. Para contornar este problema o flange de medição foi construído de maneira a não se basear na posição entre os furos. Foi então feito um rasgo no flange de medição, de modo que para o alinhamento é utilizado um eixo retificado que atravessa o rasgo e se ajusta ao furo  $6H7$ . Este eixo retificado é chamado de haste de alinhamento.

A Figura 4.7 mostra o flange de medição e seus principais componentes.

<sup>1</sup> Cadeia de dimensões são uma série consecutiva de dimensões lineares, angulares ou de forma e posição, que forma um conjunto fechado, referida a uma peça ou grupo de peças [48]

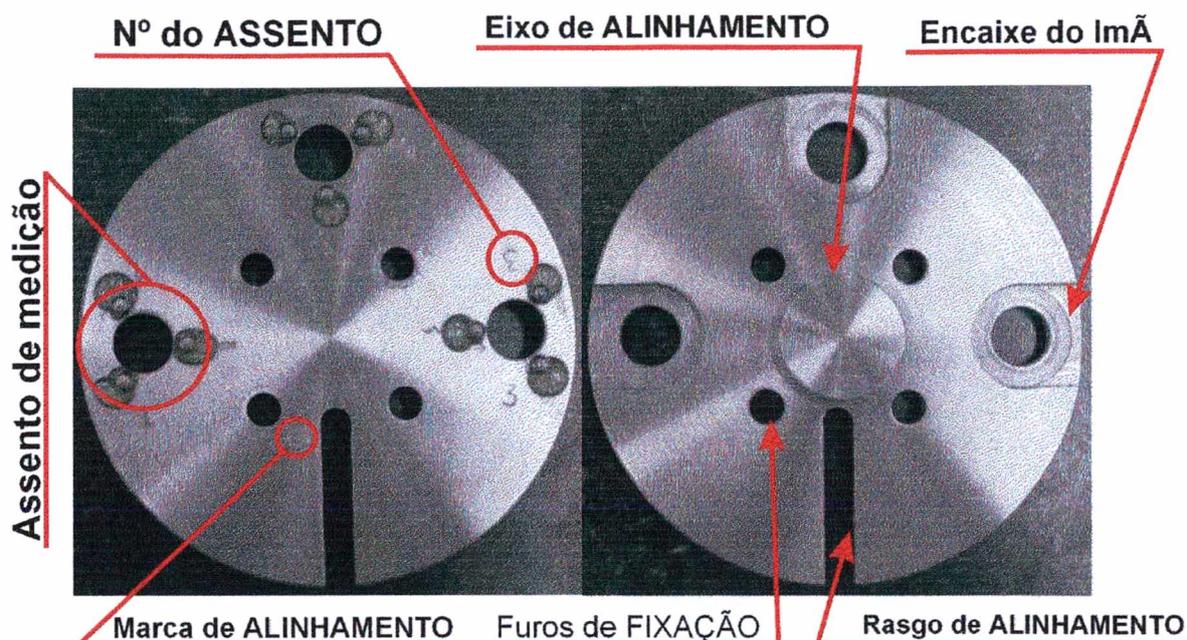


Figura 4.7 Flange de medição.

Como pode ser visualizado na Figura 4.7, existem três assentos de medição. Cada assento tem três esferas de rolamento de 4 mm de diâmetro coladas ao flange. Esta disposição das esferas resulta em apenas três pontos de contato com o apalpador no flange (apoio isostático), onde espera-se uma repetitividade de posicionamento de alta qualidade.

Cada assento é numerado para facilitar a realização das medições. Pode ser visualizado o eixo de alinhamento, que efetua um ajuste de precisão com o furo de 25H7 mm na interface do robô.

Pode ser visto também o rasgo de alinhamento, com uma marca para fazer o encosto da haste de alinhamento de diâmetro 6 mm. Ainda existem quatro furos de fixação e o encaixe do imã para a realização das medições dinâmicas.

#### **Tolerância de fabricação versus incerteza de medição**

O flange de medição foi fabricado de modo a ter o mínimo erro de alinhamento e folga na montagem. A Figura 4.8 mostra a tolerância de fabricação do eixo de alinhamento na interface do robô.

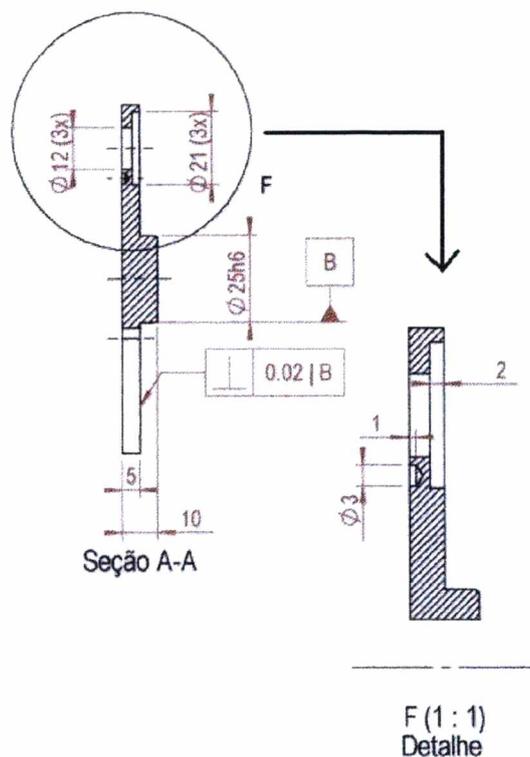


Figura 4.8 Seção e detalhe do flange de medição.

Um desenho completo do flange de medição pode ser visualizado no Apêndice C.

O diâmetro do eixo 25h6 (24,987 mm a 25,000 mm) no flange de medição foi escolhido para fazer o ajuste com o furo 25H7 (25,000 mm a 25,021 mm) localizado na interface mecânica do robô UP6. Este ajuste de precisão caracteriza um ajuste deslizante em peças lubrificadas, com deslizamento à mão. Este ajuste foi escolhido para poder fazer a montagem manualmente, e é utilizado também para mancais de furadeiras, eixos de contra ponto, colunas-guia de furadeiras radiais entre outros [48].

Com estas tolerâncias de projeto espera-se uma folga de no máximo 0,017 mm, considerando o pior caso. Como o flange de medição é medido depois de sua fabricação, os dados utilizados para o cálculo da incerteza de alinhamento devido à montagem do flange serão baseados em medições na máquina de medir por coordenadas convencional, mostrados no Capítulo 5.

Por este motivo não foram especificadas tolerâncias de fabricação para outras partes do flange, como posição dos assentos, posição entre furos para

colagem das esferas, etc. Ao invés disso optou-se por fazer medições na máquina de medir por coordenadas convencional, o que diminui a incerteza do levantamento destes parâmetros geométricos, como também diminui muito os custos de fabricação do flange.

Uma opção para a minimização desta fonte de incerteza (folga no ajuste) na determinação da postura do flange é especificar a tolerância do diâmetro do eixo de alinhamento para que seja realizado um ajuste com interferência. Esta opção não foi utilizada, pois foram necessárias várias montagens e desmontagens do flange durante a realização dos ensaios, devido à utilização do robô para outros trabalhos no laboratório.

#### 4.1.4 Modelo matemático para localização do sistema de coordenadas

Um algoritmo para a determinação da posição e orientação do sistema de coordenadas do flange de medição (SCF) em relação ao sistema de coordenadas do robô (SCR) é utilizado na metodologia. O modelo matemático deste algoritmo é aqui apresentado.

O modelo matemático tem como dados de entrada as coordenadas do centro da esfera do apalpador quando encaixado nos assentos do flange em relação ao SCR (medidas com o braço de medição para cada postura) e como constantes as coordenadas do centro da esfera do apalpador encaixado nos mesmos assentos em relação ao SCF (medidas com a MMC). Como resultado é determinada a postura do SCF em relação ao SCR.

O modelo matemático baseia-se em duas operações, uma de translação e outra de rotação [42][43].

- a) Rotação em torno do eixo Z de um ângulo  $\theta_z$  [42]:

$$R_{\theta_z} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\text{sen}(\theta_z) & 0 \\ \text{sen}(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

- b) Rotação em torno do eixo Y de um ângulo  $\theta_y$  [42]:

$$R_{\theta_y} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \text{sen}(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

c) Rotação em torno do eixo X de um ângulo  $\theta_x$  [42]:

$$R_{\theta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\text{sen}(\theta_x) \\ 0 & \text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A matriz R representa o resultado das três rotações em relação ao sistema de coordenadas fixo (*roll-pitch-yall*) [42] [44] [45]:

$$R = R_{\theta_z} R_{\theta_y} R_{\theta_x} \quad (4.4)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z)\cos(\theta_y) & \cos(\theta_z)\text{sen}(\theta_y)\text{sen}(\theta_x) - \text{sen}(\theta_z)\cos(\theta_x) & \cos(\theta_z)\text{sen}(\theta_y)\cos(\theta_x) + \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\theta_x) \\ \cos(\theta_y)\text{sen}(\theta_z) & \cos(\theta_x)\cos(\theta_z) + \text{sen}(\theta_x)\text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\theta_y) & -\cos(\theta_x)\text{sen}(\theta_z) + \text{sen}(\theta_x)\text{sen}(\theta_y)\cos(\theta_z) \\ -\text{sen}(\theta_y) & \text{sen}(\theta_x)\cos(\theta_y) & \cos(\theta_y)\cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Nota-se que as rotações são efetuadas obedecendo-se a “regra da mão direita” [42], conforme visualizado na Figura 2.6.

Logo, a matriz de transformação homogênea que determina a postura do sistema de coordenadas do flange de medição em relação ao sistema de coordenadas base do robô é descrita por [44] [45]:

$$M_{F,B} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & | & t_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & | & t_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & | & t_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

onde R representa a matriz de rotação e t a translação do SCF em relação ao SCB .

Para a solução do problema foi considerado as coordenadas do centro da esfera encaixada no assento em relação ao sistema de coordenadas do flange tal que:

$$AF_{(n)} = \begin{bmatrix} x_{(n)}^F \\ y_{(n)}^F \\ z_{(n)}^F \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde n é o número do assento (1,2,3);

e as coordenadas do centro da esfera encaixada no assento em relação ao sistema de coordenadas do braço de medição como:

$$AB_{(n)} = \begin{bmatrix} x_{(n)}^B \\ y_{(n)}^B \\ z_{(n)}^B \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

onde  $n$  é o número do assento (1,2,3);

Para a definição de um sistema de coordenadas intermediário (SCP) nos cálculos, são definidos os vetores:

$$\vec{V}_1 = (AF_3 - AF_1) \tag{4.9}$$

$$\vec{V}_2 = (AF_2 - AF_1) \tag{4.10}$$

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_1 \times \vec{V}_2 \tag{4.11}$$

$$\vec{V}_4 = \vec{V}_3 \times \vec{V}_1 \tag{4.12}$$

como pode ser visualizado na Figura 4.9

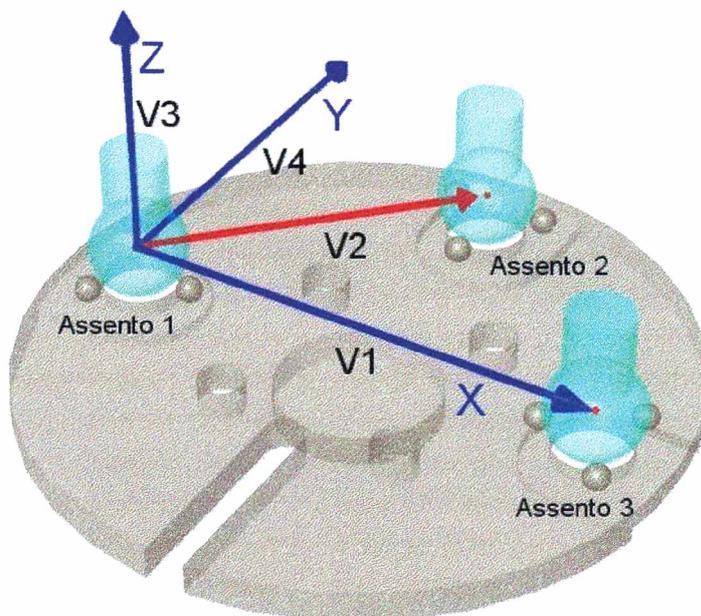


Figura 4.9 Vetores definidos em função da posição do centro do apalpador.

Posteriormente extrai-se os vetores unitários utilizados para montar a matriz de transformação homogênea:

$$a = \frac{\vec{V}_1}{\|\vec{V}_1\|} \tag{4.13}$$

$$b = \frac{\vec{V}_4}{\|\vec{V}_4\|} \tag{4.14}$$

$$c = \frac{\vec{V}_3}{\|\vec{V}_3\|} \tag{4.15}$$

assim o SCP é definido com o eixo X no sentido de a, o eixo Y no sentido de b e o eixo Z no sentido de c.

Com estes dados a matriz de transformação que determina a posição e a orientação do SCP em relação ao SCF é [44] [45]:

$$M_{P,F} = \left[ \begin{array}{ccc|c} a_1 & b_1 & c_1 & x_1^F \\ a_2 & b_2 & c_2 & y_1^F \\ a_3 & b_3 & c_3 & z_1^F \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4.16)$$

O sistema de coordenadas intermediário também é definido, com o mesmo procedimento utilizado para determinar  $M_{P,F}$ , utilizando os dados de medições realizadas através do braço de medição ( $AB_{(n)}$ ):

$$M_{P,B} = \left[ \begin{array}{ccc|c} a_1 & b_1 & c_1 & x_1^B \\ a_2 & b_2 & c_2 & y_1^B \\ a_3 & b_3 & c_3 & z_1^B \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4.17)$$

Já que o SCP é conhecido em relação ao SCF e em relação ao SCB é possível estabelecer a relação [44] [45]:

$$M_{F,B} = M_{F,P} \cdot M_{B,P}^{-1} \quad (4.18)$$

e sabendo-se que

$$M_{P,B} = M_{B,P}^{-1} \quad (4.19)$$

é calculada a matriz de transformação que determina a rotação e a translação do SCF em relação ao SCB [44] [45]:

$$M_{F,B} = \left[ \begin{array}{ccc|c} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4.20)$$

Para se extrair os dados de rotação da matriz são utilizadas as fórmulas [44] [45]:

$$B = \text{sen}^{-1}(-R_{31}) \quad (4.21)$$

$$A = A \tan 2(R_{32} / \cos(B), R_{33} / \cos(B)) \quad (4.22)$$

$$C = A \tan 2(R_{21} / \cos(B), R_{11} / \cos(B)) \quad (4.23)$$

e as informações de translação são extraídas da última coluna da matriz de transformação [44] [45].

O algoritmo para determinação dos resultados tem como variável de entrada um arquivo texto (\*.txt) que contém uma matriz de  $n$  linhas por nove colunas. As nove colunas são as coordenadas X, Y e Z do apalpador quando encaixado nos assentos de medição (assentos 1, 2 e 3, necessariamente nesta ordem) medidas com o braço. Cada medida dos três assentos gera uma das  $n$  linhas. A saída é um arquivo texto contendo as informações A, B, C, X, Y e Z por  $n$  linhas.

## 4.2 Utilizando a metodologia

Esta seção detalha como realizar os ensaios baseando-se na metodologia proposta, utilizando o flange de medição e o robô UP6 Motoman.

Baseado neste guia é possível utilizar a metodologia em outros casos.

### 4.2.1 Preparando os ensaios

Antes de realizar os ensaios, são necessários alguns preparativos que devem ser observados com rigor para a garantia da confiabilidade metrológica dos resultados.

O braço de medição deve ser devidamente montado e inicializado, conforme instruções do fabricante.

#### **Localização.**

A localização do braço de medição em relação ao robô deve ser de tal forma que a parte da frente do braço de medição fique voltada para o robô e que o volume de medição do braço intercepte a maior parte possível do volume de trabalho do robô, sem que afete a realização das medições nos pontos e trajetórias previstos em norma. A parte da frente do braço de medição é caracterizada pelo ponto onde é zerado o encoder da primeira junta rotativa do braço na inicialização.

Ainda, para a realização das medições dinâmicas, o percurso retilíneo deve ser posicionado em relação ao braço de medição de modo que o centro do percurso fique em frente ao braço na altura de repouso do mesmo, como pode ser visto na Figura 4.10.

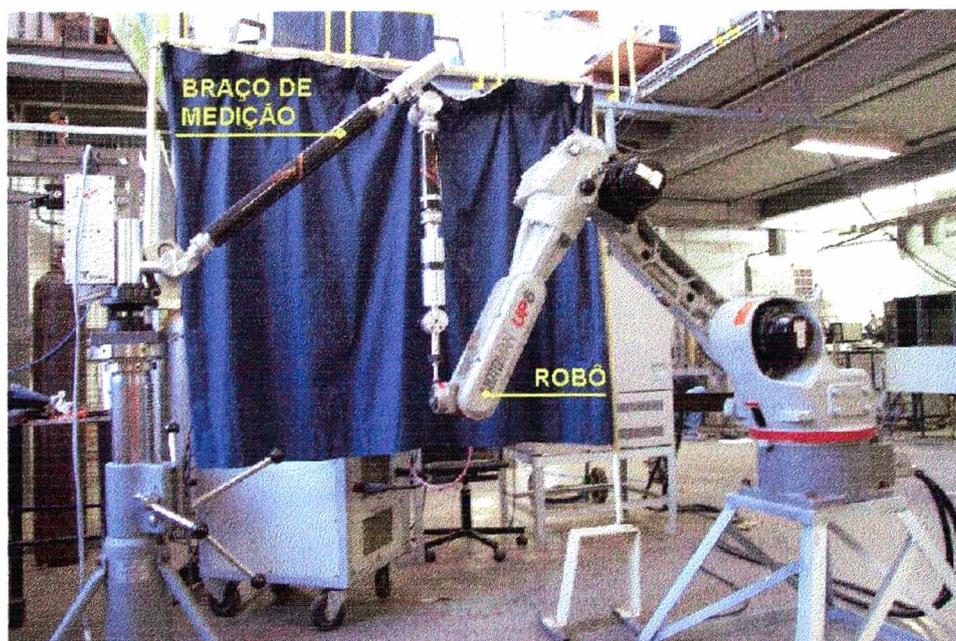


Figura 4.10 Posição de repouso do braço de medição.

#### **Alinhamento.**

O alinhamento do sistema de coordenadas do braço de medição ao sistema de coordenadas do robô é essencial para a realização das medições. O alinhamento consiste em localizar o centro do furo de 25 mm da interface do robô em três posturas diferentes. Estes três pontos serão utilizados para se definir um novo sistema de coordenadas para o braço de medição e para o robô. Como os sistemas de coordenadas são baseados nos mesmos pontos, estes estarão alinhados.

Para localizar o centro do furo é necessário a medição do plano que circunda o furo, e depois captar pontos internos ao diâmetro e projetar no plano a circunferência, conforme Figura 4.11. São utilizados vinte pontos na medição do plano e vinte pontos na medição do círculo. O centro de cada uma das três circunferências é utilizado para o alinhamento.



Figura 4.11 Medição do círculo projetado no plano para alinhamento.

O robô UP6 utiliza os três pontos (centro da interface mecânica) para definir o novo sistema de coordenadas. O braço de medição utiliza um plano, uma reta e um ponto para fazer o alinhamento, que são calculados no próprio software do braço de medição a partir dos três pontos medidos (centro da circunferência medida para cada uma das três posturas da interface mecânica).

#### **Fixação do flange.**

O próximo passo é a fixação do flange de medição, que deve ser feita com cuidado e seguindo algumas recomendações.

Antes de iniciar a fixação é necessário fazer a limpeza, com um pano limpo e solvente, do flange de medição e da interface mecânica do robô. Após a limpeza, é passado um filme de óleo lubrificante nas partes do flange que entram em contato com o robô.

O encaixe do flange deve ser feito manualmente sem fazer muito esforço. Quando o flange estiver encaixado ele se movimenta livremente apenas no sentido de rotação sobre o eixo e o furo ajustado. O movimento de rotação é feito até encontrar o rasgo do flange com o furo da interface do robô. A haste de alinhamento é inserida de modo a atravessar o flange e encostar-se no fundo do furo. A rotação do flange é forçada de modo que o lado do rasgo que tem a marca de alinhamento fique em contato com a haste. Os parafusos são então apertados em cruz. A Figura 4.12 mostra este procedimento sendo executado.



Figura 4.12 Montagem do flange de medição.

Após o aperto dos parafusos, a haste de alinhamento é retirada e o flange está pronto para ser utilizado nas medições.

Este procedimento de montagem contribui para uma boa repetitividade de alinhamento entre o sistema de coordenadas do flange e o sistema de coordenadas da interface do robô.

#### 4.2.2 Fazendo medições

Quando o robô e o braço de medição estiverem prontos para realizarem as medições, basta comandar o braço de medição para captar um ponto ou um conjunto de pontos, quando este estiver encaixado em um assento.

Os assentos são numerados de um a três para facilitar as medições porque o algoritmo de cálculo utiliza os dados das posições dos assentos nesta ordem, para o cálculo dos resultados.

O braço de medição funciona como um *mouse*, podendo assim o software ser comandado a distância. Todas as medições são guardadas pelo software em ícones de fácil identificação e re-nomeáveis. Estas características facilitam bastante o processo de medição.

A Figura 4.13 mostra a posição de um assento sendo medido manualmente (medição estática).



Figura 4.13 Medição manual.

No caso das medições estáticas, ou seja, nos casos em que o robô permanece parado durante as medições, a captação do ponto é feita através de um botão no próprio punho do braço de medição. Pode-se captar um único ponto ou um conjunto de pontos para cada assento, bastando para isso escolher o modo de medição no software do braço.

Deve-se ter o cuidado de não efetuar uma força de medição maior do que o necessário para não influenciar os resultados significativamente. Um ensaio determinando a força de medição para ensaios estáticos será descrito no Capítulo 5.

As medições dinâmicas são realizadas de modo que o robô inicie e termine a seqüência de medição. O software do braço de medição faz a medição automaticamente de até duzentos pontos com o período de aquisição programável.

Pode ser visto na Figura 4.14 o cabo de comunicação entre o robô e o braço de medição. Esta comunicação se baseia em um relê, que é localizado no controlador do robô e pode ser acionado por programação. O relê foi colocado em paralelo com o botão de acionamento das medições localizado no próprio braço de medição.

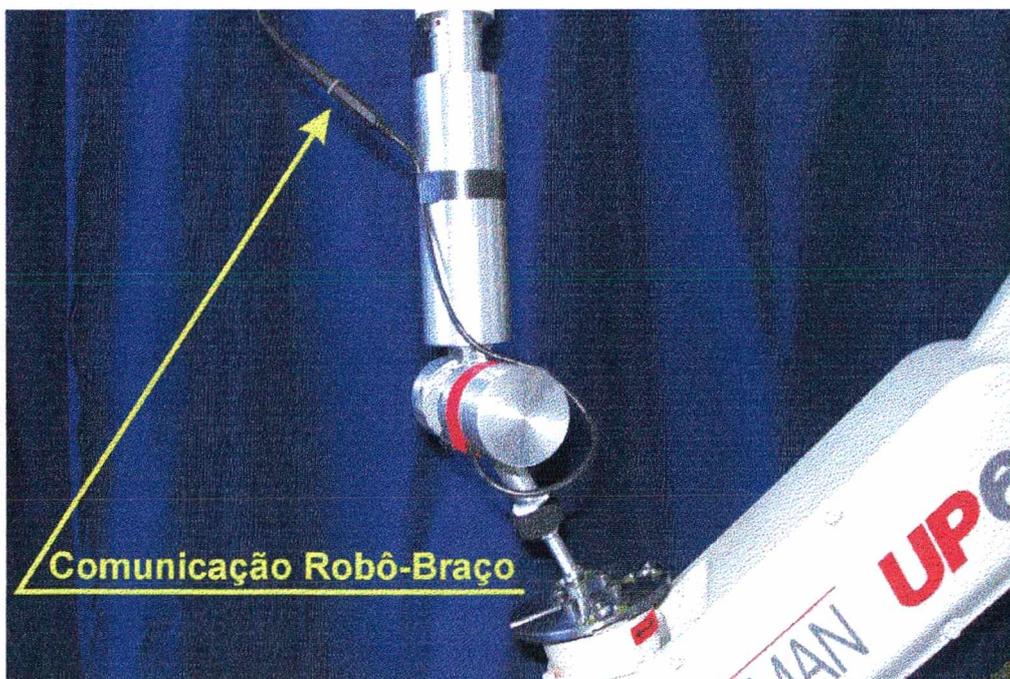


Figura 4.14 Comunicação robô-braço para medição de velocidade.

A seqüência de medição, que é comandada pelo programa do robô, é a seguinte:

- O robô aciona a chave do braço de medição com um pulso de 10 ms para iniciar as medições;
- O robô espera 5000 ms para começar a movimentação no percurso e velocidade programada;
- O robô realiza o percurso;
- Após o término do percurso o robô espera 5000 ms para enviar outro pulso de 10 ms para o encerramento das medições pelo braço de medição;
- Os dados da medição são armazenados manualmente.

O período de aquisição recomendado para os ensaios é de 1500 ms, conforme experimentos realizados e descritos no Capítulo 5.

As medições de velocidade e percurso podem ser realizadas no percurso programado, de modo que os esforços gerados pelo braço de medição sejam minimizados. Esta disposição é mostrada na Figura 4.15, e consiste de uma reta de 1000 mm.

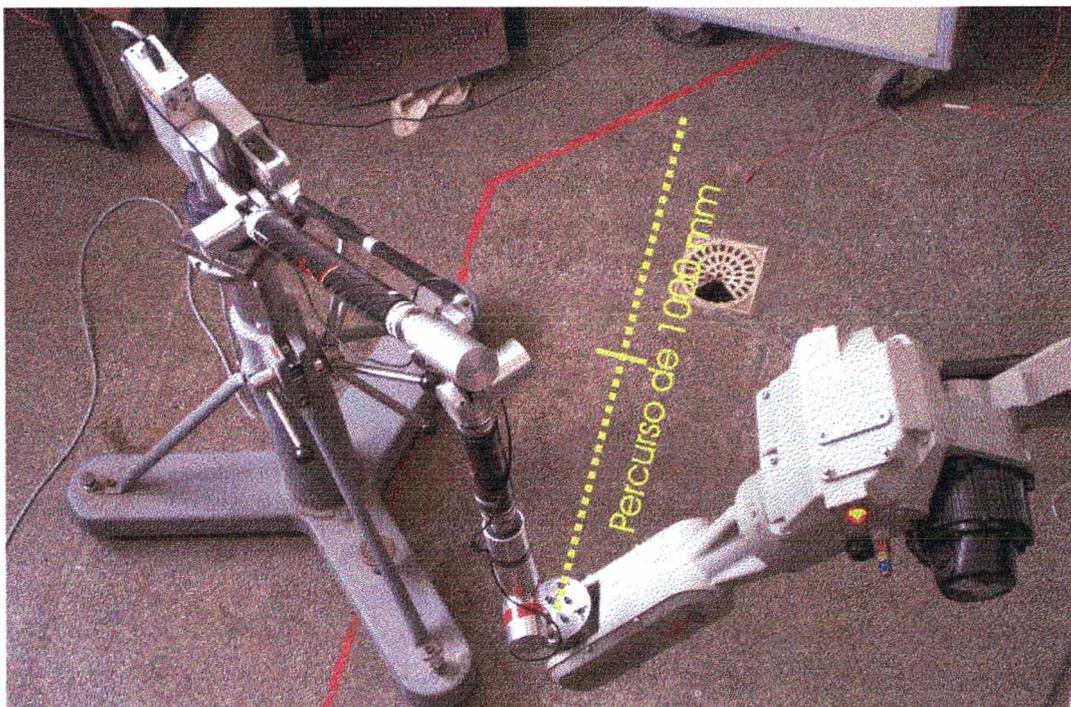


Figura 4.15 Percurso para as medições de velocidade.

Para o apalpador manter contato constante com o assento, é montado um ímã, que fica fixo atrás do flange, no rasgo que foi especialmente feito para seu fácil encaixe e desencaixe. O campo magnético do ímã atravessa o furo no centro do assento e atrai a esfera de aço do apalpador de diâmetro 15 mm. A montagem do ímã e o furo para a passagem do campo magnético através do flange podem ser visualizados na Figura 4.16.

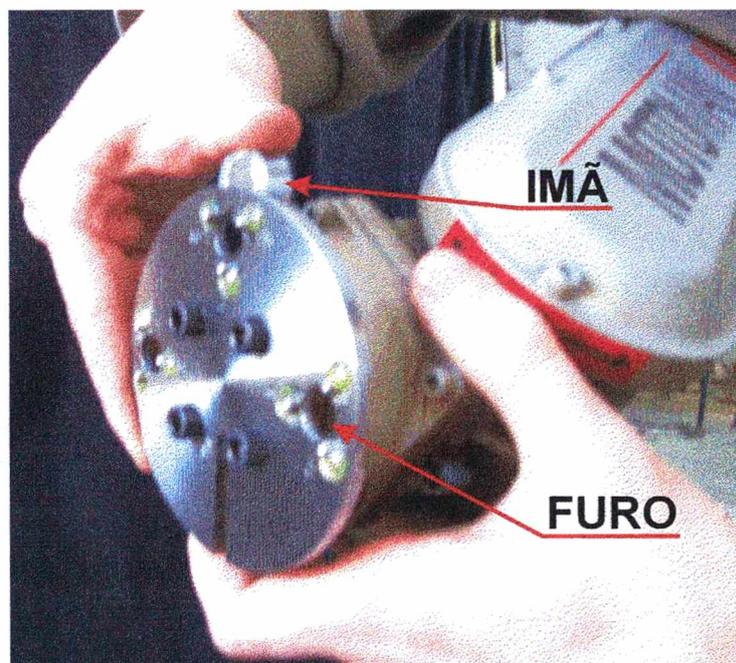


Figura 4.16 Montagem do ímã no flange de medição e furo para a passagem do campo magnético através do flange.

Uma grande vantagem deste tipo de conexão, através de atração magnética, é que este permite uma grande mobilidade do apalpador sem, no entanto, comprometer seu posicionamento no assento. Além disso, se o robô fizer um movimento brusco ou que force o braço de medição este se solta, evitando assim causar danos ao equipamento de medição ou ao robô.

#### 4.2.3 Analisando os dados

Os dados captados pelo software do braço de medição (G-PAD) são exportados para arquivos do Excel. O software do braço de medição exporta os dados para arquivos pré-formatados, dividindo os dados pelos ícones, descrevendo nome e todos os dados medidos.

Após este passo, os dados são preparados para serem processados pelo

algoritmo de cálculo elaborado no Software MatLab. Os dados devem estar em colunas, como explicado na Seção 4.1.3, em um arquivo formato texto (\*.txt) gerado a partir de um arquivo do Excel.

Esses dados podem ter até  $n$  linhas, o que será um dado de entrada quando o algoritmo for comandado para realizar os cálculos. O resultado será um arquivo texto contendo a posição e a orientação (colunas x, y, z, A, B, C por  $n$  linhas) do sistema de coordenadas do flange. Estes dados são importados para o excel para posterior análise.

Com os dados no excel e utilizando as fórmulas descritas Seção 2.4.4, os resultados de avaliação de desempenho são calculados.

Como pôde ser observado, esta metodologia é simples e rápida para a realização da avaliação de desempenho de robôs. O tempo de preparo para a realização dos ensaios não passa de dez minutos, o que supera em muito o tempo de preparação da grande maioria dos equipamentos utilizados atualmente para a realização da avaliação de desempenho de robôs industriais.

## **Capítulo 5**

### **Ensaaios e resultados**

Neste capítulo são levantadas as principais fontes de incerteza que afetam os resultados, são descritos os ensaios e a simulação que foram realizados para validar a metodologia proposta e são apresentados os resultados de cada ensaio e da simulação.

Os resultados dos ensaios e da simulação são analisados para a determinação da capacidade do sistema de medição em avaliar o desempenho do robô. Um estudo de caso realizado com um robô industrial é apresentado

#### **5.1 Fontes de incerteza**

Para a avaliação de desempenho baseado na metodologia proposta, diversas são as fontes de incerteza que afetam os resultados. As principais fontes de incerteza podem ser visualizadas na Figura 5.1 em um diagrama tipo “Espinha de Peixe”.

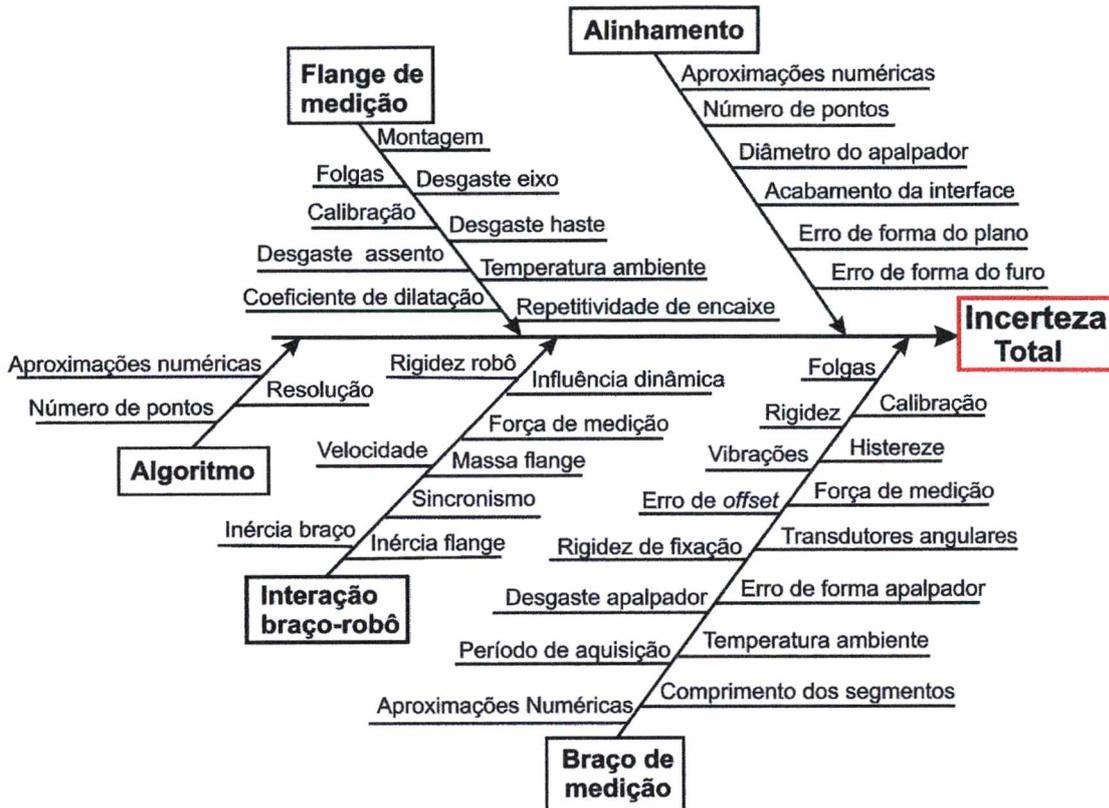


Figura 5.1 Diagrama tipo “Espinha de Peixe” contendo as principais fontes de incerteza do sistema de avaliação de desempenho.

Várias das fontes de incerteza contidas no diagrama “espinha de peixe” foram levantadas de forma que seus efeitos estão superpostos e outras não foram levantadas. As principais fontes de incerteza de cada ensaio foram utilizadas no balanço de incertezas para o cálculo da incerteza expandida na determinação das características de postura.

## 5.2 Ensaios de avaliação

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais que guiaram a realização dos ensaios de avaliação e os objetivos específicos de cada ensaio. O procedimento simplificado e os resultados de cada ensaio também são descritos.

### 5.2.1 Objetivos gerais dos ensaios

Os principais objetivos para a realização dos ensaios descritos neste capítulo são:

- Verificar a hipótese de o braço de medição avaliar o desempenho do Roboturb utilizando a metodologia proposta com incerteza de medição não superior a 0,1 mm;
- Verificar o sistema de medição, especificamente, para a avaliação de desempenho utilizando a metodologia proposta;
- Determinar o potencial do sistema de medição em avaliar desempenho de robôs industriais.

### **5.2.2 Verificação do braço de medição**

No software que acompanha o braço de medição, G-Pad e GDS versão 2.0, existe um comando para a verificação do braço de medição. Para realizar a verificação, deve-se seguir os passos descritos na tela do computador, e fazer medições de um ponto com diferentes posições do braço de medição.

Esta verificação tem o propósito de averiguar a correta montagem do equipamento, se não existe nenhum dano no mesmo devido a algum impacto, erro de leitura dos transdutores de deslocamento angular ou algum problema na inicialização do equipamento.

Este ensaio foi realizado sempre que o braço de medição foi montado e ao final de cada experimento.

Nenhum problema foi encontrado no equipamento durante a realização de todos os experimentos.

### **5.2.3 Determinação do diâmetro da haste de alinhamento**

#### **Objetivo.**

A haste de alinhamento é constituída de um eixo de aço retificado que é utilizado para fazer a montagem do flange de medição na interface mecânica do robô, portanto tem influência direta no alinhamento dos sistemas de coordenadas do flange de medição e da interface do robô.

#### **Descrição do ensaio.**

O diâmetro da haste foi medido através da Máquina de Medir Longitudinal, ou Máquina de Abbe. Esta máquina possui incerteza de medição baixa ( $\pm 0,3 \mu\text{m}$  [49]) e dispositivos especiais para a medição de eixos. Este sistema de medição está calibrado e atende aos padrões da Rede Brasileira de

Calibração, garantindo assim a rastreabilidade dos resultados.

Uma foto da Máquina de Medir Longitudinal pode ser visualizada na Figura 5.2.



Figura 5.2 Máquina de Medir Longitudinal ou Máquina de Abbe.

Foram utilizados sensores tipo faca para determinar o diâmetro em duas posições, rotacionadas de 90° para cada uma das três seções definidas na área de contato com o furo de diâmetro 6H7 na interface do robô e com o rasgo de fresa no flange de medição.

Foram tomados cuidados como na estabilização da temperatura da haste de alinhamento de aço a 20 °C após de efetuar a sua limpeza.

### **Resultados.**

A haste de alinhamento apresentou como resultado de medição o valor de  $\varnothing_{\text{haste}} = (6,0001 \pm 0,0005)$  mm com um fator de abrangência  $K_{95\%} = 2,11$ . Com a análise do resultado, conclui-se que a haste tem o diâmetro ideal para o ajuste de precisão com o furo 6H7 (6,000 mm a 6,012 mm). Como o diâmetro da haste está no limite superior da tolerância, este causa a menor incerteza de alinhamento (somente devido a este ajuste) dentro da tolerância especificada 6h6 (5,992 mm a 6,000 mm) na fabricação da haste. Ainda, a incerteza de alinhamento é muito menor se calculada com base na incerteza de medição ( $\pm 0,0005$  mm) do que se fosse utilizada a tolerância de fabricação do eixo ( $\pm 0,0040$  mm) para este cálculo.

### 5.2.4 Levantamento geométrico do flange de medição

#### Objetivo.

O objetivo principal deste ensaio é determinar as coordenadas do Flange de medição que têm influência direta na determinação do sistema de coordenadas da interface mecânica do robô. Estes valores são as coordenadas do centro da esfera do apalpador do braço de medição (esfera de aço  $\varnothing 15$  mm), quando encaixado no assento, em relação ao sistema de coordenadas do flange. Uma figura ilustrando o sistema de coordenadas do flange, o apalpador encaixado no assento e as coordenadas do centro do apalpador em relação ao SCF pode ser visualizada na Figura 5.3.

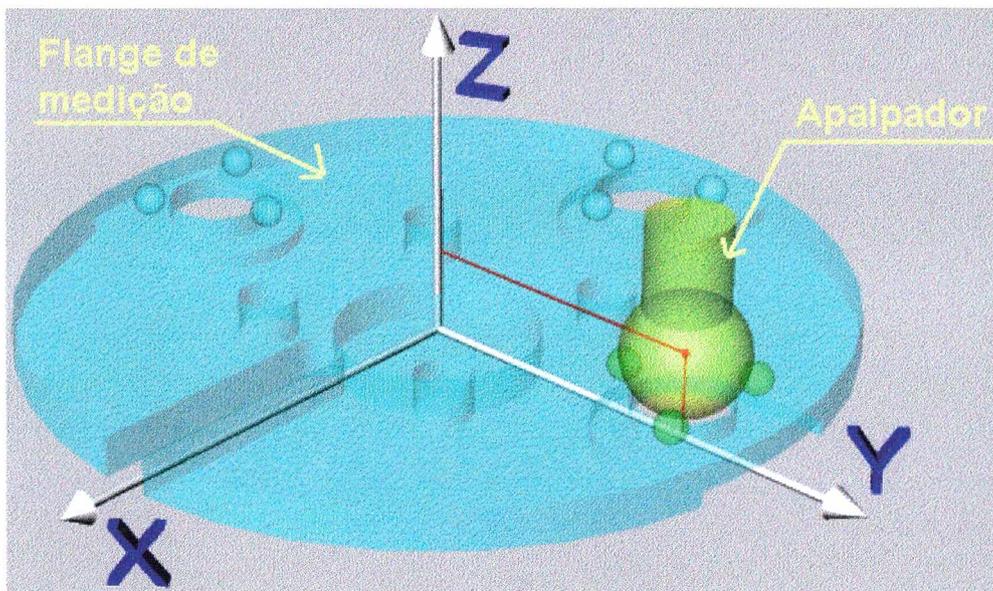


Figura 5.3 Centro do apalpador em relação ao SCF

Outros objetivos são: a determinação da repetitividade de posicionamento do apalpador do braço de medição nos assentos e determinar o diâmetro do eixo de alinhamento (Diâmetro de projeto 25h6 mm).

#### Descrição do ensaio.

Os ensaios foram realizados na máquina de medir por coordenadas convencional (MMC), disponível no Labmetro/Fundação CERTI, que possui baixa incerteza de medição ( $U_{95\%}3D = \pm 1,1 \mu\text{m}$  para as medições realizadas [50]) e apresenta grande flexibilidade para a realização das medições do flange de medição. A MMC possui um Certificado de Calibração válido na época dos

ensaios, garantindo assim a rastreabilidade dos resultados.

Para a realização dos ensaios foi confeccionada uma peça para a adaptação do apalpador com esfera de aço de  $\varnothing$  15 mm, do braço de medição, na MMC.

O primeiro passo para a realização dos ensaios foi a calibração do apalpador de  $\varnothing$  15 mm, como pode ser visualizado na Figura 5.4. Este procedimento, que é realizado automaticamente pela MMC, toca o apalpador em trinta posições na esfera padrão de vidro.

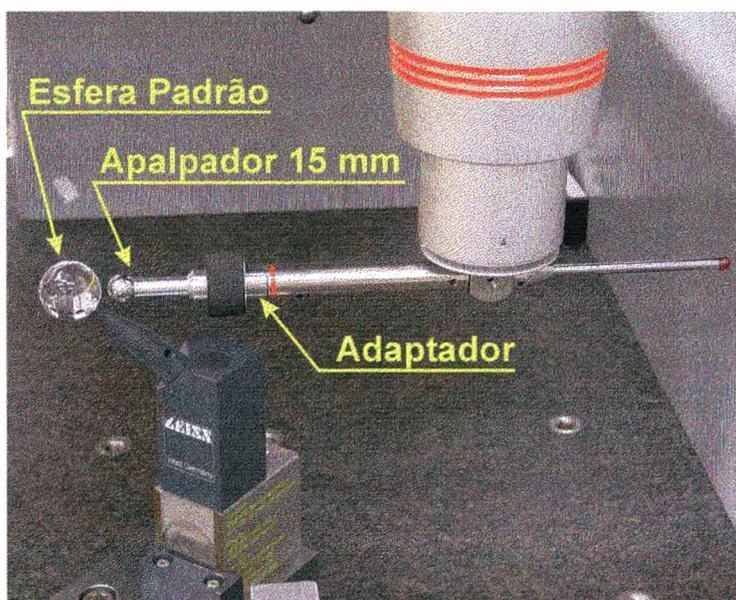


Figura 5.4 Calibração do apalpador.

Desta maneira a MMC localiza o centro da esfera do apalpador que será utilizado nas medições, como também determina o erro de forma deste. O mesmo procedimento foi realizado para o apalpador que foi utilizado para o alinhamento do sistema de coordenadas.

O alinhamento do sistema de coordenadas foi feito de maneira a garantir o alinhamento deste sistema de coordenadas com o sistema de coordenadas da interface mecânica do robô, quando o flange estiver devidamente montado.

Para o alinhamento foram tocados oito pontos, para definir o plano primário de alinhamento, na área do plano do flange que entra em contato com a interface do robô. Após este procedimento foram apalpados quatro pontos para a determinação do diâmetro do eixo de alinhamento, e a determinação do centro do sistema de coordenadas no centro do eixo. Para determinar a rotação

do último grau de liberdade restante foi apalpada a face do rasgo onde entra em contato a haste de alinhamento (que contém a marca 0) e este ponto foi transladado de 3,000 mm (raio da haste de alinhamento) em direção ao centro do rasgo.

Uma fase do processo de alinhamento pode ser visualizada na Figura 5.5.

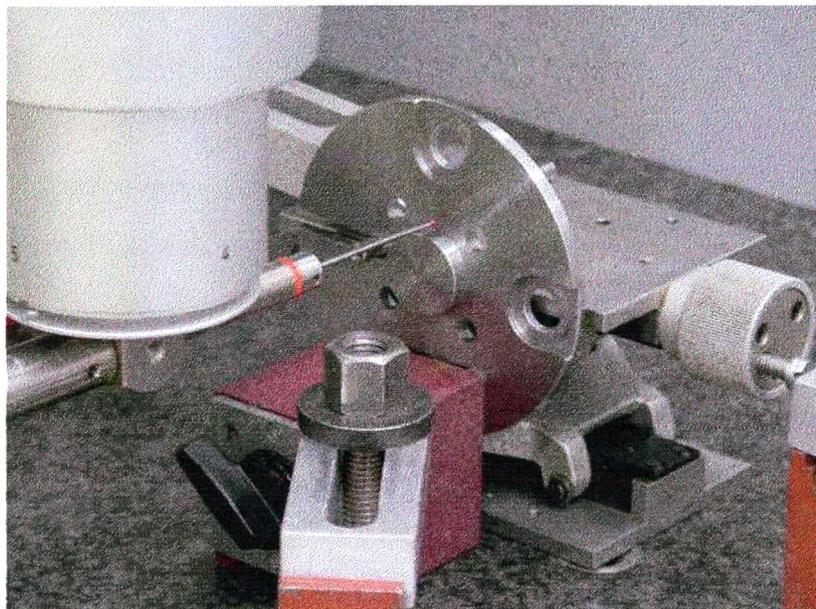


Figura 5.5 Alinhamento do sistema de coordenadas do flange de medição.

Após o procedimento de alinhamento foram feitas medidas utilizando o apalpador de  $\varnothing$  15 mm encaixado nos assentos de medição do flange determinando as coordenadas do centro do apalpador em relação ao sistema de coordenadas do flange.

Para a determinação da posição do centro da esfera do apalpador é utilizado o modo auto-centrante, o que permite uma mobilidade tal do apalpador, que este se encaixa no assento de medição, como mostra a Figura 5.6.



Figura 5.6 Apalpador encaixado no assento pelo modo auto-centrante.

Foi feito um novo alinhamento do sistema de coordenadas do flange e novas medições foram tomadas para garantir a repetitividade do alinhamento.

**Resultados.**

Incerteza de medição da MMC para 95% de abrangência:

$1D = \pm (0,8 + L/1000) \mu\text{m}$ , para comprimentos até 550mm, com L em mm [50];

$3D = \pm (1,0 + L/588) \mu\text{m}$ , para comprimentos até 550mm, com L em mm [50].

Maior incerteza da MMC para estas medições:  $U_{3D\ 95\%} = 1,1 \mu\text{m}$ .

Os resultados da medição da posição dos assentos em relação ao sistema de coordenadas do flange podem ser visualizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Resultado das medições de posição de cada assento em relação ao sistema de coordenadas do Flange de medição.

	Assento 1			Assento 2			Assento 3		
	Posição	$U_{95\%}$	K	Posição	$U_{95\%}$	K	Posição	$U_{95\%}$	K
	mm			mm			mm		
<b>X</b>	-0,385 ± 0,006		2,65	-37,423 ± 0,003		2,43	0,814 ± 0,004		2,51
<b>Y</b>	-37,623 ± 0,002		2,35	0,819 ± 0,006		2,62	37,329 ± 0,002		2,32
<b>Z</b>	10,180 ± 0,001		2,03	10,203 ± 0,001		2,03	10,0625 ± 0,001		2,00

Os dados da posição (X, Y e Z) de cada assento em relação ao SCF, constantes na Tabela 5.1, são utilizados no algoritmo para o cálculo da postura

do SCF em relação ao SCR.

A repetitividade de posicionamento do sensor, para 95% de abrangência, no assento de medição foi calculada com a Equação 5.1, e o resultado pode ser visualizado na Tabela 5.2.

$$\text{Re}3D = \sqrt{(\text{Re}X)^2 + (\text{Re}Y)^2 + (\text{Re}Z)^2} \quad (5.1)$$

Tabela 5.2 Repetitividade de posicionamento do apalpador no assento de medição.

Re 3D <sub>95%</sub> (mm)		
Assento 1	Assento 2	Assento 3
0,0003	0,0004	0,0005

Na determinação da repetitividade de posicionamento do apalpador no assento estão superpostas influências, como a rigidez finita da haste do apalpador, da peça de adaptação, do sistema de fixação do flange na mesa da MMC e do próprio flange que sofrem deslocamentos devido à força de medição. Essas influências não foram quantificadas, mas pode-se afirmar que em condições ideais a repetitividade de posicionamento do apalpador no assento não é superior ao apresentado na Tabela 5.2.

O resultado da medição do diâmetro do eixo de alinhamento é:

$\varnothing_{\text{eixo alinhamento}} = (24,993 \pm 0,005) \text{ mm}$ , com fator de abrangência  $K_{95\%} = 2,43$ .

Com isto, pode-se verificar que o diâmetro do eixo de alinhamento está dentro da tolerância especificada 25h6 (24,987 mm a 25,000 mm) e que a incerteza de alinhamento do sistema de coordenadas do flange com o sistema de coordenadas da interface mecânica devida a este ajuste é menor considerando a incerteza de medição do eixo ( $\pm 0,005 \text{ mm}$ ) do que se fosse considerada a tolerância de fabricação ( $\pm 0,007 \text{ mm}$ ) do diâmetro do eixo de alinhamento no cálculo da incerteza de alinhamento.

### 5.2.5 Ensaio de trajetória

#### Objetivo.

Este ensaio visa determinar os erros do braço de medição quando este mede a posição do flange de medição sendo deslocado numa trajetória retilínea. Esta trajetória é definida na Seção 4.2.1.

**Descrição do ensaio.**

Para a realização deste ensaio foi utilizado o sistema denominado Abbe Longa (Figura 5.7). Este sistema consiste de uma guia retificada que possui um carro que se desloca linearmente e um laser interferométrico. O laser determina os deslocamentos realizados pelo carro com incertezas muito pequenas, da ordem de décimos de micrometro.

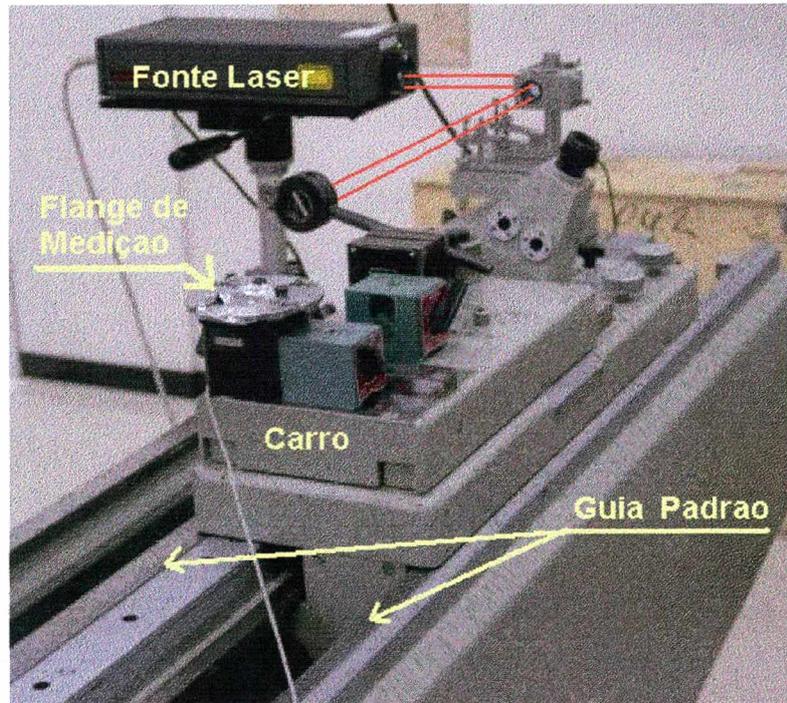


Figura 5.7 Sistema Abbe Longa.

O sistema Abbe longa reúne características desejáveis para o ensaio de trajetória. Este sistema possui erros de retilidade, batimento, guinamento, e tombamento desprezíveis em relação ao que o braço de medição pode captar. Além disso, o comprimento da guia é longo o suficiente (da ordem de 3 m) para permitir o deslocamento do carro na realização dos ensaios.

Para a realização dos ensaios o flange de medição foi fixado ao carro de forma a minimizar a influência da rigidez finita do dispositivo de fixação e do próprio flange.

Com o Flange de medição em frente ao braço de medição a posição do carro é zerada no software do laser interferométrico. O carro então é deslocado para a posição  $-500\text{mm}$  e então a posição do carro é novamente zerada. Esta posição é a inicial do percurso de  $1000\text{ mm}$  definido para os ensaios de

percurso e velocidade.

Nesta posição foram medidas a posição de cada assento e de um cone fixo ao carro. Depois o carro foi deslocado e feita nova seção de medições. Foram feitos deslocamentos e medições de forma a cobrir todo o percurso de 1000 mm. Uma posição sendo medida pode ser visualizada na Figura 5.8.

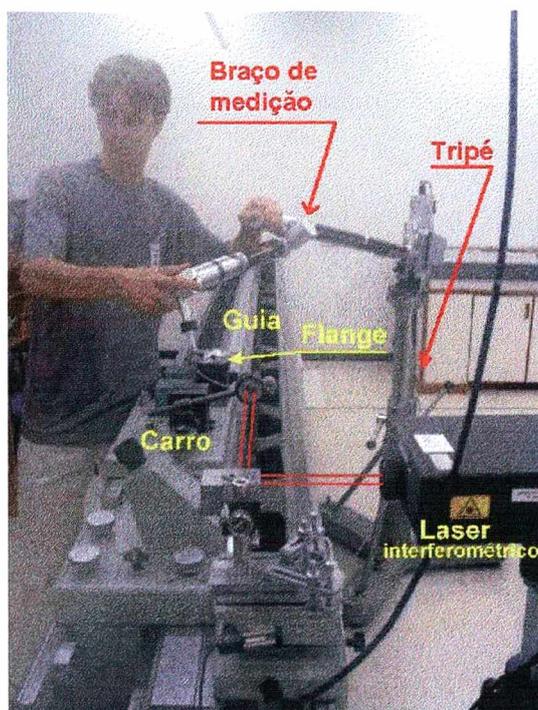


Figura 5.8 Realizando as medições.

A temperatura do flange foi medida, como pode ser visualizado na Figura 5.9, através de um transdutor de temperatura colado com uma fita metalizada.



Figura 5.9 Flange com transdutor de temperatura e indicador.

**Resultados.**

Os resultados dos deslocamentos do sistema de coordenadas do flange foram calculados em relação à posição inicial do flange (Posição #0). Os resultados são calculados de forma diferencial em relação à posição #0, de acordo com a Equação abaixo:

$$Distância = \sqrt{(X_n - X_0)^2 + (Y_n - Y_0)^2 + (Z_n - Z_0)^2} \quad (5.2)$$

Onde

$X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$  são as coordenadas do SCF na posição #0;

$n$  é o número da posição do flange de medição.

$X_n$ ,  $Y_n$  e  $Z_n$  são as coordenadas do SCF na  $n$ -ésima posição do flange de medição.

Os erros foram calculados comparando-se os dados medidos com o braço de medição e o algoritmo de cálculo com os dados do laser interferométrico. Estes resultados podem ser visualizados na Tabela 5.3, e também no gráfico da Figura 5.10.

Tabela 5.3 Resultados das medições de deslocamento do flange de medição.

Posição #	Distância nom. mm	C correção mm	$U_{95\%}$ mm	$K_{95\%}$	$Re_{95\%}$ mm
0	0	***	***	***	0,038
1	100	-0,007	0,002	2,01	0,032
2	200	0,002	0,002	2,01	0,033
3	300	0,004	0,002	2,01	0,037
4	400	-0,010	0,002	2,01	0,033
5	500	0,012	0,002	2,01	0,032
6	600	0,014	0,002	2,01	0,034
7	700	-0,009	0,002	2,01	0,031
8	800	0,016	0,002	2,01	0,031
9	900	0,003	0,002	2,01	0,034
10	1000	0,028	0,002	2,01	0,031

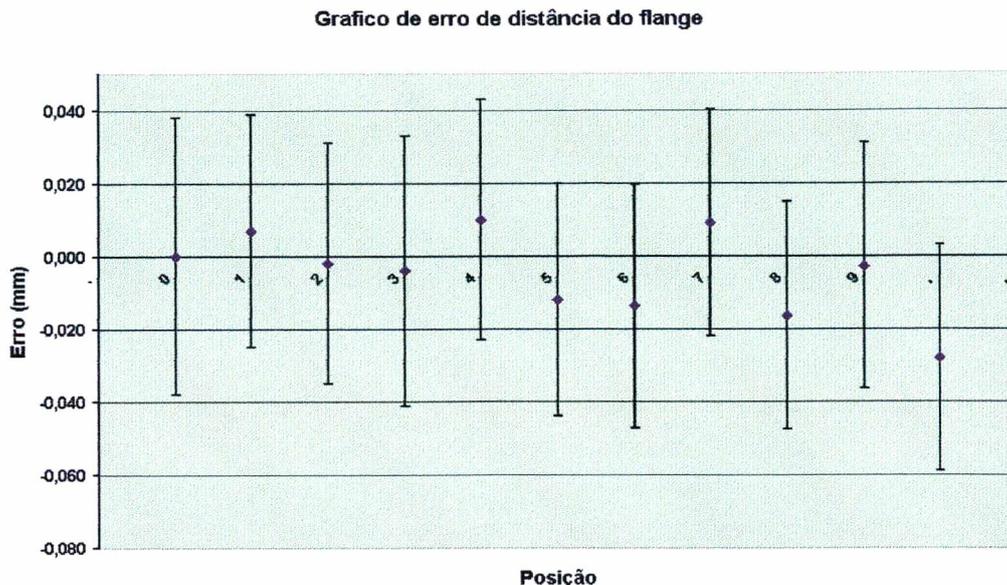


Figura 5.10 Gráfico que mostra o erro na determinação da distância de deslocamento do flange (carro) em função da posição.

As medições no cone foram feitas com o objetivo de realizar uma comparação entre as distâncias medidas utilizando o braço de medição, o flange e o algoritmo de cálculo e as distâncias medidas utilizando apenas o braço de medição. Os resultados das medições feitas no cone podem ser visualizados na Figura 5.11.

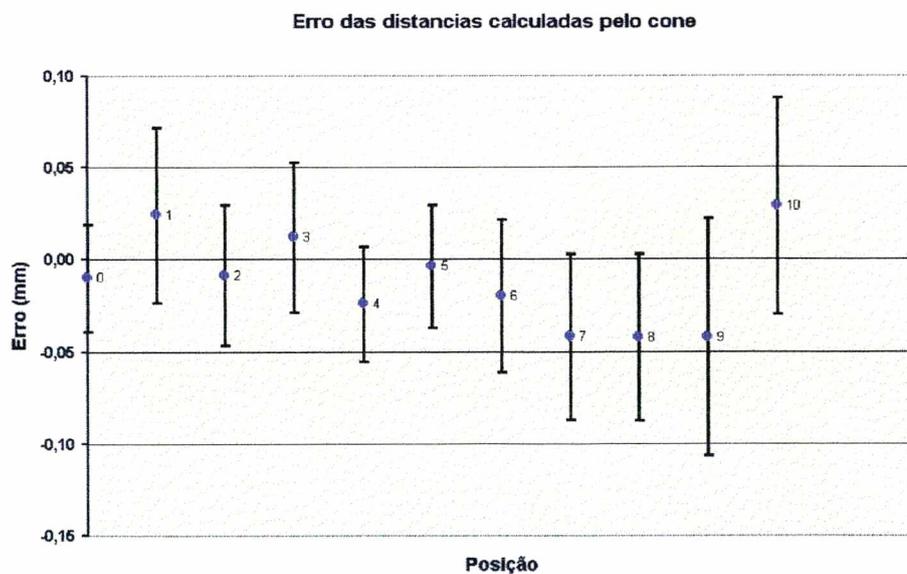


Figura 5.11 Gráfico que mostra o erro na determinação da distância de deslocamento do carro em função da posição através de medições no cone.

Como pode ser observado, comparando-se as Figuras 5.10 e 5.11, o erro na determinação do deslocamento é maior se as medições forem feitas através do cone. Com isto, é possível afirmar que o erro na determinação de deslocamento, utilizando as medições dos três assentos e o algoritmo, é menor do que medir um único assento apenas.

Como o percurso que o flange de medição (carro) se deslocou pode ser considerado padrão outros resultados podem ser calculados, com as fórmulas apresentadas na Seção 2.4.4:

Repetitividade de percurso:  $RT = 0,036 \text{ mm}$ .

Repetitividade de orientação de percurso:

$RT_A = 0,07^\circ$

$RT_B = 0,04^\circ$

$RT_C = 0,08^\circ$

### **5.2.6 Ensaio de determinação de tendência do braço de medição**

#### **Objetivos.**

Este ensaio visa determinar uma estimativa do erro sistemático que o braço de medição possui na medição de distâncias.

Uma vez que não existe disponível uma maneira de calibrar a postura do flange de medição no paralelepípedo definido para os ensaios de desempenho, a tendência na determinação de distâncias através do braço de medição foi calibrada através de um padrão escalonado.

#### **Descrição do ensaio.**

Para a realização deste ensaio foi utilizado um padrão escalonado calibrado [51], que consiste de uma barra onde estão fixos diversos blocos cilíndricos de cerâmica, com faces paralelas e com a distância entre as faces calibrada.

Um detalhe dos blocos cilíndricos sendo medido pode ser visualizado na Figura 5.12.

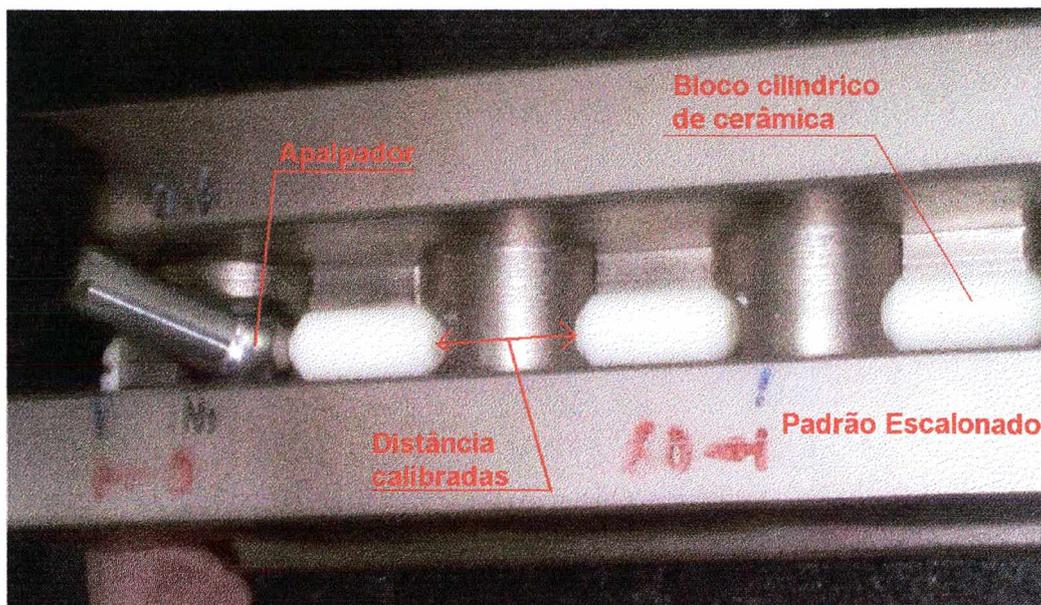


Figura 5.12 Detalhe do padrão escalonado sendo medido com o braço de medição.

Para a realização das medições foi feito o alinhamento do sistema de coordenadas, de maneira que o eixo X fique ao longo dos centros dos blocos de cerâmica com o centro do sistema de coordenadas no centro do apalpador tocando na primeira face cerâmica.

O padrão escalonado foi posicionado em diversas direções no volume correspondente ao paralelepípedo definido para os ensaios de avaliação de desempenho do robô.

Uma foto mostrando o padrão escalonado sendo medido com o braço de medição pode ser visualizada na Figura 5.13.



Figura 5.13 Medição no padrão escalonado.

Desta maneira, a maior distância medida no paralelepípedo definido para os ensaio com o robô (1200x400x400 mm) é de aproximadamente 660 mm, considerando a localização do sistema de coordenadas do braço de medição como sendo o centro do paralelepípedo. Portanto os resultados foram analisados até a distância de 680 mm.

### **Resultados.**

Os resultados da calibração podem ser visualizados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Resultados da calibração da tendência na medição de distâncias com o braço de medição

Posição #	Nominal mm	VVC mm	C <sub>correção</sub> mm	U <sub>95%</sub> mm	K <sub>95%</sub>	Re <sub>95%</sub> mm
1	0	0	-0,06	0,02	2,06	0,06
2	40	39,9814	-0,03	0,05	2,08	0,07
3	80	80,0266	0,00	0,04	2,08	0,08
4	120	120,047	-0,01	0,05	2,08	0,09
5	160	160,0197	0,03	0,03	2,07	0,07
6	200	200,0681	0,05	0,02	2,06	0,07
7	240	240,0644	0,04	0,03	2,07	0,07
8	280	280,0996	0,05	0,03	2,07	0,07
9	320	320,0718	0,05	0,04	2,08	0,09
10	360	360,0452	0,06	0,03	2,07	0,08
11	400	400,0538	0,06	0,02	2,06	0,09
12	440	440,0569	0,06	0,03	2,07	0,09
13	480	480,0759	0,08	0,03	2,06	0,08
14	520	520,0777	0,08	0,03	2,06	0,08
15	560	560,1716	0,09	0,03	2,05	0,09
16	600	600,1608	0,10	0,03	2,05	0,09
17	640	640,1869	0,11	0,04	2,04	0,08
18	680	680,1936	0,11	0,05	2,06	0,08

Esses dados também podem ser visualizados na Figura 5.14.

Estimativa do erro sistemático

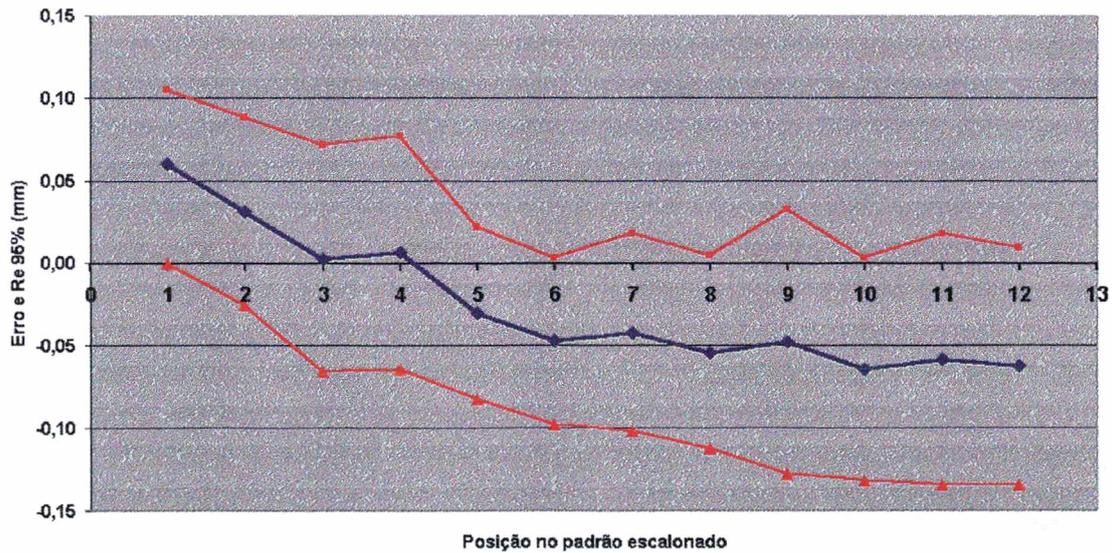


Figura 5.14 Gráfico da tendência na medição de distância através do braço de medição.

Como principal conclusão destes resultados, pode-se verificar que o crescente erro para medições de comprimentos cada vez maiores é devido principalmente ao alinhamento, uma vez que esta característica não foi observada nas medições com o laser interferométrico (Seção 5.2.5). As medições

com o laser interferométrico não necessitam de alinhamento, pois suas medições são diferenciais, o que não é viável de fazer com o padrão escalonado.

Esta mesma observação pode ser feita se comparado os resultados das medições com o padrão escalonado e o certificado de calibração do braço de medição, onde a incerteza de medição para medições de comprimento de um padrão de aproximadamente 711 mm é de 0,1 mm. Para a realização desta calibração, a distância entre dois cones é medida em todo o volume de medição do braço e estas distâncias são calculadas de forma diferencial, portanto não é adicionada a influência do alinhamento nos resultados.

### **5.2.7 Ensaio de alinhamento**

#### **Objetivo.**

Este ensaio visa verificar a influência do alinhamento do sistema de coordenadas do braço de medição (SCB) ao sistema de coordenadas do robô (SCR) na avaliação de desempenho. Também foi realizado um ensaio para determinar o número de pontos necessário para localizar a posição do centro da circunferência de alinhamento da interface mecânica do robô.

#### **Descrição dos ensaios.**

Para a determinação do número de pontos necessários para a determinação da posição do centro da circunferência foi utilizado um anel padrão calibrado com o mesmo diâmetro nominal do furo na interface do robô UP6. Foram feitas então várias medições variando o número de pontos para determinar o plano de projeção e o diâmetro da circunferência projetada. Ao se determinar o menor número de pontos que o erro na determinação do diâmetro estabilizou, determinou-se o número de pontos para a realização do alinhamento.

Uma foto do procedimento para determinar o número de pontos para o alinhamento pode ser visualizada na Figura 5.15.



Figura 5.15 Medição de anel padrão com o braço de medição.

Após determinado o número ótimo de pontos para realizar o alinhamento, foi realizado um ensaio no robô UP6 Motoman, que consiste em realizar o alinhamento conforme descrito na Seção 4.2.1. O alinhamento foi repetido dez vezes.

#### **Resultados.**

O número de pontos que devem ser medidos no plano da interface e no cilindro interno para a realização do alinhamento do SCB com o SCR deve ser de no mínimo vinte pontos para cada medição (vinte para o plano e vinte para o círculo), uma vez que um número maior de pontos não reduz significativamente o erro na determinação do diâmetro do anel padrão.

A maior repetitividade da localização dos centros dos três círculos, utilizados no alinhamento é de:

$$Re_{95\%} 3D = 0,034 \text{ mm.}$$

Na determinação da repetitividade de alinhamento estão superpostas influências da incerteza do braço de medição e acabamento e erros de forma da interface mecânica do robô UP6.

### **5.2.8 Ensaio de Força**

#### **Objetivo.**

Ao realizar medições com o braço de medição em contato com o robô são gerados esforços devido à força de medição e inércia do sistema de medição para medições com deslocamento. Estes ensaios visam quantificar os esforços

aplicados pelo braço de medição à interface do robô, tanto em ensaios estáticos, como nos ensaios de características de percurso e velocidade, para diferentes velocidades de percurso.

#### **Descrição do ensaio.**

Para a realização dos ensaios, o apalpador do braço de medição percorreu a mesma trajetória percorrida nos ensaios para determinação das características de percurso e velocidade do robô. A localização desta trajetória em relação ao braço de medição é descrita na Seção 4.2.1, e pode ser visualizada na Figura 5.16.

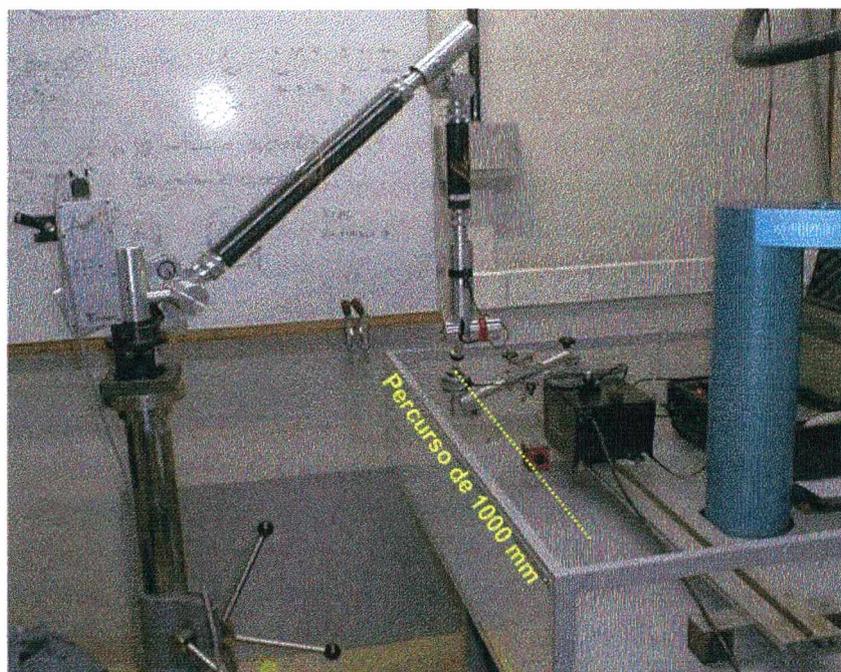


Figura 5.16 Percurso percorrido para determinação dos esforços nas medições de velocidade.

Para a determinação dos esforços foi utilizado um transdutor de força que adquire as forças em três direções (X,Y,Z) [53]. Este transdutor de força é utilizado em robôs, e faz parte do Laboratório de Automação Industrial na Universidade Federal de Santa Catarina em um robô tipo SCARA.

Para a realização dos ensaios, foram fabricadas peças especiais para a fixação do transdutor de força de modo que este permita quantificar os esforços no percurso determinado. Também foi confeccionado um dispositivo que tem um assento semelhante aos assentos do flange de medição, constituído de três esferas e um ímã que faz a atração do apalpador do braço de medição.

Para simular a trajetória realizada pelo robô foi utilizado um equipamento, denominado Tartilope, que é utilizado para o deslocamento de tochas de soldagem. Este equipamento pode ser programado de modo a se deslocar num percurso retilíneo com velocidade e distância definidas. Este equipamento foi emprestado pelo Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina para a realização dos ensaios.

Uma foto do sensor de força, com as direções dos esforços medidos (X, Y e Z) e do Tartilope pode ser visualizada na Figura 5.17.

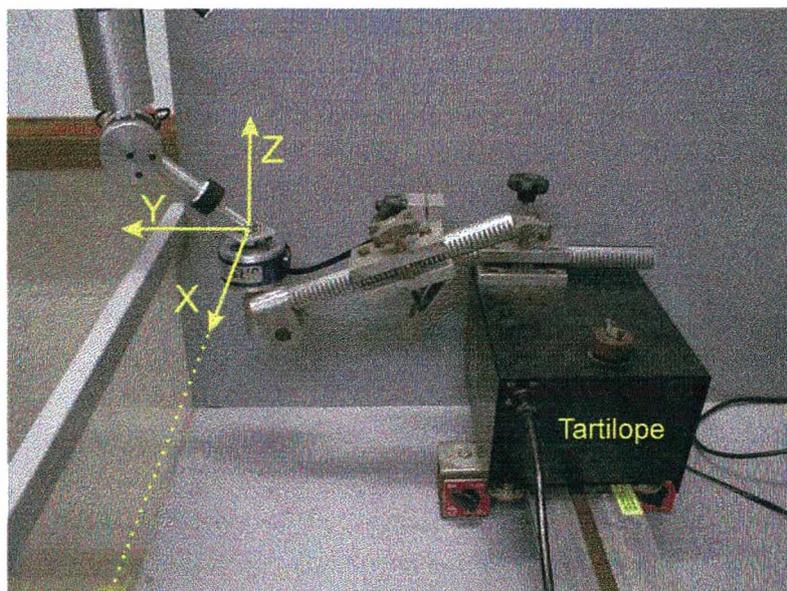


Figura 5.17 Tartilope e direção dos esforços medidos pelo transdutor.

Foram feitos ensaios para a determinação dos esforços quando as medições com o braço de medição são feitas manualmente. Para isto o transdutor de força foi posicionado na horizontal (plano XY na horizontal), conforme Figura 5.17, e na vertical (plano XY na vertical) para verificar se existe diferença dos esforços na realização dos ensaios estáticos nestas duas posições.

Foram realizadas dez repetições, nos ensaios dinâmicos, para cada velocidade programada e cinquenta repetições para as medições estáticas com o plano XY na posição horizontal e cinquenta repetições para as medições estáticas com o plano XY na posição vertical.

O número máximo de pontos que o arquivo de dados pode gravar, para cada direção de força, é 1000. Portanto a frequência de aquisição do transdutor de força foi programada, para cada velocidade de percurso, de modo a adquirir

o maior número possível de pontos, sem, no entanto, chegar ao limite de 1000 pontos.

### Resultados.

Como resultado das medições dinâmicas, a força resultante (FR) pode ser calculada segundo a Equação 5.3, e um gráfico contendo os resultados para cada velocidade (indicadas em cm/min) pode ser visualizado na Figura 5.18.

$$FR = \sqrt{Fx^2 + Fy^2 + Fz^2} \quad (5.3)$$

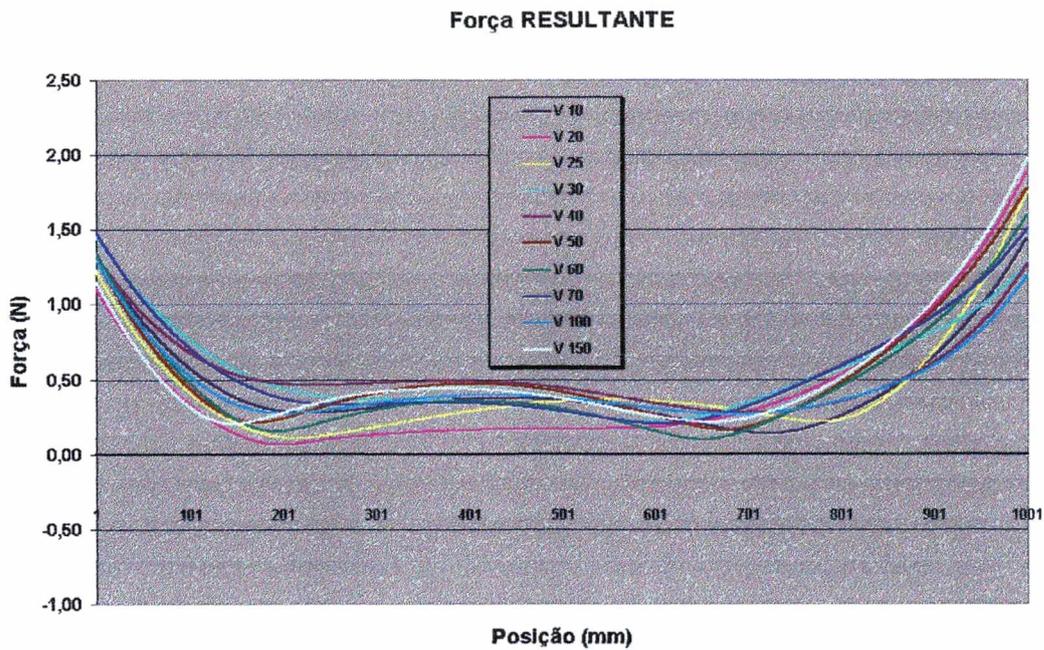


Figura 5.18 Gráfico da força de medição resultante para cada velocidade em cm/min.

Este gráfico mostra a força média em função da posição no percurso de 1000 mm para cada velocidade programada. Como resultado principal obteve-se a força máxima de medição, com 95% de abrangência:

$$F_{\text{resultante máxima 95\%}} = 2,6 \text{ N.}$$

Nos gráficos constantes nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21, podem ser visualizados os esforços em cada direção, utilizados no cálculo da força resultante para cada velocidade de percurso (indicadas em cm/min).

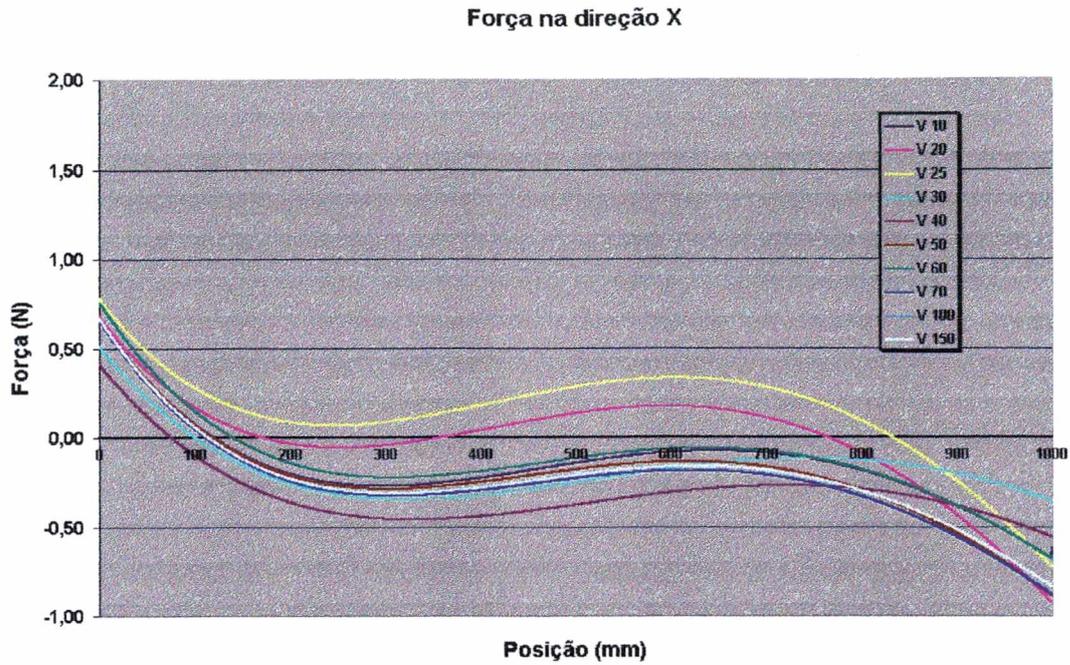


Figura 5.19 Gráfico da força de medição na direção X em função da posição para cada velocidade em cm/min.

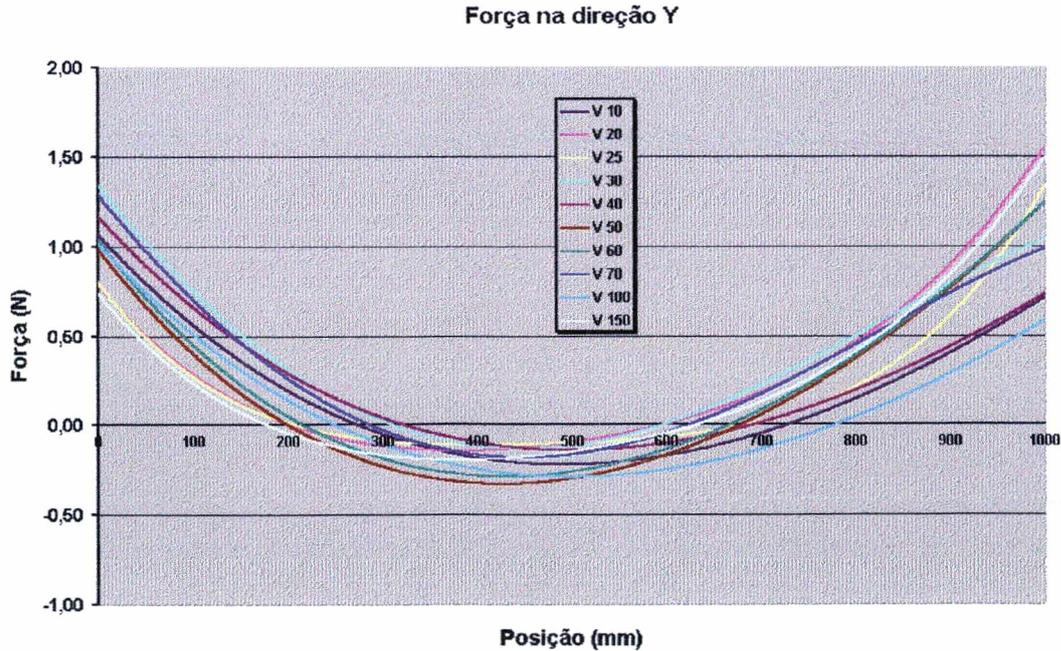


Figura 5.20 Gráfico da força de medição na direção Y em função da posição para cada velocidade em cm/min.

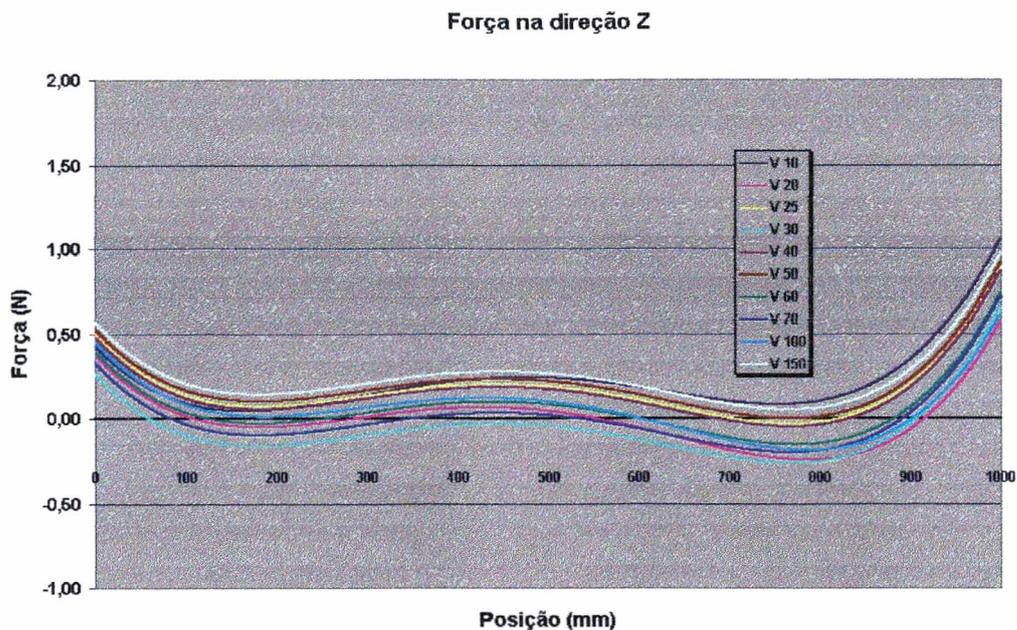


Figura 5.21 Gráfico da força de medição na direção Z em função da posição para cada velocidade em cm/min.

Explica-se o fato de a força resultante de medição ser menor no meio do percurso porque é nessa região onde o braço de medição se encontra na condição de “repouso”. Outra conclusão a que se pode chegar é de que as velocidades são relativamente baixas para gerarem forças elevadas e diferenças significativas para as diferentes velocidades de percurso ((10 a 150) cm/min).

Os resultados dos ensaios para a determinação da força de medição manual podem ser visualizados na Figura 5.22.

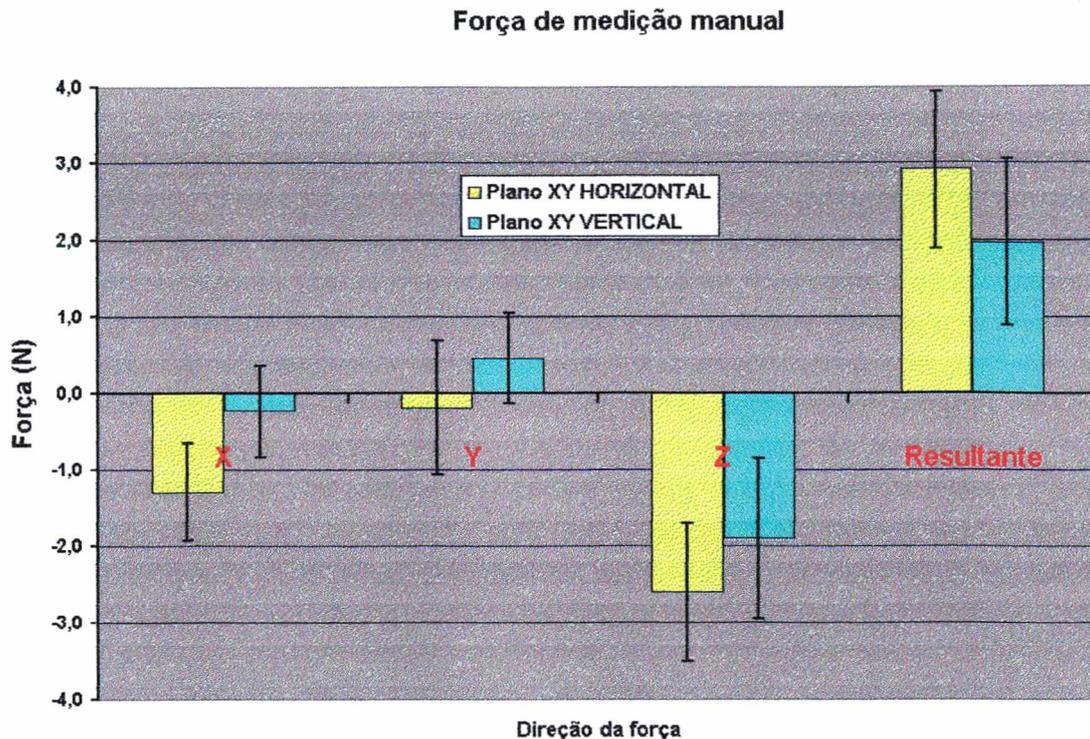


Figura 5.22 Gráfico da força de medição manual.

A força de medição máxima, com um fator de 95% de abrangência, para cada posição do plano XY é:

Força máxima de medição com o plano XY na horizontal:  $F_{\text{máx}} = 3,9$  N.

Força máxima de medição com o plano XY na vertical:  $F_{\text{máx}} = 3,1$  N.

### 5.3 Simulação

Devido à não disponibilidade de padrões adequados para realizar a calibração da postura do flange no volume definido pelo cubo de teste (1200x400x400 mm) a ser utilizado nos ensaios com o Roboturb, foi realizada uma simulação por computador para levantamento da componente de incerteza atribuída ao braço de medição e a incerteza de medição do flange e ao algoritmo de cálculo (exposto na Seção 4.1.3) na determinação da incerteza total de medição da postura do sistema de coordenadas da interface mecânica.

#### 5.3.1 Algoritmo de simulação

Para a realização da simulação, foi construído um algoritmo que realiza

basicamente:

- a translação e a rotação da posição (X, Y, Z) do centro da esfera do apalpador encaixado em cada assento de  $x_0, y_0, z_0, A, B, C$ ;
- a inserção de erro aleatório, segundo distribuição normal, para cada coordenada X, Y, Z de cada assento para  $d$  repetições;
- o cálculo dos valores de  $x_0, y_0, z_0, A, B, C$  para cada uma das  $d$  repetições;
- o cálculo da tendência e do desvio padrão para cada postura simulada.

Para cada coordenada X, Y, Z, do centro do apalpador encaixado no assento, foram embutidos erros aleatórios de acordo com a equação:

$$C_n = C + \sigma \sqrt{-2 \cdot \ln(\text{aleatório}1)} \cdot \cos(2\pi \cdot \text{aleatório}2) \quad (5.4)$$

Para infinitos números aleatórios ( $0 \leq \text{aleatório} \leq 1$ ), essa equação tende a uma distribuição normal com média C (valores X,Y,Z para cada assento) e desvio padrão  $\sigma$  [42]. Foi utilizado o desvio padrão do braço de medição em medições no paralelepípedo = 0,036 mm e posteriormente a incerteza padrão das medições do flange, extraídas da Tabela 5.1

Foram calculados 1000 valores para cada coordenada de cada assento em 55 posturas diferentes no cubo de teste a ser utilizado no Roboturb (1200x400x400 mm). Das 55 posturas utilizadas na simulação, 5 foram as posturas definidas na Seção 2.4.3 e 50 foram posturas aleatórias de modo que ( $x_0 = \pm 600$  mm), ( $y_0$  e  $z_0 = \pm 200$ mm) e ( $A, B$  e  $C = \pm 270$  °).

### 5.3.2 Resultados da simulação

Os resultados apresentados nesta seção são os mais elevados encontrados em todas as posturas simuladas. Os desvios padrão quantificados são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Principais resultados da simulação

Fonte de incerteza	Desvio padrão 3D (mm)	Desvio padrão rotação (°)
Braço de medição	0,043	0,08
Medição do flange	0,004	0,005

Os erros sistemáticos foram desprezíveis.

## 5.4 Resultados

Com os principais dados expostos na Seção 5.2 e na Seção 5.3 foi feito um balanço de modo a combinar as principais fontes de incerteza que afetam os resultados nas medições feitas com o braço de medição segundo a metodologia proposta.

A planilha utilizada para o cálculo da incerteza expandida pode ser visualizada na Figura 5.23

SIMBOLO	COMPONENTES INCERTEZA	VALOR [mm]	DISTRIB.	DIVISOR	u [mm]	vi ou vef.
ReAL	Re alinhamento	0,034	normal	2,000	0,0170	100000
FmF	Folga máxima do flange	0,016	retangular	1,732	0,0092	100000
ReAS	Re encaixe no assento	0,0005	normal	2,000	0,0003	100000
Res	Resolução	0,001	retangular	1,732	0,0006	100000
Dsim	Maior desvio padrão simulação	0,043	normal	1,000	0,0430	5000
ImF	Incerteza de medição flange	0,002	normal	1,000	0,0020	5000
Tamb	Temperatura ambiente	*****				
Rigf	Rigidez flange/robô	*****				
<b>uc</b>	<b>INCERTEZA COMBINADA</b>		<b>NORMAL</b>		<b>0,04720</b>	<b>7248,407</b>
<b>U<sub>95</sub></b>	<b>INCERTEZA EXPANDIDA (~95%)</b>		<b>k=</b>	<b>2,00</b>	<b>0,094</b>	

Figura 5.23 Planilha para cálculo da incerteza expandida na determinação da localização do sistema de coordenadas da interface mecânica.

As componentes de incerteza indicadas com \*\*\*\*\* são desprezíveis ou não foram quantificadas.

Um gráfico ilustrando a contribuição de cada fonte de incerteza no cálculo da incerteza expandida pode ser visto na Figura 5.24.

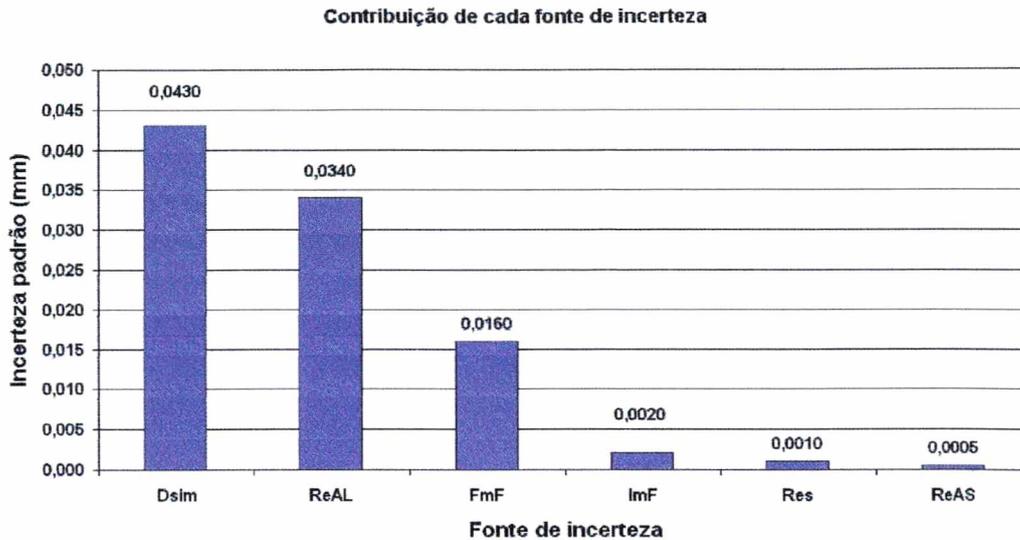


Figura 5.24 Gráfico com fontes de incerteza

Para o cálculo da incerteza expandida na determinação da orientação foi utilizado processo semelhante, obtendo-se como resultado:

$$U_{95\%} = 0,2^\circ$$

$$K=2,00$$

Entre as ações que podem ser empregadas para a minimização da incerteza expandida estão:

- Realizar mais de uma medição em cada assento para cada postura atingida;
- Utilizar um braço de medição que possua incerteza de medição inferior ao utilizado;
- Realizar uma calibração do braço de medição semelhante à feita pelo fabricante (não necessita alinhamento) apenas no volume de medição utilizado nos ensaios de avaliação de desempenho;
- Projetar um flange de medição com tolerâncias de fabricação mais estreitas e definir o diâmetro do eixo de alinhamento de forma que se ajuste à interface mecânica do robô por interferência, evitando folgas;

As fontes de incerteza devem ser quantificadas para cada flange de medição utilizado (simulação, folgas e repetitividade de encaixe no assento) e para cada robô a ser avaliado (repetitividade de alinhamento e folgas).

## **5.5 Estudo de caso**

Para levantar as principais dificuldades em utilizar o sistema de medição e desenvolver melhorias de modo a facilitar a utilização da metodologia proposta, foram realizados ensaios com um robô industrial.

O robô utilizado, modelo UP6 da Motoman, possui uma característica essencial para a validação da metodologia proposta para a avaliação de desempenho do Roboturb. Esta característica é o volume de trabalho suficientemente grande para simular o cubo de teste (paralelepípedo) a ser utilizado nos ensaios com o Roboturb.

### **5.5.1 Ensaio de postura**

#### **Objetivo.**

Simular as medições para levantamento de características de postura, a serem realizadas no Roboturb, no robô industrial UP6 da Motoman.

#### **Descrição dos ensaios.**

Para a realização dos ensaios foi programado no robô as posturas definidas na Seção 2.4.3 para um paralelepípedo de 1200x400x400 mm.

Para a realização dos ensaios o braço de medição deve ser posicionado como definido na Seção 4.2.1, de modo que estando o braço na posição de repouso (conforme Figura 4.10), o apalpador deve estar próximo ao ponto P1 definido na Seção 2.4.3.

Então são feitas diversas medições em cada postura atingida para a determinação das características de postura, através do flange de medição, do braço de medição e do algoritmo de cálculo.

#### **Resultados.**

Os resultados calculados são as tendências de posicionamento e orientação (postura) para as posturas programadas. O cálculo de repetitividade de postura não foi realizado porque a incerteza de medição é muito grande ( $U_{95\%} = 0,094$  mm) se comparada com a repetitividade de posicionamento informada pelo fabricante ( $RP = 0,08$  mm), já que a norma ISO9283 determina que a incerteza do sistema de medição deve ser no mínimo quatro vezes menor do que a característica a ser quantificada.

Os resultados de medição da tendência de postura podem ser visualizados na Tabela 5.5 e na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Tendência de posicionamento.

(mm)	APx	APy	APz	APp
P1	1,00	0,42	-0,30	1,13
P2	1,31	-1,09	0,45	1,76
P3	0,56	-0,11	0,51	0,77
P4	0,96	-0,56	0,09	1,12
P5	0,05	0,42	-0,02	0,43

Tabela 5.7 Tendência de orientação.

(°)	APa	APb	APc
P1	-0,2	0,1	-0,8
P2	-0,1	0,1	-0,8
P3	-0,2	0,0	-0,9
P4	-0,2	0,2	-0,9
P5	-0,2	0,0	-0,7

A estes resultados estão associadas às incertezas expandidas de 0,094 mm e 0,2 ° para a tendência de posicionamento e tendência de orientação respectivamente. Além disso, a força de medição afeta os resultados devido à rigidez finita do robô. Esta influência não foi quantificada.

A realização das medições se mostrou relativamente fácil e rápida. O maior trabalho consiste em gravar os dados manualmente, o que poderia ser melhorado com o desenvolvimento de um software dedicado a realizar avaliação de desempenho de robôs.

### 5.5.2 Ensaio de velocidade

#### Objetivo.

Devido à falta de padrões adequados que garantam o deslocamento do flange num percurso requerido com velocidade constante e bem caracterizada não foi possível calibrar o braço de medição para medições de características de velocidade.

Contudo, este ensaio tem o objetivo de verificar a metodologia na medição de características de velocidade utilizando o braço de medição. As velocidades programadas para a realização dos ensaios são as comumente utilizadas para operações de soldagem e deposição de material.

#### **Descrição dos ensaios.**

O braço de medição possui um modo de medição que faz medições automáticas, com o período de aquisição programável.

Foi constatado que ao utilizar o modo de medição automático com período de aquisição baixo (por exemplo 100 ms) havia interrupções na aquisição, o que comprometia todo o cálculo de velocidades, pois estes são baseados no período de aquisição.

Em função deste problema foi feito um ensaio para a indicação do melhor período de aquisição a ser utilizado nos ensaios com deslocamento do robô.

Este ensaio consistiu em fazer a aquisição dos dados com diferentes períodos de aquisição. Concomitantemente foi feita a determinação do tempo para a realização do percurso, assim também foi feita uma verificação da velocidade média de deslocamento da interface do robô no percurso programado.

Depois de determinado o melhor período de aquisição, que deve equilibrar repetitividade na determinação da velocidade e número de pontos medidos durante a realização do percurso, foram realizadas diversas repetições do percurso para cada velocidade programada. Todas as velocidades médias programadas foram também verificadas a partir da medição do tempo de deslocamento no percurso programado.

#### **Resultados.**

O gráfico ilustrado na Figura 5.25 mostra o erro de medição de velocidade média (para velocidade média= 30 cm/min) em função de diferentes períodos de aquisição programados no software do braço de medição (G-PAD v2.0). Como resultado desta análise foi escolhido o período de 1500 ms para a medição de velocidade média, para velocidades programadas de 3,33 mm/s a 25 mm/s (20cm/min a 150 cm/min). Especificamente para a velocidade de 1,67 mm/s (10 cm/min) foi escolhido o período de aquisição de 3000 ms,

devido ao limite máximo de 200 pontos de aquisição, garantindo assim a medição durante todo o percurso de 1000 mm.

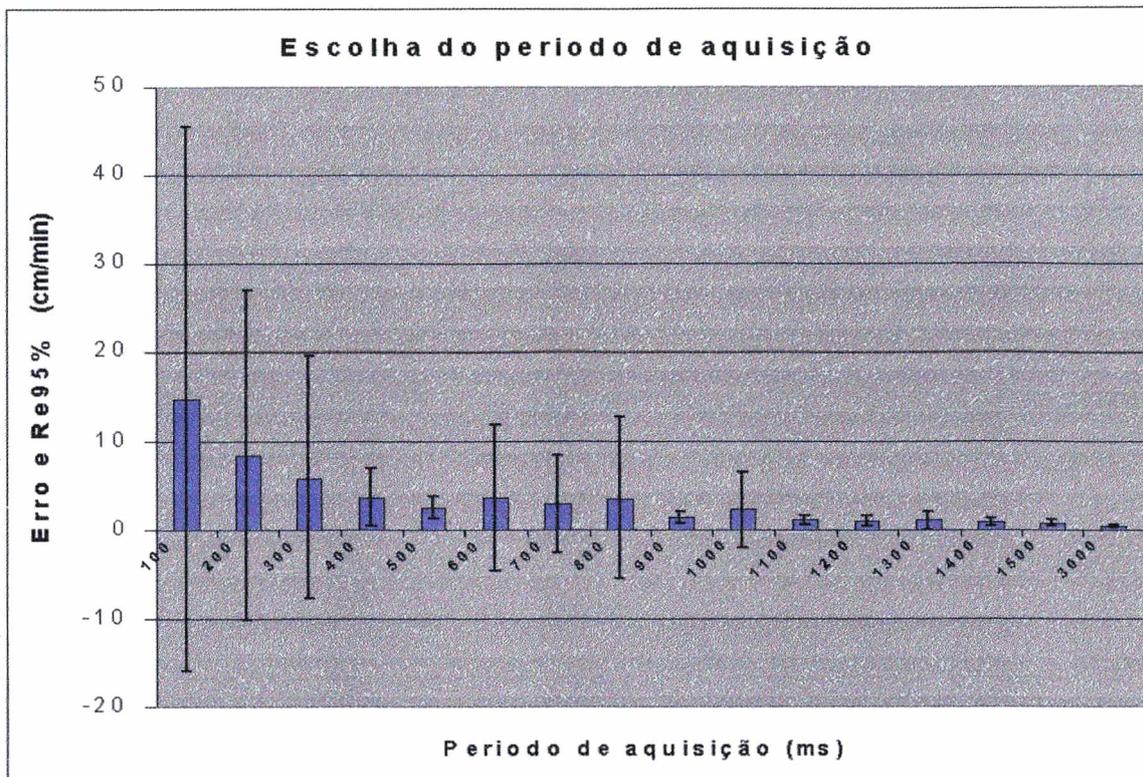


Figura 5.25 Gráfico para indicação do período de aquisição para as medições de velocidade.

Os resultados das medições de características de velocidade (tendência de velocidade (AV), repetitividade de velocidade (RV) e flutuação de velocidade (FV)) foram calculados com as fórmulas expostas na Seção 2.4.4. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Resultados das medições de características de velocidade.

Velocidade cm/min	AV %	RV %	FV cm/min
10	4,5	1,7	0,37
20	1,7	2,3	1,07
30	2,8	2,2	1,70
40	3,3	2,2	1,65
50	2,4	1,7	1,66
60	2,8	2,0	1,95
70	3,0	2,0	2,37
100	3,0	2,0	5,02
150	2,9	2,2	4,50

Como não são conhecidos os erros das características de velocidade do robô UP6, não é possível afirmar que este pode ser utilizado para determinar os erros do braço de medição, utilizado segundo a metodologia proposta, para quantificar as características de velocidade.

Foram feitas medições da velocidade média através de um cronômetro digital, e não foram encontrados erros superiores a 0,1 % da velocidade programada. Neste erro estão superpostos erros devido a sincronização de início e final de contagem de tempo, aceleração e desaceleração da interface e erros de velocidade média.

Uma afirmação possível de ser feita é que os erros do braço de medição, para determinar as características de velocidade segundo a metodologia, não são superiores aos mostrados na Tabela 5.8. Isto se deve ao fato de que os dados apresentados na Tabela 5.8 terem influência tanto dos erros do sistema de medição como dos erros do próprio robô UP6.

As medições de características de percurso e velocidade se mostraram relativamente fácil e rápida. A utilização de um ímã para manter o apalpador em contato com o assento se mostrou satisfatória, pois permitiu a mobilidade necessária do apalpador. As medições com o braço de medição iniciadas e encerradas pelo robô sempre repetiram os mesmos números de pontos medidos para cada velocidade medida.

O maior trabalho consiste em gravar os dados manualmente no final das medições, o que poderia ser melhorado com o desenvolvimento de um software dedicado a realizar avaliação de desempenho de robôs.

## **Capítulo 6**

### **Conclusão**

Este capítulo tem o objetivo de expor as conclusões da realização deste trabalho, que consistiu em desenvolver uma metodologia para avaliação de desempenho de um manipulador que faz parte de um sistema automatizado para recuperação de turbinas hidráulicas em desenvolvimento na Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

As seguintes perguntas que levaram a realização deste trabalho são respondidas:

- A metodologia para avaliação de desempenho alcançou os resultados esperados?
- Quais são as principais aspectos positivos e limitações em utilizar essa metodologia?
- O que poderia ser feito para melhorar a metodologia proposta?

#### **6.1 A metodologia de avaliação**

Esta seção apresenta as principais características do sistema de medição, incluindo resultados, vantagens e desvantagens da utilização do sistema de medição.

A metodologia de avaliação de desempenho desenvolvida foi direcionada para a avaliação do sistema automatizado para recuperação de turbinas hidráulicas, Roboturb. Entretanto essa metodologia se aplica na avaliação de

desempenho de outros tipos de robôs industriais.

### **6.1.1 Utilização da Metodologia**

A utilização de um sistema robusto, de tecnologia de ponta, confiável, portátil e fácil de utilizar como o braço de medição faz da metodologia de avaliação desenvolvida uma ferramenta indicada tanto para avaliação do Roboturb em ambiente de laboratório como “*in loco*”.

O preparo do equipamento para realizar a avaliação de desempenho é simples e rápido, assim como a utilização de um flange específico para as medições agiliza bastante a realização dos ensaios.

O projeto do flange de medição foi simplificado ao máximo, de modo a facilitar sua fabricação, baixar custos e tempo de produção, assim como ser de fácil e rápida montagem e utilização.

A característica de portabilidade do sistema de medição e a possibilidade de realizar medições “*in loco*” (desde que respeitadas as condições impostas pelo fabricante) são as principais características do sistema, uma vez que a grande maioria dos sistemas de avaliação de desempenho de robôs industriais ainda estão confinados ao ambiente de laboratório [54].

Uma outra característica importante da metodologia desenvolvida é a facilidade em se fazer o alinhamento do sistema de coordenadas do braço de medição com o sistema de coordenadas do robô.

### **6.1.2 Resultados**

Abaixo são apresentados os principais resultados provenientes dos ensaios realizados no desenvolvimento da metodologia de avaliação de desempenho do Roboturb, tendo como ponto central a utilização de um braço de medição.

A norma ISO 9283 estabelece que a incerteza de medição, na avaliação de desempenho, não deve exceder 25% da magnitude da característica avaliada [21].

Com base neste dado, os resultados são expressos abaixo, Tabela 6.1, de forma a representar o resultado dos ensaios e simulação do sistema de medição e o valor mínimo desta característica que o robô deve ter para ser avaliado de

acordo com a metodologia proposta, segundo norma ISO9283, delimitando sua aplicabilidade.

Tabela 6.1 Resultados alcançados com o desenvolvimento da metodologia, divididos em resultados dos ensaios e magnitude mínima da característica do robô.

<b>Descrição da característica</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Robô</b>
Repetitividade de medição de distância no percurso definido para os ensaios com deslocamento - <b>Re<sub>95%</sub> (mm)</b>	0,038	0,152
Repetitividade de percurso - <b>RT (mm)</b>	0,036	0,144
Repetitividade de orientação de percurso <b>RT<sub>orientação</sub> (°)</b>	0,08	0,32
Incerteza na determinação de posicionamento <b>U<sub>95%</sub> (mm)</b>	<b>0,094</b>	<b>0,38</b>
Incerteza na determinação de orientação <b>U<sub>95%</sub> (°)</b>	<b>0,2</b>	<b>0,8</b>
Força máxima na medição com deslocamento - <b>F<sub>máx</sub> (N)</b>	2,6	*****
Força máxima de medição estática - <b>F<sub>máx</sub> (N)</b>	3,9	*****
Período de aquisição para medições de velocidade recomendado - <b>T (ms)</b>	1500 ou 3000	*****
Repetitividade de encaixe do apalpador no assento de medição - <b>Re<sub>95%</sub> (mm)</b>	0,0005	*****

O tempo de montagem e preparo do sistema de medição para iniciar os ensaios não passa de dez minutos. Esta característica supera em muito a maioria dos sistemas utilizados para avaliação de desempenho de robôs industriais, que podem até demorar horas para realizar esta operação [9].

Uma característica difícil de ser encontrada em sistemas de avaliação de desempenho de robôs industriais é a combinação de um grande volume de medição (cubo de 2 m de lado) com baixa incerteza de medição (0,5 mm) [9]. Esta característica pode ser encontrada no sistema braço de medição, superando vários dos sistemas encontrados no mercado [9].

Como se espera do sistema Roboturb uma incerteza de posicionamento da ordem de 0,4 mm [4], o sistema de medição pode ser utilizado para sua avaliação de desempenho, uma vez que o braço de medição pode quantificar erros de posicionamento da interface mecânica do robô a partir de 0,38 mm.

Com isto, pode-se concluir que a metodologia proposta é satisfatória para realizar a avaliação de desempenho do sistema Roboturb tanto em ambiente de laboratório, o que é útil para realizar adaptações e melhorias, como em ambiente de trabalho (desde que respeitadas as condições impostas pelo fabricante), o que é de suma importância para a caracterização de desempenho em condições reais de operação.

### **6.1.3 Vantagens e desvantagens de utilizar a metodologia**

Diversas são as características que fazem do sistema de medição, utilizado segundo a metodologia, um sistema atraente para ser utilizado comercialmente em avaliação de desempenho de robôs. Contudo existem limitações que podem fazê-lo ineficiente em certas aplicações.

As principais vantagens de utilizar a metodologia proposta são:

- Sistema de medição totalmente portátil por uma única pessoa;
- Facilidade de montagem e preparo para o início dos ensaios;
- Rapidez e facilidade na realização dos ensaios;
- Medições absolutas (capacidade de quantificar tendência de postura);
- Sistema automático de aquisição dos dados para um microcomputador;
- Possibilidade de medições “in loco” (respeitadas as condições do fabricante);
- Interface com o usuário extremamente amigável;
- Grande volume de medição (esfera de 2700 mm);
- Extrema flexibilidade para posicionamento do apalpador de medição;
- Incerteza de medição compatível com o robô a ser avaliado;
- Não necessita de pré-calibração no local dos ensaios;
- Sistema moderno de última geração.

As principais desvantagens de utilizar a metodologia proposta são:

- Medições com contato;
- Período de aquisição pode ser muito alto dependendo da característica a ser quantificada;

- A análise dos dados deve ser efetuada por outros softwares, o que demanda tempo extra na avaliação;
- Limitação do percurso e velocidade nas medições com deslocamento;
- Não existe norma específica para calibração de braços de medição atualmente;
- Custo elevado do sistema de medição (braço de medição).

## **6.2 Recomendações para trabalhos futuros**

Esta seção dá algumas recomendações para a realização de novos trabalhos de modo a melhorar a metodologia proposta, fazendo dela uma ferramenta ainda mais competitiva na avaliação de desempenho de robôs industriais.

As principais recomendações para trabalhos futuros são:

- Avaliar o sistema de medição quando este realiza a avaliação de todas as características de desempenho descritas na norma ISO 9283;
- Desenvolver um software dedicado à avaliação de desempenho de robôs, de modo a fazer a aquisição com períodos menores do que os realizados neste trabalho, fazer as correções das medições e processar os dados automaticamente para gerar resultados ainda durante a realização da bateria ensaios;
- Verificar a possibilidade de fazer as medições sem contato através da integração de um sensor folha de luz ao braço de medição;
- Desenvolver uma metodologia específica para calibração de braços de medição;
- Realizar testes com os assentos de medição na própria ferramenta fixada ao manipulador do robô.

### **6.3 Considerações finais**

Espera-se dar, com a realização desta dissertação, uma significativa contribuição e uma nova perspectiva de utilização de braços de medição. Este sistema é ainda pouco difundido em escala nacional e esta aplicação é pouco ou nada difundida em escala global.

A característica de portabilidade do sistema de medição abre espaço para a prestação de serviço de avaliação de desempenho de robôs de diversos tipos.

A principal contribuição desta metodologia esta na proposta de utilizar um flange de medição que torna as medições extremamente rápidas e bem mais simples, se comparadas com sistema semelhante que localiza a posição de um cubo fixo à interface do robô.

Com o desenvolvimento da metodologia exposta foram alcançados os resultados esperados, uma vez que este alcança todas as posições de teste e a incerteza de medição na quantificação das características de desempenho de robôs é baixa o suficiente para a avaliação do sistema Roboturb, objetivo principal desta dissertação.

## Referências Bibliográficas

- [1] Lafratta, F. H. – “Metodologia e instrumentação para qualificação de robôs industriais – Ensaio de repetibilidade”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.
- [2] Shirinzadeh, B. – “Laser-interferometry-based tracking for dynamic measurements”, *Industrial Robot: An International Journal*, V. 25, N. 1, MCB University Press, 1998.
- [3] Sciavicco, L. , Siciliano, B. – “Modeling and control of robots manipulators”, McGraw Hill, 1996.
- [4] Gonçalves Junior, A. A. – “Sistema Automatizado para recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte”, Proposta de projeto, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [5] Kapor, C. , Kang, S. – “Actuator Performance and Reliability Test System”, Robotic Research Group, The University of Texas, Austin, 2000.
- [6] Bier, C. C.- “Implementação de um algoritmo de controle de força em um manipulador SCARA”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [7] Janocha, H. , Diewald, B. – “ICAROS: over-all-calibration of industrial robots”, *Industrial Robot: An International Journal*, V. 22, N. 3, MCB University Press, 1995.

- [8] Driels, M. R. , Pathre, U. S. – “Significance of Observation Strategy on the Design of Robots Calibration Experiments”, *Journal of Robotic Systems*, V. 7, N. 2, 1990.
- [9] Hidalgo, F. , Brunn, P. – “Robot metrology and calibration systems – a market review”, *Industrial Robot: An International Journal*, V. 25, N. 1, MCB University Press, 1998.
- [10] McMaster, R. S. – “Robot calibration – Questions and answers”, British Robot Association, disponível *on-line*: [www.rosl.com/calarti.htm](http://www.rosl.com/calarti.htm), 1999.
- [11] Young, K. , Pickin, C. G. – “Accuracy assessment of the modern industrial robot”, *Industrial Robot: An International Journal*, V. 27, N. 6, MCB University Press, 2000.
- [12] Greenway, B. – “Robot accuracy”, *Industrial Robot: An International Journal*, V. 27, N. 4, MCB University Press, 2000.
- [13] Goswami, A. , Quaid, A. , Peshkin, M. – “Complete Parameter Identification of a Robot from Partial Pose Information”, *IEEE International Conference on Robotics and automation*, 1993.
- [14] Guenther, R. , Pieri, E. R. – “Avaliação de desempenho de robôs industriais”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [15] Owens, J. – “RobotTrak: Calibration on a Shoestring”, *Industrial Robot: An International Journal*, V. 21, N. 6, MCB University Press, 1994.
- [16] VIM “Vocabulário Internacional de Metrologia” Portaria do INMETRO nº 102 de 10/07/1988.
- [17] Trevelyan, J. – “Robot Calibration”, Robotics Laboratory, disponível *on-line*: <http://telerobot.mech.uwa.edu.au/robot/calibr.htm>, 1999.
- [18] Didot, F. , Spanoudakis, P. – “Performance Assessment and Calibration Strategies for Space Robots”, *Preparing for the Future*, V.4, N.4, 1994.

- [19] Whitney, D. E. , Lozinski, C. A. , Rourke, J. M. – “Industrial Robot Forward Calibration Method and Results”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, V. 108, 1986.
- [20] Asada, H. , Slotine, J. – “Robots analysis and control”, Wiley Interscience, 1986.
- [21] ISO 9283, “Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods”, International Organization for Standardization, Switzerland, 1998.
- [22] Dagalakis, N. G. – “Industrial Robotics Standards”, National Institute of Standards and Technology, Chapter 27, USA, 1998.
- [23] ISO 9787, “Manipulating industrial robots – Coordinate systems and motions”, International Organization for Standardization, Switzerland, 1990.
- [24] ISO TR 11062, “Manipulating industrial robots – EMC test methods and performance evaluation criteria – Guidelines”, International Organization for Standardization, Switzerland, 1994.
- [25] ISO TR 13309, “Manipulating industrial robots – Informative guide on test equipment and metrology methods of operation for robot performance evaluation in accordance with ISO 9283, International Organization for Standardization, Switzerland, 1995.
- [26] Tetraprecision, Catalogo. – “Trilateration”, Tetraprecision Inc., disponível *on-line*: [www.tetraprec.com/trilatef.htm](http://www.tetraprec.com/trilatef.htm), 1999.
- [27] Chiles, V. , Jenkinson, D. – “Practical calibration of tracking laser systems”, Laser metrology and Machine performance IV, University of Huddersfield, England, 1996.

- [28] Saramago, M. A. P. – “Projeto e desenvolvimento de um Sistema de Calibração e Medida de Precisão para Robôs Industriais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1993.
- [29] McMaster, R. S. – “Calibration Plus/Workspace robot calibration features and technical specifications”, British Robot Association, disponível *on-line*: [www.rosl.com/rtkspec.htm](http://www.rosl.com/rtkspec.htm), 1999.
- [30] McMaster, R. S. – “A low cost, high performance, dynamic testing device for tracking the tool point of industrial robots”, British Robot Association, disponível *on-line*: [www.rosl.com/robotrak.htm](http://www.rosl.com/robotrak.htm), 1999.
- [31] McMaster, R. S. – “Robot and Fixture Calibration for Offline Programming”, British Robot Association, disponível *on-line*: [www.rosl.com/calarti.htm](http://www.rosl.com/calarti.htm), 1999.
- [32] API, Catalogo. – “Tracker II”, API Automated precision Inc., USA, 2001.
- [33] Mayer, J. R. R. , Parker, G. A. – “A Portable Instrument for 3D Dynamic Robot Measurements Using Triangulation and Laser Tracking”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, V. 10, N. 4, 1994.
- [34] Albada, G. D. , Lagerberg, J. M. , Visser, A. – “Eye in Hand Robot Calibration”, Industrial Robot: An International Journal, V. 21, N. 6, MCB University Press, 1994.
- [35] Lin, G. C. I. , Lu, T. F. – “Vision and force/torque sensing for calibration of industrial robots”, Industrial Robot: An International Journal, V. 24, N. 6, MCB University Press, 1997.
- [36] Pinto, T. L. F. C. , Cavaco, M. A. M. – “Avaliação do Desempenho Estático de Robôs Industriais Utilizando um Sistema Cubo - MMC Portátil”, Generalist Paper, Congresso Internacional de Metrologia, Metrologia 2000, Brasil, 2000.

- [37] Tetraprecision, Catalogo. – “Parametric Errors”, Tetraprecision Inc., disponível *on-line*: [www.tetraprec.com/parametf.htm](http://www.tetraprec.com/parametf.htm), 1999.
- [38] Krypton, Catalogo. – “Robotics Solutions”, Krypton Industrial Metrology Inc., [www.krypton.com](http://www.krypton.com), 2001.
- [39] Krypton, Catalogo. – “Mobile 3D Measurements – Rodym CMM”, Krypton Industrial Metrology Inc., [www.krypton.com](http://www.krypton.com), 2001.
- [40] Krypton, Catalogo. – “Krypton & Robotics – Application Note”, Krypton Industrial Metrology Inc., [www.krypton.com](http://www.krypton.com), 2001.
- [41] Schröer, K. – “RoboCal- The IPK Robot Calibration Package” , Industrial Robot: An International Journal, V. 21, N. 6, MCB University Press, 1994.
- [42] Nerosky, L. A. R. – “Medição de formas livres através da integração de um sensor óptico tipo “folha de luz” em um braço de medição”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [43] Fantin, A. – “Medição de Formas Livres Tridimensionais por Topogrametria”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [44] Eric Weisstein’s World of Mathematics, Disponível *on-line*: <http://mathworld.wolfram.com/>
- [45] MatLab Web Site, Disponível *on-line*: <http://www.mathworks.com/>
- [46] Kovac, I. , Frank, A. – “Testing and calibration of coordinate measuring arms”, Precision Engineering, Journal of the International Societies for precision Engineering and Nanotechnology, N. 25, 2001.
- [47] Motoman, Catalogo. – Especificações técnicas do Robô UP6, disponível *on-line*: [www.motoman.com](http://www.motoman.com), 2001.

- [48] Agostinho, O. L. , Rodrigues, A. C. S. , Lirani, J. – “Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões”, Princípios de Engenharia de Fabricação Mecânica, Editora Edgard Blucher Ltda., 1981
- [49] Certificado de calibração, “Máquina de medir longitudinal”, Certificado número 0018/01, data da calibração 23/01/2001.
- [50] Certificado de Calibração, “Máquina de medir por coordenadas”, Certificado número 1002/01, data da calibração 05/04/2001.
- [51] Certificado de Calibração, “Padrão escalonado”, Certificado número M4-283/98, data da calibração 22/07/1998.
- [52] Gonçalves Junior, A. A. – “Metrologia – Parte I”, Laboratório de Metrologia e Automatização, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [53] JR3. – Manual do sensor de força JR3, disponível *on-line*: [www.jr3.com](http://www.jr3.com).
- [54] Simon, G. – “Optotrak – Cat’s Eyes and Lasers”, Industrial Robot: An International Journal, V. 27, N. 6, MCB University Press, 1994.

## Apêndice A

### Correção do modelo cinemático

Os parâmetros Denavit-Hartenberg, que podem ser usados na cinemática direta, devem ser os mais próximos da estrutura real do robô de modo a minimizar os erros de postura, percurso e velocidade.

As técnicas de calibração têm por objetivo achar estimativas melhores dos parâmetros de Denavit-Hartenberg, a partir de uma série de medições feitas no efetuador ou na interface mecânica do robô. Portanto, estas técnicas não permitem a medição direta dos parâmetros geométricos da estrutura.

A estimativa dos parâmetros pode ser realizada da seguinte forma [3]:

Considere a equação de cinemática direta (Equação 2.5), que pode ser reescrita enfatizando a dependência das variáveis do espaço operacional dos parâmetros Denavit-Hartenberg fixos, além das variáveis de junta, da seguinte forma:

$$x = k(a, \alpha, d, \vartheta) \quad (\text{A.1})$$

Sendo  $x_m$  a média das posturas medidas em resposta à postura comandada  $x_n$ , que pode ser determinada a partir dos valores nominais dos parâmetros  $a$ ,  $\alpha$ ,  $d$  e  $\vartheta$ . Os valores nominais dos parâmetros fixos são os valores nominais do projeto estrutural do robô, e os valores nominais das variáveis de junta são as posições que os transdutores de deslocamento indicam na postura alcançada.

O desvio  $\Delta x = x_m - x_n$  dá a medida da tendência de postura, e assumindo

este desvio como sendo pequeno (em relação ao volume de trabalho do robô), é possível chegar a seguinte relação a partir da Equação A.1:

$$\Delta x = \frac{\partial k}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial k}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial k}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial k}{\partial \vartheta} \Delta \vartheta, \quad (\text{A.2})$$

onde  $\Delta a$ ,  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta d$  e  $\Delta \vartheta$  são os desvios entre os valores dos parâmetros da estrutura real e os valores da estrutura nominal.

Sendo os parâmetros agrupados no vetor:

$$\zeta = [a^T \quad \alpha^T \quad d^T \quad \vartheta^T]^T, \quad (\text{A.3})$$

e

$$\Delta \zeta = \zeta_m - \zeta_n, \quad (\text{A.4})$$

sendo as variações dos parâmetros em relação aos valores nominais, e

$$\Phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial k}{\partial a} & \frac{\partial k}{\partial \alpha} & \frac{\partial k}{\partial d} & \frac{\partial k}{\partial \vartheta} \end{bmatrix}, \quad (\text{A.5})$$

sendo a matriz de calibração cinemática calculada com os valores nominais dos parâmetros  $\zeta_n$ , então a Equação A.2 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta x = \Phi(\zeta_n) \Delta \zeta, \quad (\text{A.6})$$

É desejável computar  $\Delta \zeta$  sabendo inicialmente os valores de  $\zeta_n$ ,  $x_n$  e  $x_m$ . Sendo que a Equação A.6 é constituída de um sistema de  $m$  equações de  $4n$  variáveis, com  $m < 4n$ , um número suficiente de posturas devem ser medidas de modo a obter um sistema de no mínimo  $4n$  equações. Assim, se as medições forem realizadas em  $l$  posturas, a Equação A.6 fica da seguinte forma:

$$\Delta \bar{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \vdots \\ \Phi_l \end{bmatrix} \Delta \zeta = \bar{\Phi} \Delta \zeta, \quad (\text{A.7})$$

Para evitar uma singularidade da matriz  $\bar{\Phi}$ , é recomendável escolher  $l$  de modo que  $lm \gg 4n$ , e então resolver a Equação A.7, com a técnica dos mínimos quadrados. Neste caso, a solução é da seguinte forma:

$$\Delta \zeta = (\bar{\Phi}^T \bar{\Phi})^{-1} \bar{\Phi}^T \Delta \bar{x} \quad (\text{A.8})$$

Computando  $\bar{\Phi}$  com os valores nominais dos parâmetros  $\zeta_n$ , a primeira estimativa dos parâmetros é dada por:

$$\zeta' = \zeta_n + \Delta\zeta \quad (\text{A.9})$$

Esta é uma estimativa do parâmetro não linear  $\Delta\zeta$ , realizada até que  $\Delta\zeta$  torne-se de magnitude de um erro pré estipulado. A cada iteração, a matriz de calibração  $\bar{\Phi}$  deve ser atualizada com as estimativas de parâmetros  $\zeta'$  obtida através da Equação A.9.

Como resultado deste procedimento de calibração é obtida uma estimativa mais correta dos parâmetros geométricos reais do manipulador, assim como as possíveis correções dos transdutores de deslocamento das juntas [3].

## Apêndice B

# Equipamentos e softwares utilizados

Este apêndice apresenta os principais equipamentos e softwares utilizados no desenvolvimento desta dissertação.

### B.1 Equipamentos utilizados

- **Braço de medição**  
Fabricante: ROMER;  
Número de série: 963;  
Configuração: 631;  
Laptop que acompanha o equipamento: Armada 1700;
- **Robô industrial**  
Fabricante: Motoman;  
Modelo: UP6;
- **Sensor de força**  
Fabricante: JR3;  
Modelo: 67M25;
- **Máquina de medir por coordenadas**  
Fabricante: Carl Zeiss;  
Modelo: ZMC 550 – CAA;

Número de série: 82098;

Cabeçote apalpador: HSS

- **Maquina de medir longitudinal**

Número de série: 3274;

- **Padrão escalonado**

Fabricante: Koba;

Número de identificação: 950602;

- **Laser interferométrico**

Fabricante: Renishaw;

Modelo: ML-10;

Número de série: G35516;

- **Medidor de temperatura**

Registro interno: RC2023-1;

- **Tripé**

Fabricante: Brunson

- **Imã**

Fabricante: Metalmag

Embuxado magnético de terras raras Ø20 X 8 mm, F= 9 kgf.

## **B.2 Softwares utilizados**

- **AutoCAD: Versão 14.01.**

Fabricante: Autodesk, Inc.

- **GDS: Versão 2.0**

Fabricante G-Tech.

- **G-Pad: Versão 2.0 R79.**

Fabricante: G-Tech.

- **Matlab R12: Versão 6.0.0.88.**

Fabricante: The Math Works, Inc.

- **Microsoft Office: Versão 2000.**

Fabricante: Microsoft Corporation.

- **Microsoft Windows NT: Versão 4.0. e Microsoft Windows 98.**

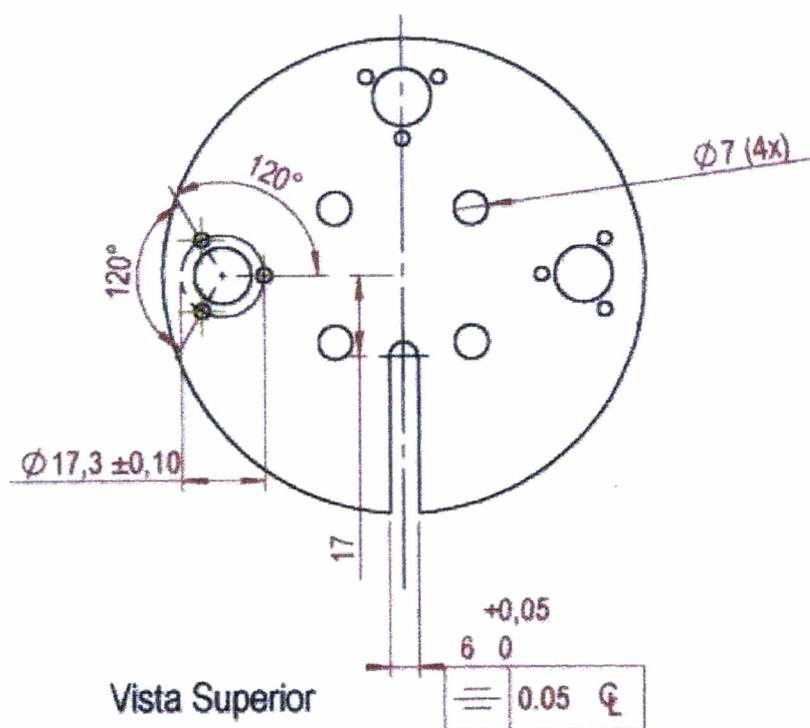
Fabricante: Microsoft Corporation

## Apêndice C

### Flange de medição

Desenho utilizado para a fabricação do flange de medição em aço carbono.

Massa do flange:  $(284,89 \pm 0,01)$  g.



Chanfros não cotados: 0,5x0,5  
 CL = Linha de Centro

