

Lucas Kenzo Kato

**CALIBRAÇÃO DE UM ROBÔ SERIAL ESPACIAL 6R  
UTILIZANDO TEORIA DE HELICOIDES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng,

Coorientador: Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kato, Lucas Kenzo  
Calibração de um robô serial espacial 6R  
utilizando Teoria de Helicoides / Lucas Kenzo Kato  
; orientador, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto,  
coorientador, Henrique Simas, 2018.  
110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Calibração de robôs. 3.  
Estimativa de parâmetros cinemáticos. 4. Teoria de  
Helicoides. 5. Erros geométricos. I. Loureiro  
Figaro da Costa Pinto, Tiago. II. Simas, Henrique.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV.  
Título.

Lucas Kenzo Kato

**CALIBRAÇÃO DE UM ROBÔ SERIAL 6R UTILIZANDO  
TEORIA DE HELICOIDES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 26 de Abril de 2018.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.  
Coorientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng. - Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Daniel Martins, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Marco Antônio Martins Cavaco, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## **AGRADECIMENTOS**

À meus pais, Luiz e Tereza, que sempre me apoiaram.

Aos Professores Tiago Pinto e Henrique Simas, pela orientação, sempre dispostos a sanar dúvidas e a cooperar com o andamento do trabalho.

Ao Professor Daniel Martins, que possibilitou a realização deste trabalho e que sempre esteve disposto a prestar todo o auxílio necessário.

Aos colegas do Laboratório de Robótica da UFSC.

À CAPES e ao Programa de Pós-graduação da engenharia mecânica da UFSC pela oportunidade e apoio indispensáveis.



*“Não são as perdas nem as quedas que podem fazer fracassar nossas vidas, senão a falta de coragem para se levantar e seguir em frente.”*

V.M. Samael Aun Weor



## RESUMO

A calibração de robôs é uma técnica fundamental para a melhoria de desempenho de posicionamento do efetuador final, garantindo exatidão necessária para a realização de determinadas tarefas. Tal técnica se fundamenta na estimativa de parâmetros cinemáticos do mecanismo através de diversas medições do efetuador final com um equipamento de medição que pode fornecer resultados de postura e/ou orientação. Na primeira etapa do trabalho, realiza-se a simulação da calibração na qual adicionam-se ao modelo cinemático erros geométricos nas juntas, nos elos e na postura final do robô para se obter posturas com erros que simulam medições reais. Com os parâmetros estimados, atualizam-se os parâmetros de forma a reduzir tais erros impostos. Na segunda parte, realiza-se o procedimento em um robô industrial serial de 6 juntas de revolução do tipo antropomórfico medindo sua postura através de uma flange de medição com três furos não colineares e coplanares de modo a determinar um sistema de referência intermediário capaz de relacionar a postura medida em relação à base do sistema robótico. Tais medições são realizadas através de uma máquina de medir por coordenadas portátil. O objetivo desta dissertação é aplicar uma metodologia de calibração para robôs de arquitetura de controle fechada através dos seguintes passos: geração de um modelo cinemático; medições e simulação de postura com erro; estimativa de parâmetros cinemáticos e correção. A avaliação de desempenho do robô é feita antes e depois da calibração final. Com isso os resultados apresentam melhorias no desempenho do robô em relação aos erros iniciais.

**Palavras-chave:** Calibração de robôs; estimativa de parâmetros cinemáticos; teoria de helicoides; erros geométricos



## ABSTRACT

The robot calibration is a fundamental technique for the end effector positioning performance enhancement, ensuring the accuracy required to perform certain tasks. This technique is based on the estimation of kinematics parameters of the mechanism through several measurements of the end effector with a measuring equipment that can provide position and/or orientation results. In the first stage of the work, the calibration simulation is performed in which the geometrical error of the joints, links and final pose of the end effector are added to the kinematic model, giving robot pose with errors that simulate real measurements. With the parameters estimated, they are updated in order to reduce such imposed errors. In the second part, the procedure is performed in a serial anthropomorphic robot with 6 revolute joints. Its posture is measured through a measuring flange with three non-colinear and coplanar holes in order to determine an intermediate reference frame. These measurements are done with a portable coordinate measuring machine. The goal of this master thesis is apply a methodology for robots with closed control architecture systems, such as: the generation of a kinematic model; the measurements or simulaton of posture with errors; the estimation of the kinematics parameters and correction. The performance evaluation of the robot is done before and after the final calibration. The final results show improvements in robot performance compared to initial errors.

**Keywords:** Robot calibration; kinematic parameters estimation; screw theory; geometric errors



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo dos avanços em calibração de robôs.....	25
Figura 2 – Fontes de erros.....	29
Figura 3 – Exemplo de juntas para definição de completude.....	31
Figura 4 – Robô ABB IRB 1600 .....	32
Figura 5 – Eixo de juntas paralelos.....	33
Figura 6 – Eixos de juntas não paralelos.....	33
Figura 7 – Rotações sucessivas de um eixo de junta.....	34
Figura 8 – Deslocamento helicoidal .....	35
Figura 9 – Sistemas de medição.....	37
Figura 10 – Alinhamento das juntas 4 e 6.....	40
Figura 11 – Alinhamento da junta 1 e centro do punho esférico .....	41
Figura 12 – Representação de exatidão e repetibilidade .....	42
Figura 13 – Plano de medição.....	43
Figura 14 – Tendência para orientação da flange .....	44
Figura 15 – Ciclos de medição .....	45
Figura 16 – Desvio de retitude.....	45
Figura 17 – Diagrama da simulação da calibração .....	47
Figura 18 – Modificação do mecanismo 3R .....	48
Figura 19 – Mecanismo 6R com juntas virtuais.....	52
Figura 20 – Influência de $W$ sobre o erro de postura .....	54
Figura 21 – Escolha do peso $W$ .....	54
Figura 22 – Erro de posição de diversas replicações .....	55
Figura 23 – Erro de orientação de diversas replicações .....	56
Figura 24 – Erro de <i>offsets</i> de juntas de diversas replicações .....	56
Figura 25 – Erro de <i>offsets</i> de elos para diversas replicações .....	57
Figura 26 – Erro de posição para diversas configurações.....	58
Figura 27 - Erro de orientação para diversas configurações .....	59
Figura 28 – Posturas do TCP para diferentes quadrantes.....	60
Figura 29 – Erro de posição para 1, 2 e 4 quadrantes .....	61
Figura 30 – Erro de orientação para 1, 2 e 4 quadrantes.....	61
Figura 31 – Flange de medição.....	68
Figura 32 – Definição do sistema de coordenadas intermediário.....	69
Figura 33 – Identificação da matriz de transformação da flange de medição ....	69
Figura 34 – Identificação da postura do robô vista pelo MMC portátil .....	70
Figura 35 – Configurações de Klimchik adaptado.....	71
Figura 36 – Comunicação Controlador - PC.....	72
Figura 37 – Interface de calibração.....	75
Figura 38 – Posições nominais e medidas do Efetuador Final.....	76
Figura 39 – Marcações para alinhamento .....	77
Figura 40 – Criação do SC do braço de medição.....	78
Figura 41 – Fluxograma do processo experimental de calibração .....	80
Figura 42 – Aquisição de pontos da flange de medição.....	81
Figura 43 – Desempenho para um ponto no volume de trabalho.....	83

Figura 44 – Avaliação de desempenho (Retitude).....	85
Figura 45 – Definição de parâmetros DH.....	107
Figura 46 – Deslocamento esférico (a) e vista normal ao plano $S_p, P_1$ e $P_2$ .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre modelos cinemáticos .....	35
Tabela 2 – Erros impostos às juntas virtuais e TCP.....	49
Tabela 3 – Configurações para calibração .....	50
Tabela 4 – Resultado antes e após a correção .....	50
Tabela 5 – Resultados da Cinemática Direta após a estimativa .....	51
Tabela 6 – Resultado da estimativa de parâmetros .....	51
Tabela 7 – Condições ideais e aplicáveis.....	62
Tabela 8 – Resultado antes e após a correção .....	63
Tabela 9 – Resultado antes e após a correção dos parâmetros de <i>offsets</i> de juntas..	64
Tabela 10 – Resultados da CD após a estimativa (6R modificado) .....	65
Tabela 11 – Resultado da estimativa de parâmetros .....	65
Tabela 12 – Pacote de recepção de dados do controlador.....	73
Tabela 13 – Tempo médio da execução da calibração.....	82
Tabela 14 – Erro de posição em <i>home position</i> em mm .....	84
Tabela 15 – Simulação com erro de distância.....	105



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo genético
CD	Cinemática direta
DH	Denavit-Hartenberg
DR	Desvio de retitude
eA	Erro aleatório
eS	Erro sistemático
IGPS	Sistema de posicionamento global <i>indoor</i>
IHM	Interface Homem Máquina
J	Jacobiano
LM	<i>Levenberg Marquardt</i>
MMC	Máquina de medir por coordenada
OE	<i>Offsets</i> de elos
OJ	<i>Offsets</i> de juntas
P'	Junta prismática virtual
POE	Produto de exponencial
R	Junta de revolução
R'	Junta de revolução virtual
RM	Resultado de medição
RMS	<i>Root mean square</i>
RP	Repetibilidade
SC	Sistema de coordenada
SCr	Sistema de coordenada de referência
SCj	Sistema de coordenada de junta
SCt	Sistema de coordenada da ferramenta
TCP	Ponto central da ferramenta
TP	Tendência de postura



## LISTA DE SÍMBOLOS

$d_i$	[mm]	Distância Euclidiana do i-ésimo ponto
$p_i$	[mm]	Pico do i-ésimo ponto
$S$		Eixo helicoidal
$S_0$	[mm]	Vetor de localização do helicóide
$t$	[mm]	Translação helicoidal
$T_{po}$	[mm]	Tendência de posição
$TO_r$	[°]	Tendência de orientação
$v_i$	[mm]	Vale do i-ésimo ponto
$W$	[mm]	Peso da função objetivo
$\alpha$	[rad]	Rotação sobre o eixo x
$\beta$	[rad]	Rotação sobre o eixo y
$\varepsilon_{x,y,z}$	[mm]	Erro em relação aos eixos x, y ou z
$\varepsilon_{Rx,Ry,Rz}$	[°]	Erro de orientação em sobre os eixos x, y ou z
$\theta$	[rad]	Rotação sobre o eixo z
$\sigma$	[°]	Desvio padrão angular
$\phi$	[rad]	Espaço de juntas
$\chi$	[mm]	Espaço de trabalho
$\omega$	[rad/s]	Velocidade angular



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1	JUSTIFICATIVAS.....	25
1.2	OBJETIVOS.....	26
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	27
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>28</b>
2.1	FONTES DE ERRO DE POSTURAS .....	29
2.2	CALIBRAÇÃO DE ROBÔS SERIAIS .....	30
<b>2.2.1</b>	<b>Modelo cinemático.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Sistemas de medição.....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Estimativa de parâmetros.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Escolha de configurações para calibração.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Configurações em singularidade .....</b>	<b>40</b>
2.3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....	41
<b>2.3.1</b>	<b>Tendência de postura .....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Retitude .....</b>	<b>45</b>
2.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	46
<b>3</b>	<b>SIMULAÇÃO DA CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>47</b>
3.1	ESTUDO DE CASO 1: MECANISMO 3R'2P'3R.....	48
3.2	ESTUDO DE CASO 2: MECANISMO 6R .....	52
<b>3.2.1</b>	<b>Efeito de replicações sobre as configurações.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Efeito do número de configurações utilizadas.....</b>	<b>58</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Efeito da variação de configurações no volume de trabalho .....</b>	<b>59</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Escolha das configurações para experimentos.....</b>	<b>62</b>
3.3	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	66
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>67</b>
4.1	SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	67
4.2	FLANGE DE MEDIÇÃO .....	68
4.3	CONFIGURAÇÕES DE MEDIÇÃO.....	71
4.4	COMUNICAÇÃO ROBÔ – PC.....	72
4.5	ATUALIZAÇÃO DOS CONTADORES DE REVOLUÇÃO	77
4.6	ALINHAMENTO DA BASE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	78
4.7	ETAPAS DAS MEDIÇÕES.....	79
4.8	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	80
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS .....</b>	<b>81</b>
5.1	RESULTADOS DAS ETAPAS .....	82
5.2	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	86
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>87</b>
6.1	SIMULAÇÃO E EXPERIMENTOS .....	87

6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	88
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
	APÊNDICE A.....	99
	APÊNDICE B.....	101
	APÊNDICE C.....	103
	APÊNDICE D.....	105
	ANEXO A.....	107
	ANEXO B.....	109

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico, a busca por processos de produção mais eficientes e a necessidade de substituir operadores humanos em ambientes hostis ou que necessitem realizar atividades repetitivas têm ampliado o campo de atuação dos mecanismos robóticos. Cada vez mais se necessita de operações com critérios de alta qualidade ISO9283 (1998), como exatidão e repetibilidade no posicionamento dos robôs, como em montagem de placas de circuito impresso, cirurgia robótica, entre outros (ZHANG et al, 2011)(RINGEL et al, 2012).

Tais critérios podem ser aperfeiçoados através do processo de calibração do modelo cinemático, cujas primeiras pesquisas publicadas neste campo iniciam-se na década de 50 com Denavit e Hartenberg (1955) e até a década de 80 diversos esforços foram feitos para contornar o problema da continuidade no modelo da cinemática direta proposta por Denavit-Hartenberg (DH) (HAYATI e MIRMIRANI, 1985)(VEITSCHEGGER e WU, 1986)(SHAMMA e WHITNEY, 1987).

A partir de então, alguns conceitos de calibração de robôs foram sendo formulados. Roth (1986) apresenta o conceito de níveis de calibração, sendo que o primeiro trata de obter a diferença entre o espaço de juntas nominal e real. O espaço de juntas são os deslocamentos de rotação e translação de juntas rotativas e prismáticas, respectivamente. O espaço de trabalho ou cartesiano são as coordenadas de posição e orientação em relação a um determinado sistema de referência. O segundo nível relaciona-se com a identificação dos parâmetros do modelo cinemático que quando são inseridos no modelo nominal, melhoram o desempenho do robô. Por fim, no terceiro, considera-se o modelo dinâmico.

Whitney (1986) define a calibração direta e inversa, na qual a primeira se baseia na estimativa da postura do efetuador final em relação no espaço de juntas do manipulador, enquanto que a segunda, na estimativa do espaço de juntas para alcançar uma postura desejada.

Everett et al. (1987) e Mooring et al. (1991) apresentam características ideais para modelos cinemáticos os quais são: completude, proporcionalidade e equivalência, descritos no Capítulo 2.

Hollerbach et al. (1993) descreve os tipos de calibração em termos de cadeia aberta e fechada, cujo o primeiro se refere a medições realizadas no TCP (*tool center point*) considerando que este não está em contato com outro objeto fixo no volume de trabalho, já o segundo

considera que se está em contato com outro objeto, formando uma cadeia fechada.

Ainda na década de 90, Borm e Menq (1991) realizam um estudo sobre a escolha das melhores configurações do robô para a calibração visando minimizar o efeito de ruídos de medição e da faixa de incerteza da estimativa de parâmetros. Para isso, utiliza-se o critério de observabilidade dos parâmetros.

Além disso, outros esforços foram feitos para contornar o problema da continuidade do modelo DH. Zhuang et al. (1992) apresenta um modelo completo e parametricamente contínuo (CPC) como alternativa para problema das juntas paralelas e Laus (1998) realiza um estudo sobre identificação de parâmetros cinemáticos comparando modificações do modelo CPC e do Denavit-Hartenberg modificado (DHM).

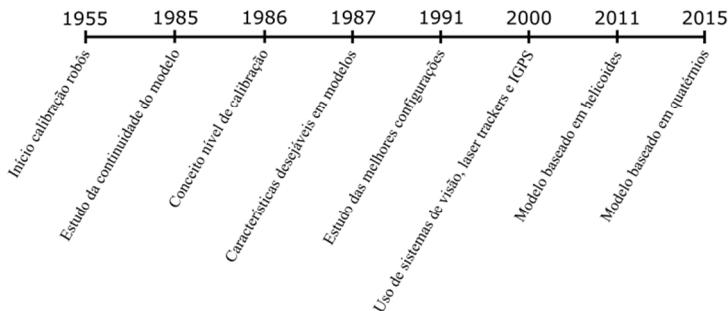
Dentre as pesquisas realizadas na década de 90, Laus realiza uma pesquisa bibliográfica e sintetiza os diversos métodos utilizados em calibração com ênfase na abordagem paramétrica, cujo princípio se baseia na estimativa de parâmetros no modelo de um robô, enquanto que a não-paramétrica não depende de um modelo com parâmetros que relacionam a alguma dimensão física, como comprimento, ângulo de rotação e etc. Por exemplo, Shamma e Whitney (1987) introduzem este conceito estimando parâmetros adimensionais de um polinômio que simulam erros do espaço de juntas.

Na abordagem paramétrica pode-se utilizar nos modelos erros geométricos e não geométricos que se relacionam com as fontes de erros de postura do robô. Além disso, nessa abordagem utiliza-se a seguinte metodologia que é utilizada neste trabalho: escolha do modelo cinemático, realização de medições para identificação de erros de postura, estimativa de parâmetros do modelo e correção.

A partir do ano de 2000 as publicações diferenciam-se principalmente na etapa da medição, utilizando equipamentos mais sofisticados como sistemas de visão, *laser trackes*, *laser scanners*, *indoor global positioning systems* (IGPS)(NEWMAN et al., 2000)(ANDREFF et al., 2001)(ALICI e SHIRINZADEH, 2003)(Ha, 2008)(LEE et al., 2009)(GAN e TANG, 2011)(NGUYEN et al., 2013)(NUBIOLA et al., 2013) e modelos cinemáticos baseados em quartênios e helicoides (FRISOLI et al., 2011)(WANG et al., 2015).

Na Figura 1 apresenta-se a linha do tempo dos principais avanços na área de calibração de robôs industriais.

Figura 1 – Linha do tempo dos avanços em calibração de robôs



Fonte: do Autor

Nas subseções seguintes são apresentadas as justificativas, os objetivos, as contribuições e a estrutura deste trabalho.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS

Atualmente os robôs industriais podem ser programados de duas maneiras: *online* e *offline*. Na primeira o operador utiliza uma interface homem-máquina (IHM), também chamada de *teach-pendant*, para mover o TCP do robô para diferentes posturas e então, utilizar funções pré-definidas para movê-lo através de trajetórias lineares ou curvilíneas.

Normalmente as tarefas que utilizam este tipo de programação não requerem trajetórias complexas (MOTTA, 2005), caso contrário, o método *offline* torna-se necessário. Nele é possível programar o robô no software do fabricante sem a necessidade o robô estar ativado. No entanto, neste tipo de programação se utiliza o modelo nominal do robô, cujos parâmetros cinemáticos não coincidem com o mecanismo real, gerando erros no posicionamento do mesmo. Assim, pode ser necessário calibrar o manipulador robótico.

Outra forma de se programar o robô é utilizando os dois métodos anteriores em conjunto, simulando trajetórias no modo *offline* e utilizando o modo *online* para corrigir eventuais erros de posicionamento ao executar o código pré-programado.

Quando existe a necessidade da calibração, ela é feita através da identificação do erro nos parâmetros cinemáticos. No entanto, devido ao sistema do robô não permitir acesso aos parâmetros do modelo

cinemático, torna-se necessário utilizar outra abordagem, a qual é apresentada neste trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de calibração de um robô industrial serial de arquitetura de controle fechada. Os objetivos específicos são compostos por:

- a) Estudo dos fundamentos envolvidos em calibração de robôs seriais;
- b) Implementação do modelo cinemático por helicoides para a identificação de parâmetros;
- c) Simulação do processo de calibração e avaliação de desempenho;
- d) Desenvolvimento de uma interface para a comunicação entre o controlador do robô e o computador;
- e) Avaliação experimental

Para isso os seguintes passos são adotados:

- Definir o nível de calibração a ser utilizado;
- Definir o modelo cinemático e erros a serem considerados;
- Simular medições da postura do robô com os erros impostos;
- Projetar uma interface para a realização do processo de calibração
- Realizar medições reais para identificar a postura do robô no espaço de trabalho;
- Corrigir o mecanismo robótico;
- Realizar a avaliação de desempenho antes e após a correção ;

- Avaliar os resultados;

Dessa maneira o trabalho contribuirá para o Laboratório de Robótica e o Laboratório de Metrologia e Automação da UFSC com um sistema de calibração para robôs seriais através da Teoria de Helicoides que é amplamente utilizada no laboratório de Robótica para análise estática e cinemática de mecanismos. O sistema IHM desenvolvido permitirá a comunicação do controlador do robô com um computador via *ethernet*, permitindo que futuras pesquisas sejam beneficiadas com essa interface de comunicação.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está dividida em 6 capítulos, três apêndices e um anexo. No Capítulo 1 é apresentada uma breve pesquisa bibliográfica sobre a evolução do processo de calibração de robôs seriais, as justificativas e objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos, iniciando com uma pesquisa sobre as principais fontes de erros de posicionamento de robôs seriais, seguindo com a metodologia de calibração, que é composta pelo modelo cinemático, medições, estimativa de parâmetros e correção.

O Capítulo 3 apresenta dois estudos de casos com simulações de calibração de um robô seria planar e espacial. Os resultados para este último servem como referência para o processo de calibração experimental.

No Capítulo 4 a validação experimental é apresentada, detalhando o sistema de medição utilizado, as configurações do robô a serem medidas, a interface de medição a ser acoplada no efetuador final, o processo de alinhamento da base do sistema de medição com a base do robô e uma interface de comunicação desenvolvida para reduzir o tempo de calibração. No Capítulo 5 são apresentados os resultados da calibração de um robô industrial e, por fim, no Capítulo 6, as conclusões finais do trabalho.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Na robótica, especialmente no campo de manipuladores, a calibração é comumente relacionada com o modelo cinemático do mecanismo (MOORING et al., 1991; SCIAVICCO; SICILIANO, 2012), cujo objetivo é determinar o erro nos parâmetros do modelo que pode ser feito através de diferentes tipos de sistemas de medição e métodos de otimização (LAUS, 1998). Posteriormente é realizada a correção no mecanismo real.

Para isso, considera-se o modelo cuja entrada é o espaço de juntas  $\phi$  e a saída, espaço de trabalho  $\chi$ . Essa é a definição de cinemática direta (CD). Com isso obtém-se uma postura do TCP que é representada pelo espaço de trabalho.

A CD pode ser descrita da seguinte forma:

$$\chi = f(\phi), \quad (2.1)$$

onde  $f$  são as funções que relacionam os dois espaços. Em termos práticos, a calibração segue a seguinte sequência (ELATTA et al, 2004):

- Definição do modelo cinemático ou equacionamento que mapeia o espaço de juntas e de trabalho;
- Determinação dos erros de postura do robô através de sistemas de medição. Esta etapa é crucial para a etapa seguinte que é relacionada com a identificação dos parâmetros do modelo;
- Estimativa ou identificação de parâmetros. Neste ponto estima-se o modelo cinemático capaz de compensar os erros identificados na etapa anterior.
- Correção. Com os parâmetros estimados aplica-se a devida correção ao modelo caso este seja acessível no sistema de controle do mecanismo real. Havendo impossibilidade, deve-se buscar outros meios que permitam tal correção, sendo que no Capítulo 4 apresenta-se uma alternativa;

Além disso, antes da definição do modelo é necessário o conhecimento das possíveis fontes de erro no mecanismo, para então,

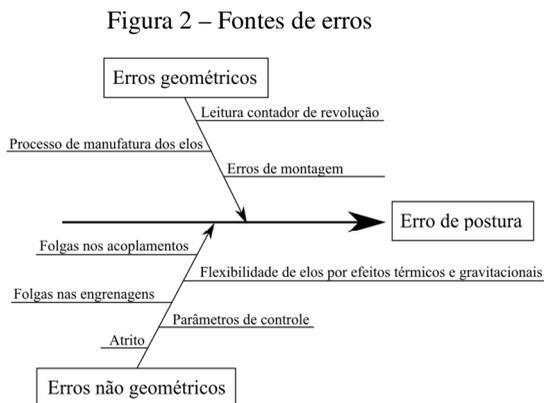
analisar quais são os seus efeitos e quais devem ser considerados no modelo. Na seção seguinte são apresentadas algumas dessas fontes.

## 2.1 FONTES DE ERRO DE POSTURAS

Em todo mecanismo há fontes de erros que afetam na configuração e posicionamento do mesmo, sendo que alguns são facilmente identificados e modelados, e outros, não. Por exemplo, algumas dessas fontes geram o que são chamados de erros geométricos, ou seja, elas podem ser modeladas através de parâmetros que representam elementos geométricos (CHEN; CHAO, 1987; VEITSCHEGGER; WU, 1988).

Através do método de DH (SCIAVICCO; SICILIANO, 2012), por exemplo, o qual utiliza quatro parâmetros para cada elo para a representação de um mecanismo com seus sistemas de coordenadas, é possível incluir em um de seus parâmetros um erro referente à variação de comprimento de um elo ocasionado pelo processo de fabricação.

Por outro lado, os erros não geométricos são ocasionados por todas as fontes de erros que afetam diretamente nos erros geométricos, como é o caso dos erros em transmissões ou *harmonic drivers*, *backlash* de engrenagens (LAUS, 1998), deformação de elos por efeitos térmicos ou forças externas (NUBIOLA, 2013), folgas em juntas, atrito, parâmetros de controle, entre outros, os quais pode ser vistos na Figura 2.



Fonte: do Autor

Dentre esses tipos de erros, os geométricos são responsáveis por 95% do erro de postura de robôs manipuladores (JUDD; KNASINSKI, 1990; MOORING; ROTH; DRIELS, 1991; CHEN et al., 2008; GINANI; MOTTA, 2011), tornando-os mais relevantes a sua identificação no processo de calibração. Com isso o mecanismo robótico serial pode ser modelado considerando os erros devido à fabricação de elos e àqueles devido a erros de montagem de juntas e leitura dos *encoders/resolvers*, que são sensores que indicam o posicionamento angular de determinado elo em relação à uma posição de referência. Essas fontes de erro geram efeitos no posicionamento do robô que não variam com o tempo. Elas são indicadas neste trabalho como *offsets* de juntas e de elos, os quais representam desvios angulares e lineares, respectivamente.

Desse modo, a representação ideal de um mecanismo é considerada como modelo nominal, a qual possui dados dimensionais de projeto, sendo diferente do mecanismo real. A diferença entre eles são os erros de cada parâmetro do modelo que podem ser identificados e corrigidos, cuja origem estão nas fontes de erros descritas previamente. Com isso, na seção seguinte, são apresentados dois possíveis modelos cinemáticos para o mapeamento do espaço de trabalho e de juntas.

## 2.2 CALIBRAÇÃO DE ROBÔS SERIAIS

A metodologia para o processo de calibração consiste na definição do modelo do robô, medição de posturas, estimativa de parâmetros e correção, sendo importante a avaliação de desempenho para a comprovação do processo de calibração.

### 2.2.1 Modelo cinemático

Alguns modelos podem ser gerados para a representação cinemática de um robô serial. Na sequência, serão abordados as principais vantagens e desvantagens do modelo por Denavit-Hartenberg (DH) e Helicoides Sucessivos para mecanismos de cadeia aberta, considerando critérios propostos por Everett e Hsu (1988), Mooring et al. (1991) e Schröer et al. (1997) para a geração de modelos cinemáticos. Tais critérios são:

- **Completude:** Um modelo completo é aquele que possui a capacidade de relacionar o espaço de trabalho em relação ao espaço de juntas para qualquer manipulador, em outras palavras, o modelo deve possuir parâmetros suficientes para expressar

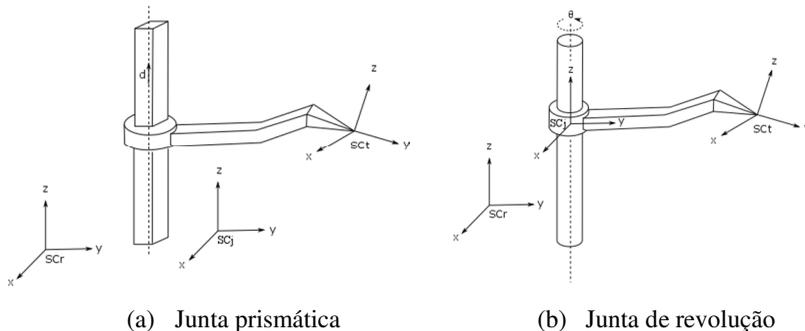
qualquer mudança no modelo nominal. Mooring define a Eq. (2.2) que determina o número máximo de parâmetros que podem ser identificados:

$$n = 4r + 2p + 6, \quad (2.2)$$

onde  $r$  é o número de juntas de revolução,  $p$  é o número de juntas prismáticas e 6, o número de restrições que definem a postura do TCP (3 translações e 3 rotações). Essa equação também representa o máximo posto do Jacobiano.

A formulação dessa equação baseia-se no número de equações de restrições de movimentos que definem a posição e orientação do TCP. Para isso, considera-se dois mecanismos com apenas uma junta cada um deles, uma de revolução e outra, prismática, conforme a Figura 3, e partindo do princípio de que o eixo  $z$  de cada junta ( $SC_j$ ) possui direção constante em relação ao sistema de coordenadas de referência  $SC_r$ , para a junta prismática, são necessárias duas restrições relativas às rotações em torno dos eixos  $x$  e  $y$ . Para a junta de revolução são necessárias mais duas restrições para que o sistema de coordenada da junta ( $SC_j$ ) esteja sobre seu eixo de rotação. Dessa maneira são definidos os números de parâmetros suficientes para que se mapeie o espaço de juntas e de trabalho com relação aos tipos de juntas do mecanismo.

Figura 3 – Exemplo de juntas para definição de completude



Fonte: Mooring (1991)

- Continuidade: “Pequenas mudanças na estrutura geométrica do robô devem corresponder a pequenas mudanças nos parâmetros cinemáticos” (HE et al., 2010).

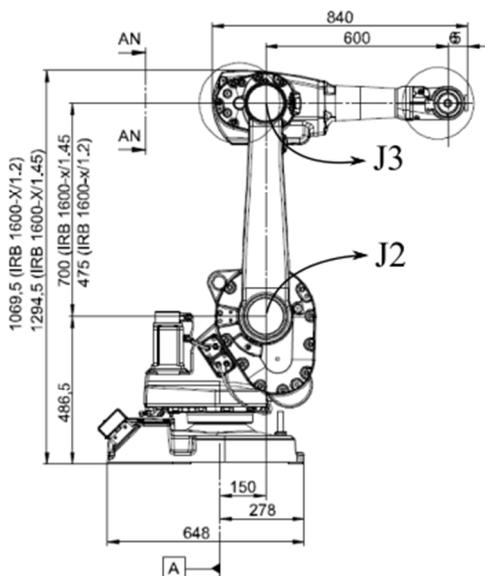
- Equivalência: Trata-se da capacidade de transformar parâmetros de um modelo em parâmetros de outro modelo, portanto, dois modelos completos são equivalentes.

### 2.2.1.1 Parâmetros Denavit-Hartenberg

No método de geração de cadeias cinemáticas por DH, o modelo é construído com o número de parâmetros que garante a completude. Considerando um robô serial espacial de 6 juntas de revolução, o número de parâmetros segundo a Eq.(2.2) é de 30. Para cada elo quatro parâmetros são necessários para se definir um sistema de coordenada (SC) (Anexo A). No entanto, esse modelo entra em desacordo em relação ao critério de continuidade (SCHRÖER et al, 1997).

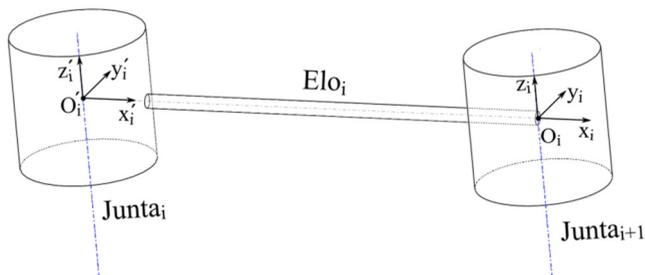
Por exemplo, o robô da Figura 4, em seu modelo nominal, considera que as juntas (J2) e (J3) possuem eixos paralelos como na Figura 5. Nesta situação, na notação DH, estabelece que o sistema de coordenadas auxiliar do Elo<sub>i</sub> ( $O_i'$ ) encontra-se no centro da Junta<sub>i</sub>.

Figura 4 – Robô ABB IRB 1600



Fonte: Adaptado de (ABB, 2010)

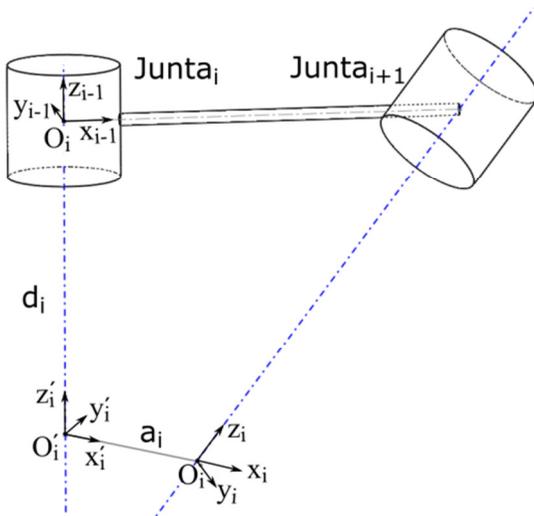
Figura 5 – Eixo de juntas paralelos



Fonte: do Autor

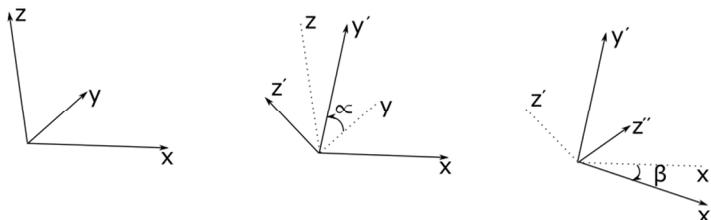
No entanto, devido a erros de montagem, por exemplo, os eixos dessas juntas podem estar desalinhados, como é mostrado na Figura 6. Neste caso, considera-se que a junta sofreu rotações sucessivas sobre os eixos  $x$  e  $y$ , por exemplo, como na Figura 7, ocasionando em drásticas mudanças nos parâmetros cinemáticos, como em  $d_i$ , cujo valor aumenta a medida que os eixos se aproximam do paralelismo. Na situação ideal, por convenção, escolhe-se  $d_i$  como nulo, já que a origem do SC  $O'_i$  encontra-se no centro da junta  $i$ .

Figura 6 – Eixos de juntas não paralelos



Fonte: do Autor

Figura 7 – Rotações sucessivas de um eixo de junta



Fonte: do Autor

Para contornar esse problema, algumas propostas foram feitas acrescentando um parâmetro de rotação no modelo cinemático por DH em juntas sucessivas com eixos paralelos, ficando conhecido como Denavit-Hartenberg modificado ou DHM (HAYATI; MIRMIRANI, 1985) (VEITSCHEGGER; WU, 1988) (KAMALI et al., 2016).

Tanto DH como DHM geram modelos com 30 parâmetros Eq. (2.2), respeitando o critério de completude.

Dessa maneira, apesar do modelo DH ser mais conhecido e utilizado para formulação de modelos cinemáticos de robôs, na perspectiva de calibração, certas fontes de erros podem ocasionar em erros não observáveis, ou seja, caso o modelo não possua um parâmetro que represente uma rotação em torno de  $y'$  ( $\beta$ ) (Figura 7), tal efeito não pode ser identificado no equacionamento da cinemática do manipulador.

### 2.2.1.2 Parâmetros Helicoidais

O modelo cinemático por helicoides é uma alternativa para o problema da descontinuidade. Um helicóide é uma entidade matemática introduzida por Mozzi (1763) e que foi amplamente desenvolvida por Hunt (2003), no qual é possível representar o modelo cinemático ou estático de um mecanismo (CAMPOS, 2004).

Na Figura 8, é descrito o deslocamento angular  $\theta$  de um ponto ( $P_1$ ) em relação ao eixo de giro ( $\vec{s}$ ), chamado de eixo helicoidal. Após esta rotação, já com a notação ( $p_2^r$ ), aplica-se uma translação de valor  $t$  na direção de ( $\vec{s}$ ), tornando-se ( $P_2$ ).

A descrição do eixo helicoidal é definida por dois vetores, um que indica a direção ( $\vec{s}$ ) e outro, um vetor ( $\vec{s}_0$ ) definido por qualquer ponto em seu eixo em relação a um sistema de coordenada de referência



Enquanto na primeira linha desta tabela apresenta-se o número de parâmetros necessários para a descrição entre dois sistemas de coordenadas sucessivos, na segunda, são descritos os números de parâmetros totais de um mecanismo de 6 juntas de revolução. Portanto, de acordo com o critério de completude, apenas o DH apresenta parâmetros independentes em sua totalidade para tal mecanismo, diferente do método por helicoides e quatérnios duais. O uso de parâmetros dependentes implica em baixa exatidão na etapa da estimativa de parâmetros, visto que os erros de cada um deles não podem ser identificados separadamente (ZHUANG et al, 1992).

Após a definição do modelo, seleciona-se o sistema de medição para a aquisição de dados que é necessário para a calibração do robô.

### 2.2.2 Sistemas de medição

Entre os diversos tipos de sistemas de medição encontrados no mercado e no estado da arte, é possível classificá-los em àqueles que necessitam ou não de contato do sistema com a superfície que se deseja mensurar. O APÊNDICE A apresenta os principais sistemas utilizados em calibração de robôs seriais. Dentre as pesquisas citadas, 43% utilizam sistemas com contato, como é o caso das máquinas de medir por coordenadas (MMC) em configuração cartesiana ou antropomórfica.

As MMCs cartesianas, Figura 9(a), possuem repetibilidade na ordem de décimos de micrometros (ZEISS, 2016), nas configurações antropomórficas, Figura 9(b), cerca de décimos de milímetros (FARO, 2017) e em *laser trackers* (FARO, 2013), Figura 9(c), com exatidão de décimos de milímetros, a repetibilidade não é apresentada no catálogo.

Apesar das MMCs cartesianas apresentarem melhores características de desempenho, as medições abrangem um volume de trabalho de robôs industriais muito reduzido além da necessidade de transportar o robô até o sistema de medição, viável apenas para robôs cujo volume de trabalho é inferior ao do MMC. Por outro lado, as MMCs portáteis com configurações antropomórficas são capazes de obter medições em volumes de trabalho maiores do robô do que as MMCs cartesianas, mas com performance inferior.

Figura 9 – Sistemas de medição



Fontes: (FARO, 2013)(ZEISS, 2016)(FARO, 2017)

Os *laser trackers* possuem performance semelhante aos MMCs portáteis quando se utilizam para medições de até 10m de distância entre o sistema de medição e o alvo, além de poder medir a interface de um manipulador robótico em praticamente todo seu volume de trabalho.

Na sequência, é descrita uma parte fundamental da calibração que é a identificação dos erros de cada parâmetro, apresentando a função a ser minimizada e o método de otimização utilizado.

### 2.2.3 Estimativa de parâmetros

A etapa de estimativa de parâmetros é um caso mais abrangente da cinemática inversa, visto que neste caso, busca-se mapear o espaço de juntas  $\phi$  dado o espaço de trabalho  $\chi$  de um robô. Em se tratando de calibração, pode-se necessitar não só  $\phi$ , mas também a estimativa de todos os parâmetros cinemáticos do modelo. Esse processo é também chamado de calibração inversa (LAUS, 1998).

A estimativa parte do conceito de cinemática diferencial (FONTAN, 2007), cujo mapeamento de  $\chi$  dado  $\phi$  é realizado em velocidades instantâneas. No entanto, deseja-se encontrar os desvios de cada parâmetro em termos de deslocamentos, por isso, utiliza-se a integração numérica para esta finalidade com uma constante de controle para minimizar o erro de desvio (*drift*) ocasionado pela integração numérica (FONTAN, 2007).

O que diferencia a cinemática inversa da calibração inversa é a formulação da matriz Jacobiana  $J$ . Na primeira, as velocidades instantâneas de  $\chi$ , ou linhas de  $J$ , são derivadas em termos do espaço de juntas  $\phi$ , conforme a Eq. (2.3).

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta \phi_1} & \frac{\delta f_1}{\delta \phi_2} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta \phi_n} \\ \frac{\delta f_2}{\delta \phi_1} & \frac{\delta f_2}{\delta \phi_2} & \dots & \frac{\delta f_2}{\delta \phi_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta \phi_1} & \frac{\delta f_m}{\delta \phi_2} & \dots & \frac{\delta f_m}{\delta \phi_n} \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

onde,  $m$  são os números de equações e  $n$ , o de juntas.

Na segunda, são em termos de seus parâmetros cinemáticos, por exemplo, no modelo por DH convencional, seu Jacobiano de calibração tem a dimensão de  $m \times 4$ , cujas colunas são as derivadas parciais da função  $f$  em relação a cada parâmetro ( $a$ ,  $\alpha$ ,  $d$ ,  $\theta$ ).

De forma semelhante é possível identificar cada parâmetro do modelo por helicoides (Apêndice B), sendo que seu  $J$  de calibração terá a dimensão de  $m \times 6$  e é composto pelos Jacobianos de cada configuração. Dessa forma, os parâmetros são identificados de modo a reduzir o erro de postura.

Também é possível utilizar métodos não lineares de otimização, como o método de *Levenberg-Marquardt* (LM) ou algoritmos genéticos, como a Evolução Diferencial (WEIHMANN, 2011). Tais métodos são aplicados em funções que permitem a identificação de seus parâmetros de forma a maximizar ou minimizá-la.

Para a calibração de um robô serial, é possível utilizar uma função objetivo que descreva os erros de posição e/ou orientação de seu efetuador final. Esses erros se referem aos dados fornecidos pelo controlador do sistema robótico e da manipulação de dados fornecidos por um sistema de medição. Dessa forma, a seguinte função objetivo é utilizada para a estimativa de parâmetros:

$$\text{Minimizar } \frac{1}{W^2} \sum_{i=1}^m (\epsilon_{xi}^2 + \epsilon_{yi}^2 + \epsilon_{zi}^2) + \sum_{i=1}^m (\epsilon_{Rxi}^2 + \epsilon_{Ryi}^2 + \epsilon_{Rzi}^2), \quad (2.4)$$

$$\text{Sujeito a } \left\{ \begin{array}{l} \theta_{1\min} < \theta_1 < \theta_{1\max} \\ \vdots \\ \theta_{6\min} < \theta_6 < \theta_{6\max} \end{array} \right. ,$$

onde  $(\epsilon_{xi}^2, \epsilon_{yi}^2, \epsilon_{zi}^2)$  são os erro quadráticos da  $i$ -ésima medição em relação à posição do efetuador final,  $(\epsilon_{Rxi}^2, \epsilon_{Ryi}^2, \epsilon_{Rzi}^2)$  são os erros de orientação e  $W$  é o peso atribuído ao erro de posição ajustar a divergência de grandezas em relação ao erro de orientação. Esse peso é definido de acordo com os resultados de simulações do Capítulo 3, avaliando-se o efeito de seus valores no valor final da função objetivo.

Para estes dois métodos de otimização são utilizadas restrições para *offsets* de juntas no intervalo de  $[-5^\circ, 5^\circ]$  e de elos,  $(0, 1\text{mm})$ . O método LM é a combinação de outros dois (LAUS, 1998): gradiente descendente e Gauss-Newton. Seu princípio é baseado na variação de um parâmetro, no qual quando não ocorre a aproximação desejada, sua variação é aumentada (gradiente descendente), caso contrário, é reduzida. O LM não garante a convergência para um mínimo global, exceto quando se tem conhecimento de sua localização aproximada.

O método da Evolução Diferencial (ED) possui três principais variáveis de controle: tamanho da população, fator de escala e fator de recombinação, cujos valores para o início dos testes são sugeridos por diversos autores, conforme Weihmann. Este método tem a vantagem de ser simples em sua aplicação, porém, seus resultados levam maior tempo de convergência em relação ao LM.

#### 2.2.4 Escolha de configurações para calibração

Durante a etapa de medições, é necessário considerar a quantidade de medições e as configurações do robô para a aquisição de dados. O primeiro é fundamental para que o sistema de equações seja determinado, ou seja, no mínimo o número de parâmetros deve ser igual ao número de equações. Por exemplo, para uma medição que considera a postura completa do TCP (posição e orientação), tem-se 6 equações em uma única medição, reduzindo o número de configurações necessárias em relação a uma medição que somente considera a postura do TCP. Outra questão importante no que concerne ao número de medições é a quantidade de aquisições para uma mesma configuração, o

que permite a separação de componentes aleatórias e sistemáticas da postura do TCP.

O segundo, que é a respeito das configurações do robô a serem escolhidas, é fundamental para exatidão da estimativa dos parâmetros. Klimchik (2015) propõe uma regra para determinar as melhores configurações para mecanismos seriais planares e espaciais de tipo antropomórfico, cujos resultados são utilizados neste trabalho no Capítulo 3.

### 2.2.5 Configurações em singularidade

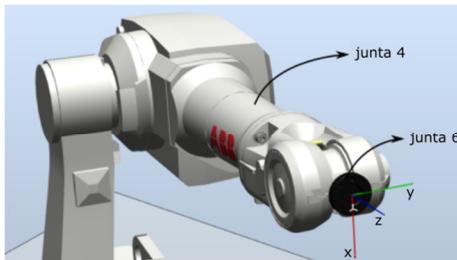
Na estimativa de parâmetros ou cinemática inversa, o cálculo é realizado baseado na matriz jacobiana. Em certas configurações, ditas singulares, o posto desta matriz é reduzido, ocasionando na redução da mobilidade do mecanismo (MARTINS, 2002). Nessa condição, pequenas movimentações no espaço de trabalho geram grandes magnitudes de variação do espaço de juntas, podendo prejudicar em determinadas tarefas em execução com o robô, como por exemplo, seguir uma trajetória em velocidade constante.

Em síntese, existem três tipos de configurações singulares (ADEPT, 2007):

- Singularidade de punho

Este caso ocorre quando os eixos das juntas 4 e 6 se alinham como é visto na Figura 10. Ao se aproximar desta configuração, ambas as juntas tendem a rotacionar instantaneamente em  $180^\circ$ .

Figura 10 – Alinhamento das juntas 4 e 6



Fonte: do Autor

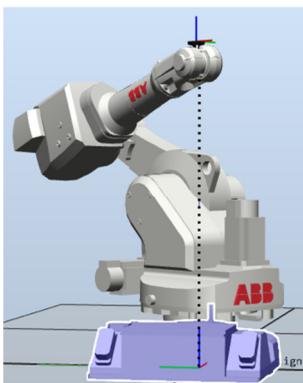
- Singularidade de cotovelo

Quando o robô se encontra com o braço totalmente estendido.

- Singularidade de ombro

De forma semelhante, a junta 1 tende a rotacionar  $180^\circ$  em alta velocidade quando o centro do punho esférico do robô se aproxima do alinhamento daquela junta, como é observado na Figura 11.

Figura 11 – Alinhamento da junta 1 e centro do punho esférico

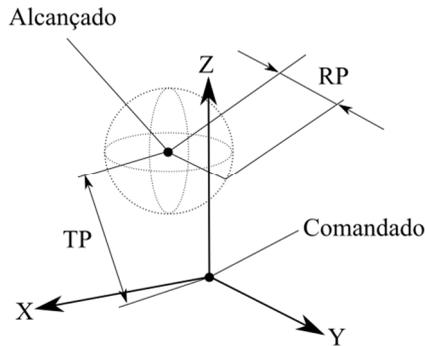


Fonte: do Autor

### 2.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção é descrita a metodologia para a verificação dos resultados da correção da calibração de robôs industriais, baseados na norma ISO 9283. A avaliação de desempenho na execução de tarefas de um robô manipulador pode ser medida através de sua tendência e repetibilidade (HAYATI, 1985) representados na Figura 12.

Figura 12 – Representação de exatidão e repetibilidade



Fonte: Adaptado de (ISO 9283)

A exatidão é um termo qualitativo que se refere ao erro de postura de seu efetuator final, quantitativamente utiliza-se a tendência de postura (TP) que é alcançada no espaço de trabalho em relação à postura comandada (A). Já a repetibilidade se refere à capacidade do robô em retornar a uma posição anterior previamente alcançada (RP). Comumente a repetibilidade é apresentada pelo fabricante e está na ordem de 0,05 a 0,15 mm para robôs com alcance do efetuator de 1 a 2m e suportam cargas de 2 a 10kg (ABB, 2010)(YASKAWA, 2012)(KUKA, 2015).

A tendência não é informada pelo fabricante e estão acima de 1mm para estes modelos de robôs, podendo ser verificadas através de estudos que avaliam esse índice de desempenho (RADKHAH et al., 2009)(CHEN et al., 2012)(NUBIOLA et al., 2013).

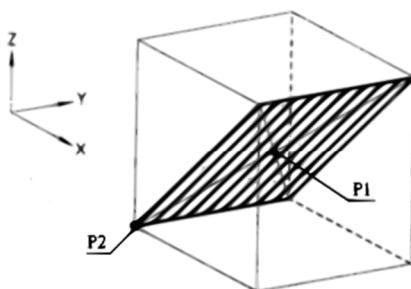
Como neste trabalho são considerados os erros que influenciam diretamente na exatidão, apenas esta é considerada. A avaliação deste critério pode ser dividida em tendência de postura, de distância, de percurso e variação multidirecional na tendência de postura. Dentre elas apenas a tendência de postura e a retitude são consideradas. Esta última não é descrita na norma ISO12780-1 (2007) e é considerada visto que permite a avaliação de diversos pontos no volume de trabalho.

### 2.3.1 Tendência de postura

Neste critério de desempenho, considera-se a postura da flange do efetuator final informada pelo controlador e sistema de medição. A norma recomenda que as medições devam ser realizadas em pontos

pertencentes a um plano inclinado no volume de trabalho do robô. Cada aquisição de dados de uma determinada postura deve ser feita considerando sempre uma mesma trajetória e sentido ao ponto alvo. Na Figura 13 apresenta-se um exemplo de plano de medição, onde o ponto P2 é o alvo no qual o TCP será medido, e P1, o ponto de retorno do robô para garantir a mesma trajetória de chegada P2.

Figura 13 – Plano de medição



Fonte: Adaptado de (ISO 9283)

Para a tendência de posição  $T_{po}$ , considera-se a distância euclidiana da média das  $n$  aquisições e da posição fornecida pelo controlador, conforme a Eq. (2.5).

$$T_{po} = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2}, \quad (2.5)$$

sendo  $(x_c, y_c, z_c)$  o ponto comandado e  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ , a média dos pontos medidos.

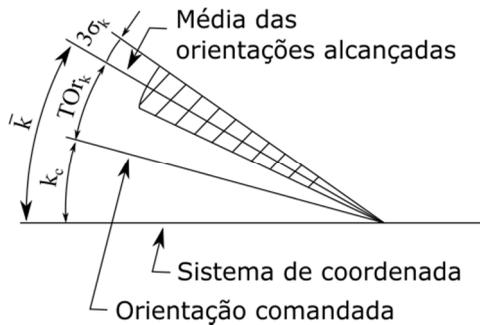
A repetibilidade é calculada considerando a distância euclidiana dos  $n$  pontos medidos em relação ao baricentro das medições. Já a tendência de orientação  $TOr$  é calculada para cada ângulo de Euler da flange ou rotações em torno dos eixos das coordenadas, como mostra a Figura 14.

$$d_i = \sqrt{(\bar{x} - x_i)^2 + (\bar{y} - y_i)^2 + (\bar{z} - z_i)^2}, \quad (2.6)$$

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n di, \quad (2.7)$$

$$RP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}{n-1}}. \quad (2.8)$$

Figura 14 – Tendência para orientação da flange



Fonte: Adaptado de (ISO 9283)

Os índices (i, j, k) representam as orientações em torno dos eixos (x, y, z) respectivamente.

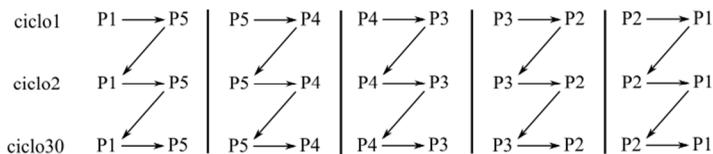
$$TOR_k = (\bar{k} - k_c), \quad (2.9)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^n (\bar{k} - k_a)^2}{n-1}}. \quad (2.10)$$

A tendência e desvio padrão para a rotação sobre o eixo z são dadas pelas Eqs. (2.9) e (2.10).

Por fim, a norma sugere que sejam mensurados cinco pontos do plano da Figura 13 com 30 ciclos de medições. Sendo que na Figura 15 é apresentado um exemplo de ciclo que pode ser adotado.

Figura 15 – Ciclos de medição



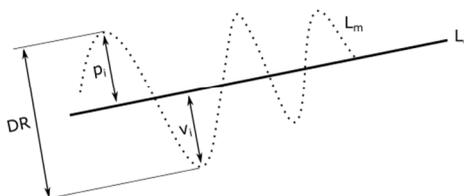
Fonte: ISO 9283

### 2.3.2 Retitude

O critério de retitude é definido pela norma (ISO12780-1, 2007) sendo interessante aplicá-lo para avaliar o desempenho do robô para parte de seu volume de trabalho. Sua vantagem em relação ao critério anterior é a possibilidade de avaliar o efeito do erro de postura de um conjunto de pontos em uma trajetória retilínea do TCP, além da desnecessidade de alinhar a base do SC do robô e do sistema de medição.

O desvio de retitude (DR) é calculado utilizando o método de mínimos quadrados para um conjunto de pontos medidos  $L_m$ , como na Figura 16. A linha  $L_e$  é a estimada, sendo assim, para cada um destes pontos medidos calcula-se a menor distância em relação à  $L_e$ . Então, soma-se o maior desvio positivo com o maior desvio negativo em termos absolutos. Caso a análise seja feita no plano, soma-se o pico ( $p_i$ ) e o vale ( $v_i$ ) de  $L_m$  em relação à  $L_e$ .

Figura 16 – Desvio de retitude



Fonte: do Autor

## 2.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentaram-se as principais fontes de erros que influem no posicionamento do robô, levando em consideração àquelas que possuem maior peso sobre o erro de postura, que no caso são os geométricos. Dentre eles podem ser citadas as variações no comprimento dos elos e as variações angulares das juntas.

Na sequência, foram abordadas duas metodologias para modelos cinemáticos, a DH e Helicoides Sucessivos. A primeira não cumpre com o critério de continuidade quando existem juntas consecutivas com eixos paralelos, sendo inviável no processo de calibração. Já a segunda, não possui tal problema, mas o modelo possui mais parâmetros que o anterior. Estimando-se todos os parâmetros helicoidais, é possível identificar de forma completa todos os desvios de cada junta do mecanismo.

Em seguida, foram apresentados os principais sistemas de medição atualmente utilizados nos processos de calibração de robôs. Com os dados obtidos de tais sistemas, realiza-se a estimativa de parâmetros que é semelhante à cinemática inversa. Com os parâmetros identificados, é possível corrigir o robô alterando seus parâmetros originais com os estimados, quando possível.

Por fim, foi apresentado alguns critérios para a avaliação de desempenho segundo a norma ISO 9283 e no capítulo seguinte são realizadas simulações da calibração para dois casos de mecanismos robóticos, um planar e outro espacial.

### 3 SIMULAÇÃO DA CALIBRAÇÃO

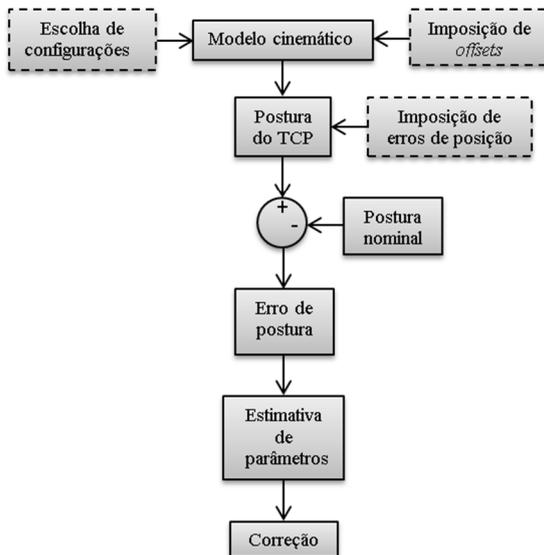
Antes de realizar experimentos, é interessante analisar ensaios virtuais a fim de se estimar a melhora na tendência que o mecanismo terá após a calibração.

Para isso, seguem-se os seguintes passos conforme o capítulo 2:

- Formulação do modelo cinemático;
- Realização de medições;
- Estimativa de parâmetros;
- Correção;

No entanto, ao invés dos dados oriundos de medições reais, consideram-se variáveis de erros de juntas e elos ou *offsets* impostos ao modelo, os quais são compostos por erros sistemáticos e aleatórios. O diagrama da Figura 17 sintetiza o procedimento da simulação.

Figura 17 – Diagrama da simulação da calibração



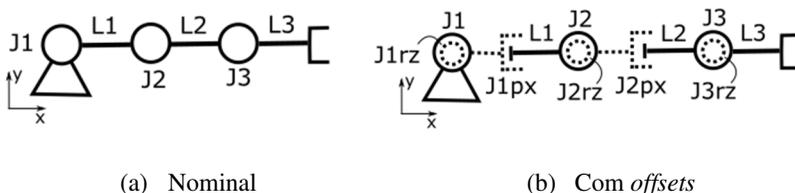
Fonte: do Autor

Assim, o *offset* de elo (OE) é definido segundo a norma ISO 2768-1 (2001) para os próximos dois casos de estudo. Já o *offset* de junta (OJ) é definido de forma distinta para os dois casos.

### 3.1 ESTUDO DE CASO 1: MECANISMO 3R'2P'3R

Nesta análise, o mecanismo 3R planar (Figura 18a) é considerado com OE para os dois primeiros elos e OJ para todas as juntas conforme a Figura 18b. Na notação 3R'2P'3R, as letras indicam o tipo de junta, R para rotativas e P para prismáticas. A aspa indica que se trata de um *offset* ou junta virtual. A notação do mecanismo 3R modificado indica que existem 3 juntas virtuais de revolução, 2 juntas virtuais prismáticas e 3 juntas de revolução nominais.

Figura 18 – Modificação do mecanismo 3R



Fonte: do Autor

Além disso, a seguinte notação é utilizada na Figura 18b: L e J, acrescidos de numeração simbolizam os elos e juntas nominais; os demais são as representações dos *offsets* ou juntas virtuais, sendo *p* e *r* a denotação para OE e OJ. O último índice representa a direção do *offset* na configuração inicial adotada ou *home position*. Por exemplo, J1px representa o OE ou junta virtual prismática do elo 1 na direção *x*, e J2rz, OJ cujo eixo de rotação se encontra na direção *z*.

Realizando um comparativo com a modelagem por DH, neste modelo existem quatro parâmetros para o caso espacial (*a*, *d*,  $\alpha$ ,  $\theta$ ) e apenas dois no planar (*a*,  $\theta$ ) que representam o deslocamento do sistema de coordenada de cada elo em relação à direção *x* e rotação sobre o eixo *z*, respectivamente. No mecanismo proposto modificado utiliza-se a variação sobre estes dois parâmetros e desconsideram-se desvios do elo na direção *y*, por simplificação.

Os elos são escolhidos com comprimento de 600mm, visto que esse é o valor próximo dos elos do robô ABB1600 utilizado nos experimentos (Figura 4). A respeito do OE, segundo a norma ISO2768-

1, a tolerância fina para esta grandeza é de  $\pm 0,3\text{mm}$ , sendo este o valor definido para OE. Para OJ, seus valores são escolhidos de forma arbitrária com  $1^\circ$ ,  $3^\circ$  e  $2^\circ$  para as juntas de número 1, 2 e 3, respectivamente.

Nas simulações foram consideradas apenas erros aleatórios para as juntas, que representam os efeitos das folgas nas engrenagens. Na postura final do TCP também foram impostos tais erros apenas para a posição, representando as incertezas do sistema de medição fornecidos pelo Certificado de Calibração (2016) de uma MMC portátil. As variações aleatórias dos elos foram desconsideradas visto que nos experimentos a serem realizados não se utilizariam cargas no efetuador final.

Tabela 2 – Erros impostos às juntas virtuais e TCP

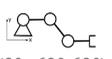
	<i>Offsets de juntas [°]</i>			<i>Offsets de elos [mm]</i>		<b>Posição TCP [mm]</b>
	<b>J1rz</b>	<b>J2rz</b>	<b>J3rz</b>	<b>J1px</b>	<b>J2px</b>	
<b>Erro sistemático</b>	1	3	2	0,3		--
<b>Erro aleatório</b>	0,05			--		0,013

Fonte: do Autor

A Tabela 2 apresenta dos dados utilizados na simulação, indicando os erros sistemáticos (eS) e aleatórios (eA) considerados. O eA para OJ foi escolhido com magnitude máxima de 100 vezes menor que o erro sistemático com distribuição uniforme, semelhante à repetibilidade de manipuladores industriais (ABB, 2010).

As configurações escolhidas para a simulação foram àquelas sugeridas por Klimchik (2015) para robôs seriais 3R no plano e mais outras duas para verificar sua vantagem sobre as demais, conforme a Tabela 3. Estas configurações (C1 e C2) foram escolhidas de modo arbitrário, variando-se a primeira junta no intervalo de  $[-45^\circ, 90^\circ]$ , a segunda  $[-120^\circ, 135^\circ]$  e a terceira  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , evitando configurações em singularidade.

Tabela 3 – Configurações para calibração

<b>Klimchik</b>	 (0°, -60°, 60°)	 (0°, -120°, -60°)	 (0°, 120°, -120°)	 (0°, 60°, 120°)
<b>C1</b>	 (-90°, 90°, -90°)	 (-90°, 90°, 90°)	 (-45°, 90°, -45°)	 (45°, -90°, -90°)
<b>C2</b>	 (-60°, 30°, -60°)	 (0°, 60°, 30°)	 (-45°, 45°, 45°)	 (-45°, -135°, 45°)

Fonte: adaptado de (Klimchik, 2015)

Estas configurações foram replicadas duas vezes, gerando 8 posturas com erros, sendo estes utilizados para se identificar os parâmetros, com isso os seguintes resultados foram obtidos (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultado antes e após a correção

		Erro de posição [mm]			Erro de orientação [°]
		$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$T_{PO}$	$\epsilon_{rz}$
<b>Klimchik</b>	<b>Antes</b>	69,238	63,253	93,780	6,061
	<b>Depois</b>	0,193	0,339	0,390	0,025
		0,232	0,383	0,448	0,034
		0,327	0,315	0,454	0,029

Fonte: do Autor

Tais erros foram calculados com a média dos valores absolutos de erro de posição e orientação para as quatro configurações ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_{rz}$ ). Para a verificação de quais configurações obtiveram melhores resultados na estimativa dos *offsets*, utilizaram-se os resíduos de OE e OJ em uma nova simulação com todas as três configurações utilizadas na estimativa, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da Cinemática Direta após a estimativa

	Erro de posição [mm]			Erro de orientação [°]
	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$T_{PO}$	$TOr_k$
<b>Klimchik</b>	0,298	0,255	0,392	0,052
<b>C1</b>	0,381	0,384	0,541	0,058
<b>C2</b>	0,461	0,437	0,635	0,067

Fonte: do Autor

Dentre as configurações usadas no processo de estimativa, a de Klimchik apresenta melhores resultados após a correção do modelo cinemático para todos os parâmetros de postura ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_{rz}$ ).

Tabela 6 – Resultado da estimativa de parâmetros

	Imposto	Estimado	Resíduo
<b>J1rz</b>	1°	1,019°	-0,019°
<b>J1px</b>	0,3 mm	0,269 mm	0,031 mm
<b>J2rz</b>	3°	2,997°	0,003°
<b>J2px</b>	0,3 mm	0,330 mm	-0,030 mm
<b>J3rz</b>	2°	2,030°	-0,030°

Fonte: do Autor

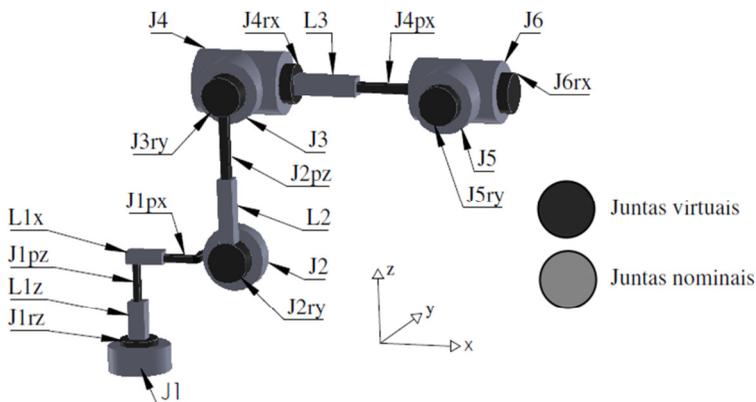
Na Tabela 6 contém os *offsets* impostos, estimados e seus resíduos para a configuração que teve melhor resultado. A existência de tais resíduos é causada pelo tipo de método usado na otimização, a qual não garante o alcance de um mínimo global mesmo conhecendo os erros dos parâmetros que foram impostos. Porém, é possível melhorar os resultados com o aumento do número de configurações do mecanismo. Além disso os resultados alcançados são semelhantes à erros após a calibração de robôs industriais (Nubiola, 2013).

Na próxima seção é apresentada a análise para um mecanismo espacial 6R com seus *offsets* levando em consideração algumas condições a serem aplicadas nos experimentos.

### 3.2 ESTUDO DE CASO 2: MECANISMO 6R

Nesta análise o mecanismo 6R espacial com a configuração antropomórfica é estudado, cujo modelo é baseado no robô industrial ABB1600 conforme a Figura 5. De forma semelhante ao estudo de caso 1, as juntas virtuais são adicionadas aos elos e juntas simulando os *offsets* referentes ao erro na leitura do encoder/resolver e de fabricação dos elos. A representação do mecanismo com tais juntas é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Mecanismo 6R com juntas virtuais



Fonte: do Autor

As dimensões de cada elo (L1z, L1x, L2 e L3) foram adotadas segundo os dados do fabricante do robô a ser calibrado (Figura 5). Os tipos de juntas (nominal ou virtual) são identificadas com variações de tons de cinza, conforme a legenda.

Para a simulação da calibração deste mecanismo, um conjunto de *offsets* de juntas foram escolhidos para a verificação de convergência da estimativa de parâmetros, cujos valores são baseados em pesquisas de calibração com modelos de robôs semelhantes (GAO, 2014). Os *offsets*

de elos e os erros aleatórios para OJ são mantidos com os mesmos valores do estudo de caso 1. Na sequência são descritas as configurações do robô adotadas para as simulações das medições do TCP.

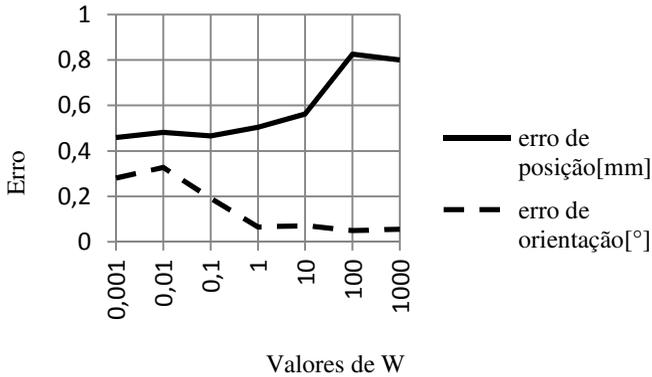
Um dos problemas envolvidos na aquisição da postura do TCP é o espaço de trabalho mensurável pelo sistema de medição. Enquanto que os sistemas ópticos (*laser trackers*, *laser scanners*, sistemas de visão) possuem em menor grau esse fator limitante, os equipamentos por contato como as MMC o possuem, tornando a escolha das configurações do robô um fator crucial para a boa estimativa de parâmetros do modelo.

Klimchik sugere 4 configurações e 10 replicações sobre cada uma delas, que minimizam os efeitos dos ruídos de medição para robôs seriais. Seus experimentos são feitos para o robô KUKA KR-270, cuja estrutura cinemática é semelhante ao ABB1600.

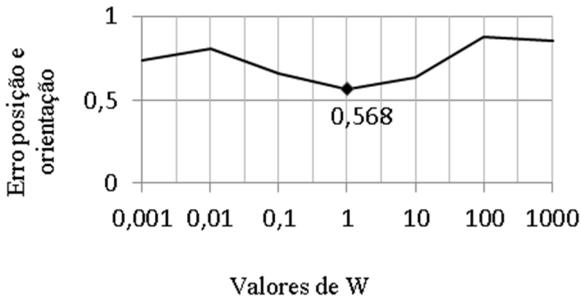
No entanto, considerando a utilização de MMCs para estes modelos de robôs, estas configurações não podem ser medidas devido à limitação do volume de trabalho do sistema de medição. Por isso, tais configurações são adaptadas de forma a ser possível mensurar a postura do TCP considerando uma MMC portátil.

Com relação ao processo de estimativa de parâmetros, a função objetivo utilizada, vide Eq. (2.4), considera um peso  $W$  [mm] a fim de tornar o resultado adimensional. Além disso, há a necessidade de analisar qual valor torna o processo mais eficiente, reduzindo tanto o erro de posição quanto o de orientação.

Observa-se na Figura 20 que ambos os erros têm comportamento inverso em relação ao outro, ou seja, menores valores de  $W$  indicam maior peso sobre o erro de posição na função objetivo. O que resulta em uma melhor correção para este tipo de erro, caso contrário, o erro de orientação é reduzido em maior proporção. Logicamente, o valor de  $W$  ideal seria aquele que distribui o peso de forma equivalente para ambos os erros, como é visto na Figura 21.

Figura 20 – Influência de  $W$  sobre o erro de postura

Fonte: do Autor

Figura 21 – Escolha do peso  $W$ 

Fonte: do Autor

Com isso, verifica-se que a melhor estimativa de parâmetros que resultam em menor erro é para  $W=1$ , ou seja, tanto a posição como a orientação tem efeitos quantitativos equivalentes nesta estimativa.

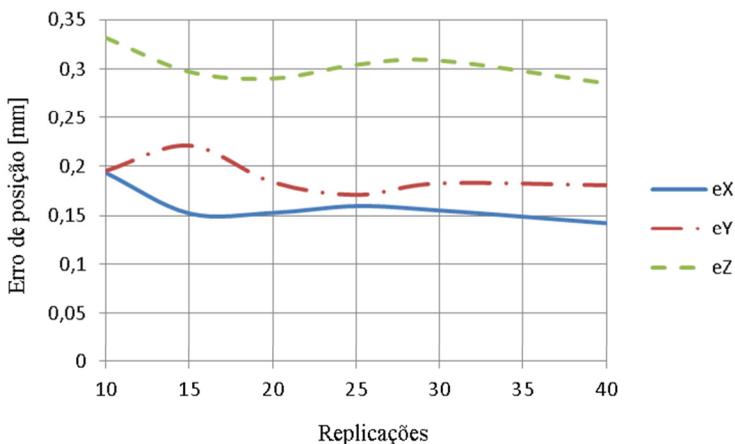
Outras análises necessárias a serem feitas são os efeitos das replicações sobre cada configuração, o aumento do número de configurações sem replicações e a melhoria no desempenho com medições em diferentes quadrantes do volume de trabalho do robô.

### 3.2.1 Efeito de replicações sobre as configurações

Nesta análise consideram-se as configurações de Klimchik e replicações sobre cada uma delas. Em termos práticos, essas replicações são equivalentes às medições realizadas repetidas vezes sobre as configurações, permitindo a separação de componentes aleatórias e sistemáticas dos erros de postura.

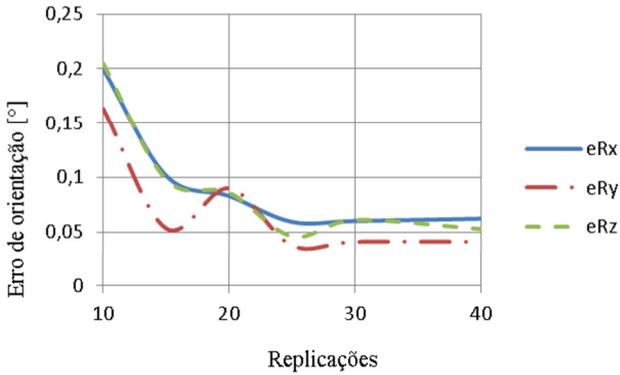
A Figura 22 e Figura 23 apresentam os erros de postura do efetuator final após a correção dos parâmetros, os quais são o resultado da média dos erros absolutos de 5 amostras de cada conjunto de replicações. Por exemplo, 10 replicações sobre as 4 configurações de klimchik geram 40 configurações e essas 40 são repetidas 5 vezes para obter a média dos valores de erros finais.

Figura 22 – Erro de posição de diversas replicações



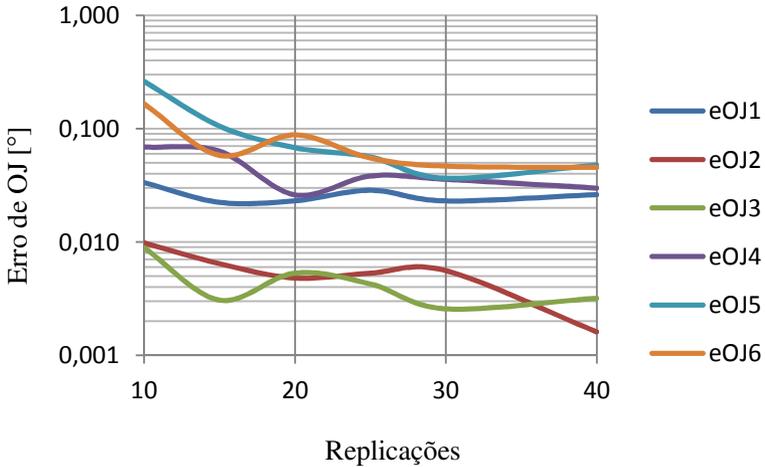
Fonte: do Autor

Figura 23 – Erro de orientação de diversas replicações



Fonte: do Autor

Destes resultados, os erros de posição tendem a estabilidade a partir de 25 replicações, enquanto que os de orientação, a partir de 30. Já os erros de *offsets* da estimativa de parâmetros em relação aos impostos na simulação são apresentados na Figura 24 e Figura 25.

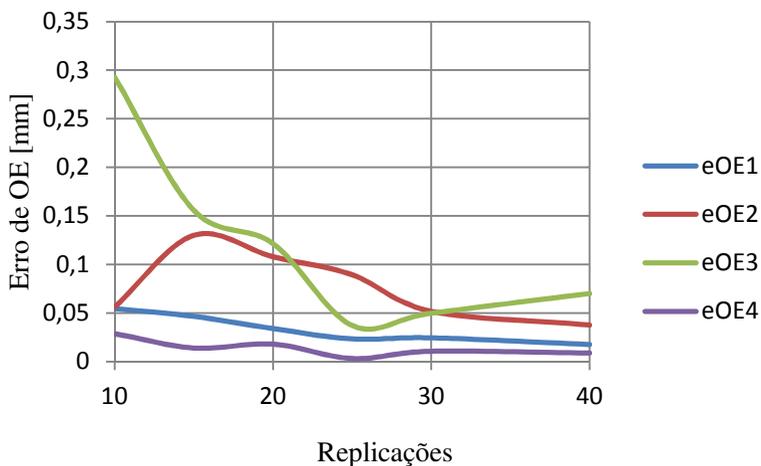
Figura 24 – Erro de *offsets* de juntas de diversas replicações

Fonte: do Autor

As notações dos *offsets* de juntas e elos são equivalentes às juntas virtuais da Figura 19. Em ambos, verifica-se um comportamento oscilatório devido ao processo de otimização, cuja função objetivo depende do processo da CD com erros aleatórios impostos para juntas, ou seja, cada replicação para uma dada configuração será distinta, resultando em diferentes resultados de parâmetros encontrados, e além disso, existe o problema do método de otimização no alcance do mínimo global, também verificado no mecanismo 3R.

Neste resultado, apesar de se identificar a redução do erro de todos os OJs, somente o erro de orientação é reduzido em magnitude maior que a de posição, com erros iniciais de 0,1 a 0,2° e finais de 0,04 a 0,06°. No entanto, nesta análise considera-se a influência dos *offsets* de elos também.

Figura 25 – Erro de *offsets* de elos para diversas replicações



Fonte: do Autor

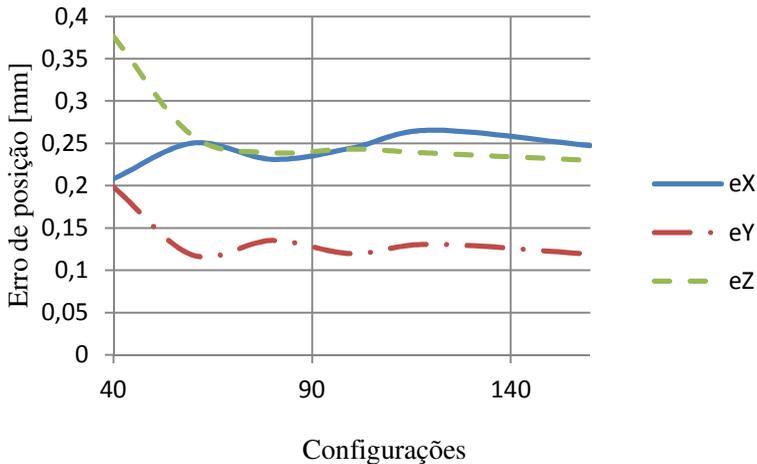
Neste resultado, os OEs que apresentaram maiores reduções de erro foram OE3 e OE4, também chamados de J2pz e J4px, respectivamente conforme a Figura 19. Os demais não apresentam consideráveis reduções devido à forma que foram modelados, ou seja, OE1 ou J1pz rotaciona sobre o eixo de J1 e não possui nenhum tipo de variação de orientação sobre os eixos  $x$  e  $y$ . O OE2 ou J1px sofre variações no posicionamento do elo no plano  $xy$  oriundos apenas da rotação de J1.

### 3.2.2 Efeito do número de configurações utilizadas

Neste caso, ao invés de utilizar replicações, varia-se o número de configurações. Para cada configuração sugerida por Klimchik, varia-se de forma aleatória com distribuição uniforme em um ângulo máximo de  $60^\circ$ , cada ângulo de junta, evitando posturas que geram singularidades. Com isso o processo de calibração foi simulado com 40 a 160 configurações.

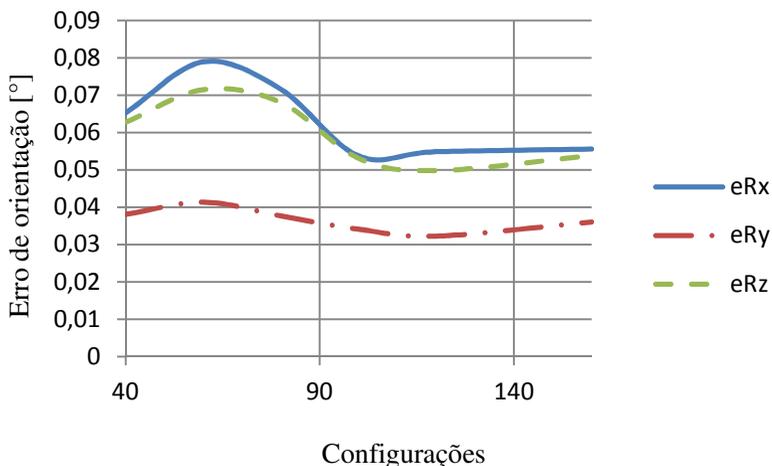
Os gráficos da Figura 26 e Figura 27 apresentam resultados semelhantes para os erros de posição e orientação em relação à análise anterior. Com apenas 40 configurações, obtém-se resultados interessantes para os erros de posição, cujo maior valor está na ordem de 0,37mm para o eixo z, e para orientação,  $0,2^\circ$  para o mesmo eixo. Nubiola (2013) realiza um processo de calibração no mesmo robô ABB, mas com 1000 configurações e chega a um erro de distância euclidiana para posição de 0,3mm, aproximadamente.

Figura 26 – Erro de posição para diversas configurações



Fonte: do Autor

Figura 27 - Erro de orientação para diversas configurações



Fonte: do Autor

Para ambas as análises, com variação de replicação (

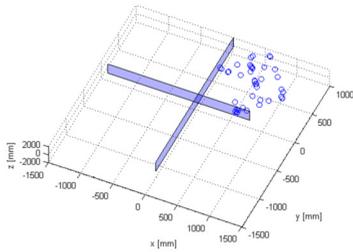
Figura 22 e Figura 23) ou aumento de configurações (Figura 26 e Figura 27), os resultados finais para o erro de postura são semelhantes, na ordem de décimos de milímetros para o erro de posição e centésimos de graus para orientação. No entanto, para aquisição de 160 configurações, o processo torna-se lento dependendo do sistema de medição utilizado, sendo inviável para um ambiente industrial, no qual exige rapidez no processo. Estima-se 30 minutos para a medição de 40 configurações do robô com um MMC portátil.

Outro ponto a ser considerado são as regiões do volume de trabalho do robô. Separando-as em quatro regiões, elas serão chamadas de quadrantes. As configurações utilizadas, abrangem todos os quadrantes do volume de trabalho do robô. Porém, no processo experimental, não serão utilizados todos os quadrantes, sendo necessário verificar qual o impacto da calibração considerando este critério.

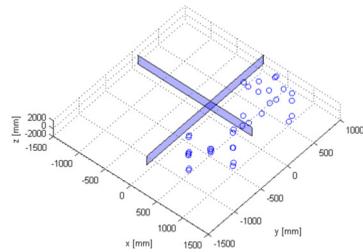
### 3.2.3 Efeito da variação de configurações no volume de trabalho

Os conjuntos de configurações (espaços de juntas) utilizados nos quadrantes do volume de trabalho do robô são apresentados na Figura 28. Em cada uma destas situações são consideradas 40 configurações.

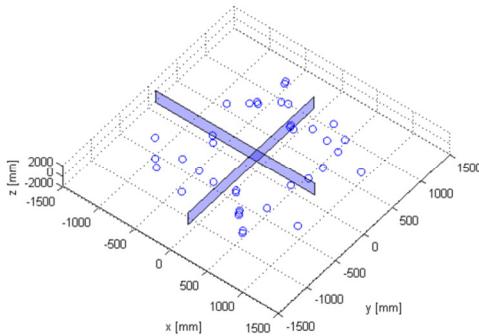
Figura 28 – Posturas do TCP para diferentes quadrantes



(a) 1 quadrante



(b) 2 quadrantes

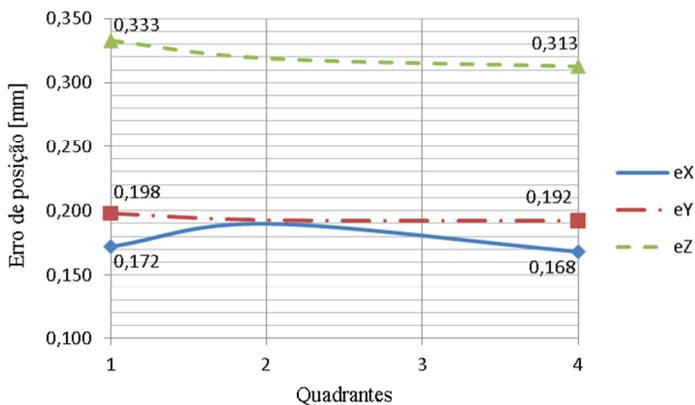


(c) 4 quadrantes

Fonte: do Autor

As divisórias apresentadas na Figura 28(a,b,c) dividem o volume de trabalho em quatro regiões. A configuração inicial utilizada foi uma região cúbica de  $600 \times 600 \times 600$  mm dentro do volume de trabalho do robô (Figura 28a), a partir dela foram feitas variações de  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$  apenas na junta 1 de cada configuração, resultando nas subfiguras (b e c) de modo a contemplar 2 e 4 quadrantes. As figuras 26 e 27 apresentam os erros de postura para diferentes quadrantes.

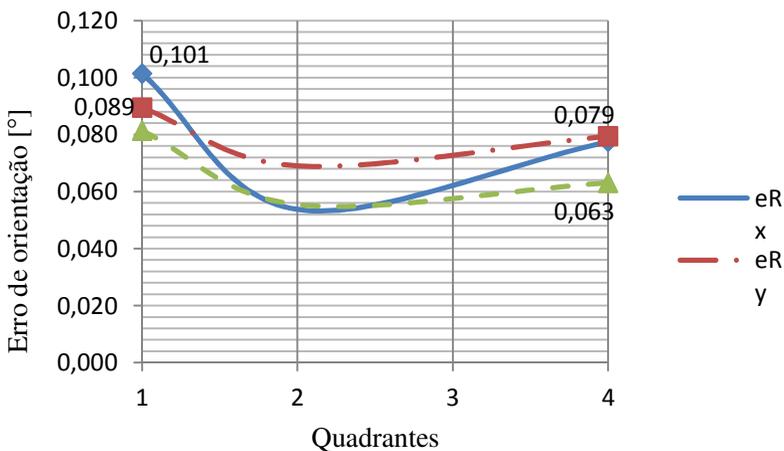
Figura 29 – Erro de posição para 1, 2 e 4 quadrantes



Fonte: do Autor

Nestes resultados, verifica-se que para os 3 casos a variação do erro de posição é maior apenas para o eixo z, enquanto que para orientação, o erro para todos os eixos são menores para 2 e 4 quadrantes. Os dados com 3 quadrantes são oriundos da interpolação do gráfico.

Figura 30 – Erro de orientação para 1, 2 e 4 quadrantes



Fonte: do Autor

Com base nessas simulações são escolhidas as configurações a serem utilizadas no experimento levando em consideração a quantidade de medições, replicações e volume de trabalho.

### 3.2.4 Escolha das configurações para experimentos

Comparando-se os resultados da análise para diversas replicações e configurações, o erro de posição é semelhante, na ordem de décimos de milímetros. Porém para o erro de orientação, a análise que considera somente a variação de configuração apresenta erros na ordem de centésimos de graus em relação à análise com diferentes replicações para os valores inferiores das abscissas dos gráficos. Esses valores são considerados devido à limitação em termos de velocidade de execução do processo experimental.

Na análise dos quadrantes, apesar dos resultados apresentarem melhores resultados para 2 e 4 quadrantes, utiliza-se apenas 1, devido às características do sistema de medição utilizado, que é apresentado no próximo capítulo.

Com isso, define-se quais configurações seriam utilizadas para os experimentos, considerando um quadrante e sem replicações. Nela consideram-se àquelas propostas por Klimchik com modificações de modo a permitir o alcance do sistema de medição à flange de medição do robô, sendo que no total são utilizadas 40 configurações para a realização das medições.

Um comparativo entre as condições ideais e aplicáveis ao experimento são apresentadas na Tabela 7, no qual são comparados os três critérios apresentados e o total de medições a serem feitas, cujo valor é o produto das replicações e configurações.

Tabela 7 – Condições ideais e aplicáveis

<b>Condição</b>	<b>Replicações</b>	<b>Configurações</b>	<b>Quadrantes</b>	<b>Total de medições</b>
<b>Ideal</b>	25	60	2	1500
<b>Aplicável</b>	1	40	1	40

Fonte: do Autor

As condições ideais requerem 1500 medições, sendo inviável devido ao tempo necessário para a aquisição de dados utilizando o sistema de medição do experimento.

Para verificar a eficácia das configurações de Klimchik modificadas, foram utilizadas outras duas que formam regiões cúbicas no volume de trabalho do robô.

Com essas configurações e os erros impostos para as juntas, elos e sistema de medição, faz-se a estimativa de parâmetros para os *offsets* e, então, corrige-se o modelo cinemático, o qual gera os seguintes resultados para a CD para cada uma das configurações, segundo a Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado antes e após a correção

		$T_{Po}$ [mm]	Erro de orientação [°]		
			$TOr_i$	$TOr_j$	$TOr_k$
	<b>Antes</b>	54,051	5,682	4,108	6,418
<b>Klimchik Adaptado</b>	<b>Depois</b>	0,472	0,051	0,035	0,048
<b>C1</b>		0,461	0,057	0,035	0,055
<b>C2</b>		0,391	0,048	0,032	0,048

Fonte: do Autor

Neste resultado apresenta-se a melhora no posicionamento do efetuador final corrigindo todos os *offsets*, sendo que antes da correção, o modelo apresenta tendência de posição na ordem de 5mm e após, 0,47mm para a maior tendência entre as três configurações utilizadas. A tendência de orientação para cada eixo apresentam melhora significativa com redução na ordem de centésimos de graus.

No entanto, considerando que nos experimentos serão realizadas as correções apenas de OJ, os seguintes resultados são apresentados sob esta condição, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado antes e após a correção dos parâmetros de *offsets* de juntas

		$T_{PO}[\text{mm}]$	Erro de orientação [°]		
			$TO_{r_i}$	$TO_{r_j}$	$TO_{r_k}$
	<b>Antes</b>	54,051	5,682	4,108	6,418
<b>Klimchik Adaptado</b>	<b>Depois</b>	0,878	0,045	0,032	0,040
<b>C1</b>		0,750	0,091	0,053	0,091
<b>C2</b>		0,773	0,122	0,053	0,074

Fonte: do Autor

Nestes caso verifica-se que OEs têm pequena influência sobre os erros de orientação, no qual o pior caso ( $TO_{r_i}$  de C2) apresenta aumento de 2,54 vezes em relação à análise anterior e para a tendência de posição de Klimchik apresenta aumento de 1,86 vezes. Estes resultados são as referências na qual o resultado experimental deveria alcançar.

Para verificar a qualidade da estimativa dos parâmetros, foi considerado o efeito da correção para o conjunto de todas as configurações (Klimchik adaptado, C1 e C2), cujos resultados são apresentados na Tabela 10. Sendo que nesta análise foi considerado dois métodos de otimização, o LM e o ED.

Dentre elas, a menor tendência de posição foi de 0,752mm para os parâmetros estimados segundo Klimchik modificado com o método LM. Semelhantemente, o método da Evolução diferencial é aplicado sob as mesmas condições e apresentam resultados similares, porém, inferiores ao LM. Além disso o método ED converge para um mínimo local em aproximadamente 10 minutos, enquanto que LM, em menos de 1 min.

Tabela 10 – Resultados da CD após a estimativa (6R modificado)

		$T_{PO}[\text{mm}]$	Erro de orientação [°]			
			$TOR_i$	$TOR_j$	$TOR_k$	Norma
<b>LM</b>	<b>Klimchik Adaptado</b>	0,752	0,079	0,042	0,072	0,115
	<b>C1</b>	0,876	0,101	0,058	0,100	0,154
	<b>C2</b>	0,771	0,009	0,066	0,09	0,112
<b>ED</b>	<b>Klimchik Adaptado</b>	0,797	0,097	0,058	0,089	0,144
	<b>C1</b>	0,963	0,083	0,049	0,068	0,118
	<b>C2</b>	0,853	0,059	0,055	0,070	0,107

Fonte: do Autor

Por fim, a Tabela 11 apresenta os resultados dos parâmetros identificados pelo método LM e ED, tanto para OE quanto para OJ segundo as configurações de Klimchik modificado. Para os OJs foram obtidos resíduos na ordem de centésimos de graus, dentro da expectativa de Klimchik.

Tabela 11 – Resultado da estimativa de parâmetros

	<b>Imposto</b>	<b>Estimado LM</b>	<b>Estimado ED</b>	<b>Resíduo LM</b>	<b>Resíduo ED</b>
<b>J1rz</b>	2°	2,023	2,028	0,028	0,028
<b>J1pz</b>	0,3 mm	0,117	0,259	0,161	0,041
<b>J1px</b>	0,3 mm	0,059	0,392	0,184	0,092
<b>J2ry</b>	1,1°	1,088	1,107	0,006	0,007
<b>J2pz</b>	0,3 mm	0,505	0,446	0,102	0,146
<b>J3rz</b>	3,1°	3,099	3,103	0,001	0,009
<b>J4rx</b>	-2°	-1,937	-2,024	0,063	0,024
<b>J4px</b>	0,3 mm	0,465	0,127	0,097	0,173
<b>J5ry</b>	3,7°	3,758	3,718	0,086	0,016
<b>J6rx</b>	-4,6°	-4,603	-4,546	0,013	0,055

Fonte: do Autor

### 3.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, dois estudos de caso foram apresentados, considerando simulações em um mecanismo serial planar e espacial. O primeiro, com a correção de todos os *offsets*, proporciona erro máximo de postura na ordem de 0,461mm para posição e 0,067 graus para orientação.

No segundo, foram feitas diversas simulações que auxiliaram nas escolhas das configurações a serem utilizadas nos experimentos, considerando o uso de replicações, número de configurações e volume de trabalho do robô. Chegando à conclusão de que 40 configurações sem replicações abrangendo apenas um quadrante do volume de trabalho seriam suficientes para alcançar erros de posição menores que 1mm e orientação, menores que  $0,1^\circ$ .

Foi avaliado dois métodos de otimização baseados em *Levenberg-Marquardt* e Evolução Diferencial, sendo que o primeiro apresenta melhores resultados em menor tempo de execução.

## 4 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

No presente capítulo as etapas para a calibração do robô são apresentadas, considerando o sistema de comunicação entre o computador e o controlador, a flange de medição e as configurações escolhidas para medição.

### 4.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição utilizado foi um braço de medição disponibilizado pela Fundação Certi/Labmetro. Os principais motivos para a sua utilização são:

- Facilidade de locomoção e manuseio;
- Sistema de aquisição e processamento fornecidos pelo fabricante;
- Certificado de calibração fornecido pela Fundação Certi;
- Incerteza compatível com magnitude dos erros de posicionamento do robô, cujos valores estão na faixa de 1 a 20mm;

Suas especificações são apresentadas a seguir:

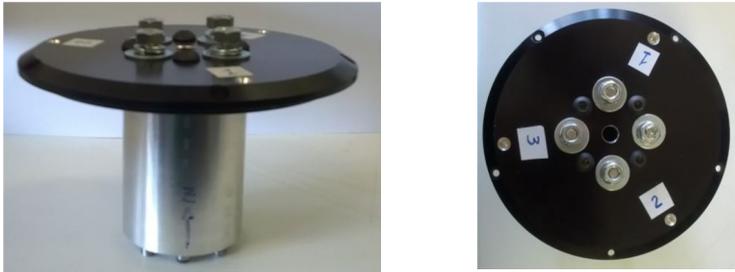
- Fabricante: Faro Technologies do Brasil LTDA;
- Modelo: Platinum;
- Número de série: P08-05-11-08720;
- Raio de medição: 1200mm;
- Incerteza de medição em um único ponto:  $\pm 0,013$ mm;
- Graus de liberdade: 6;
- Sensor: Apalpador de diâmetro de 6mm;
- Software: CAM10;

Na Figura 9 (b) – MMC Portátil, Pag. 37 é apresentado este sistema de medição. Nas subseções seguintes são detalhados os procedimentos para a aquisição de dados.

## 4.2 FLANGE DE MEDIÇÃO

De modo a obter tanto a posição quanto a orientação do TCP, uma flange de medição com três furos de centro foi utilizada. A definição do sistema de coordenadas intermediário (SCI) localizado no furo 1, conforme a Figura 31 e Figura 32 é calculado segundo o método Gram-Schmidt ou ortogonalização de vetores, também utilizado por PINTO (2001).

Figura 31 – Flange de medição



(a) Vista lateral

(b) Vista superior

Fonte: do Autor

As medições devem ser realizadas seguindo a sequência da numeração indicada na Figura 31 (b) para garantir que o sistema de coordenadas seja criado com a orientação estabelecida nas equações seguintes:

$$\vec{x} = \vec{V}_1 = P_3 - P_1, \quad (4.1)$$

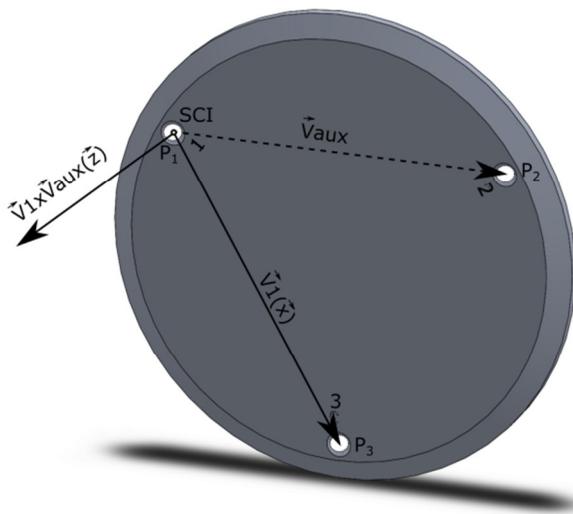
$$\vec{V}_{aux} = P_2 - P_1, \quad (4.2)$$

$$\vec{z} = \vec{V}_1 \times \vec{V}_{aux}, \quad (4.3)$$

$$\vec{y} = \vec{z} \times \vec{x}, \quad (4.4)$$

nos quais, os furos 1, 2 e 3 são representados por  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ .

Figura 32 – Definição do sistema de coordenadas intermediário



Fonte: do Autor

Para se definir a matriz de transformação da base da flange de medição ao SCI (Figura 33), utilizou-se o braço de medição em uma aquisição de dados em bancada.

Figura 33 – Identificação da matriz de transformação da flange de medição



Fonte: do Autor

Esta matriz de transformação homogênea é definida por  $T_{tcp}^{ef}$ , onde  $ef$  é o efetivador final do robô, cuja matriz de rotação é obtida através dos vetores unitários do SCI e a posição é definida pelo ponto P1 da flange de medição.

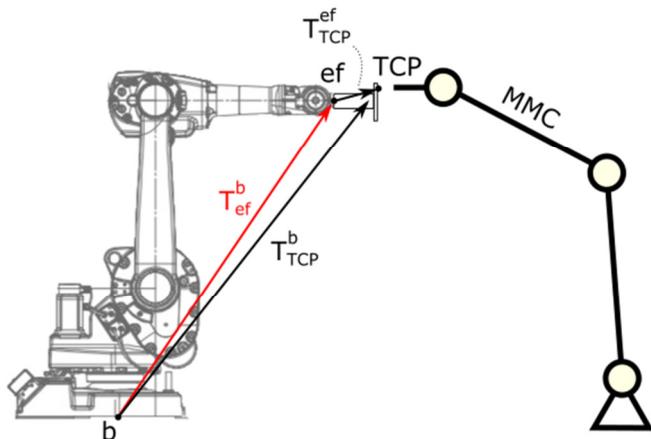
Porém, como o cálculo para a estimativa dos parâmetros devem considerar a postura do efetivador final, deve-se realizar o seguinte cálculo para a obtenção deste de forma indireta, que pode ser visualizada na Figura 34.

$$T_{tcp}^b = T_{ef}^b T_{tcp}^{ef}, \quad (4.5)$$

$$T_{ef}^b = T_{tcp}^b (T_{tcp}^{ef})^{-1}, \quad (4.6)$$

onde  $b$  é a base do robô.

Figura 34 – Identificação da postura do robô vista pelo MMC portátil



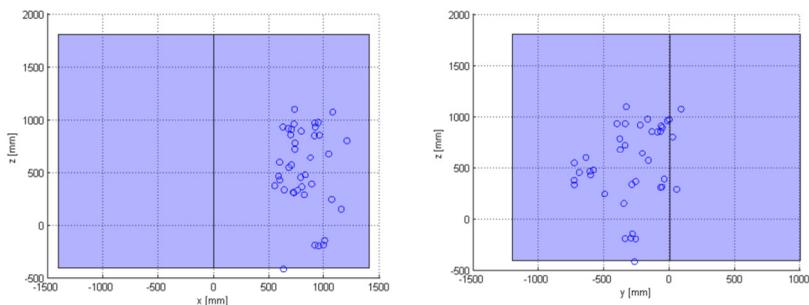
Fonte: do Autor

Dependendo do programa do controlador do robô, também é possível definir a posição e orientação da ferramenta (TCP) em seu controlador, reduzindo o número de cálculos necessário para a identificação de parâmetros. Na sequência são definidas as configurações do robô a serem utilizadas para a calibração.

### 4.3 CONFIGURAÇÕES DE MEDIÇÃO

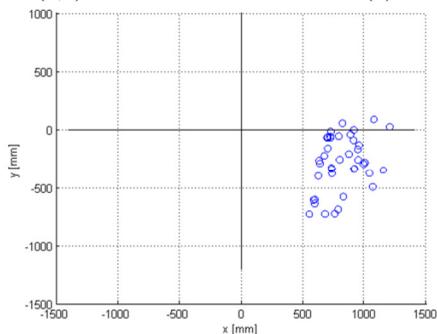
Segundo os resultados das simulações apresentadas no Capítulo 3 para o robô serial 6R espacial, as configurações de Klimchik adaptadas para as medições são as que proporcionaram melhores resultados para o erro de posição e orientação, portanto elas foram aplicadas ao controlador do robô. A região apreendida contempla 1 quadrante do volume de trabalho, como mostra a Figura 35.

Figura 35 – Configurações de Klimchik adaptado



(a) Vista (x,z)

(b) Vista (y,z)



(c) Vista (x, y)

Fonte: do Autor

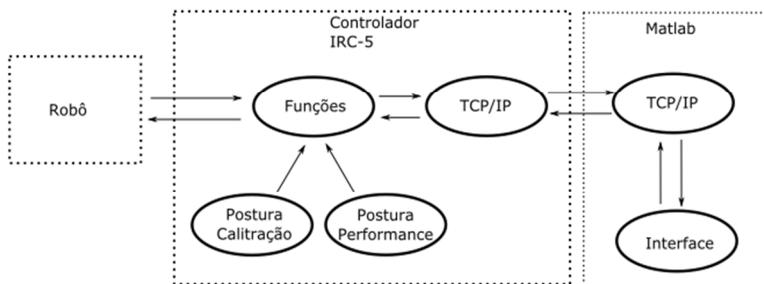
O robô ABB1600 possui extensão máxima de 1290mm, e as configurações apresentadas não atingem tal limite. Em seguida, é apresentada a comunicação entre o controlador do robô e o computador, na qual são descritos os algoritmos e diagrama de comunicação envolvidos.

#### 4.4 COMUNICAÇÃO ROBÔ – PC

Para reduzir o tempo de aquisição de dados, uma interface foi implementada em Matlab para a comunicação do controlador do robô ABB – IRC5. O controlador utiliza a linguagem de programação chamada RAPID, que possui módulos de programa e de sistema.

Os módulos de programa são destinados a armazenar funções e dados utilizados para determinadas tarefas de movimentação do robô, enquanto que os de sistema são responsáveis em armazenar dados que não se alteram independente da tarefa a ser realizada, como por exemplo, coordenadas de uma ferramenta que é acoplada no efetuador final. A seguir, na Figura 36, são apresentados os componentes do sistema de comunicação e controle.

Figura 36 – Comunicação Controlador - PC



Fonte: do Autor

A comunicação é feita através do protocolo TCP/IP (TANENBAUM, 2011) o qual garante o envio de mensagens sem perda de dados. Elas são encapsuladas em pacotes para identificação de funções que se deseja executar, ou seja, tanto o Matlab quanto o controlador enviam e recebem um vetor de caracteres com identificadores que permitem a alocação de dados ou execução de funções, como é mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Pacote de recepção de dados do controlador

Id	Postura	Controle
p	$[x, y, z, R_x, R_y, R_z]$	[0, 1, 2]
j	$[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$	

Fonte: do Autor

Os caracteres de identificação (p, j) indicam ao programa o recebimento de dados de variáveis do espaço de trabalho ou de juntas. O campo postura contém os dados a serem utilizados no programa para a calibração e o campo controle, indica se o dado recebido é o primeiro (0), o intermediário (1) ou o último (2). O Algoritmo 1 descreve a comunicação entre os dois sistemas considerados.

---

**Algoritmo 1:** Comunicação TCP/IP vista pelo controlador

---

**Entrada:** IP, porta

**Início**

Cria *socket* de servidor

Aloca porta e IP ao servidor

Aguarda resposta do cliente

**Se** chegou resposta

Aguarda pacote de instrução do Matlab

**Se não**

Aguarda resposta do cliente

**Fim se**

**Fim**

---

Fonte: do Autor

Como o controlador é definido como servidor, este deve ser executado antes da interface do Matlab. De forma semelhante é feita a conexão vista pelo Matlab. As principais funções utilizadas são apresentados no Apêndice C. Na sequência, o Algoritmo 2 mostra como são fornecidos os dados de postura do robô ou de suas juntas de acordo com as instruções selecionadas pelo usuário.

---

**Algoritmo 2:** Execução de movimentos do robô de acordo com instruções do Matlab

---

**Entrada:** Pacote, *socket* do cliente, postura performance, postura calibração

---

---

**Saída:** Espaço de juntas e de trabalho

**Início**

Recebe pacote de dados da interface

**Teste** pacote

Caso “*performance*”

**Enquanto** postura *performance* não for a última

Move robô para próxima postura

Envia espaço de junta e de trabalho à interface

**Fim enquanto**

Caso “calibração”

**Enquanto** postura calibração não for a última

Move robô para próxima postura

Envia espaço de junta e de trabalho à interface

**Fim enquanto**

**Fim teste**

**Fim**

---

Fonte: do Autor

Nele existem dois conjuntos de configurações para as movimentações: *performance* e calibração. A primeira se refere aos movimentos necessários para a avaliação de desempenho de posição e retitude, já a segunda, refere-se àqueles necessários para obtenção dos pontos para a estimativa dos parâmetros.

Todas as posturas pelas quais o robô deve alcançar são definidas no programa RobotStudio da ABB e gravadas no controlador. Para a leitura automatizada dessas posturas foram criadas listas para calibração e *performance*.

De fato, o que é visto pelo usuário é a interface de calibração, apresentada na Figura 37. Ela contém cinco campos principais, os quais são:

- Comunicação: responsável pelo envio de recebimento de *sockets* que inicializam a conexão entre o controlador e o computador;
- Dados do sistema de medição: informações de coordenadas de pontos da flange de medição fornecidos pelo MMC portátil. Sendo que o programa em Matlab converte esses dados para posturas do efetuador final do robô;

- Recepção do espaço de juntas e de trabalho: informações fornecidas pelo controlador do robô para a etapa de estimativa;
- Calibração: contém o algoritmo para a identificação dos parâmetros do modelo;
- Estimativa de parâmetros: informa o resultado da estimativa para o espaço de juntas do robô que é utilizado para a correção do modelo;

Figura 37 – Interface de calibração

The interface is divided into several sections:

- Robot Connection:** IP: 127.0.0.1, Port: 4012. Buttons: Connect, Disconnect.
- Measuring Arm:**
  - Mode choice: Calibration (selected), Manual. Buttons: start, Next.
  - Get file points from measuring arm: scFlange2Tcp.xls, scBase2Tcpv5.xls. Button: Get file.
  - Form posture file: Replication quantity in flange: 1. Buttons: Evaluate posture, Data validation.
  - Calibration: Robot Model, Start Calibration, Correct.
- Task and Joint Space:**
  - Nominal Task Space table:

Config Number	x	y	z	Rx	Ry	Rz
37	548.8550	-7.78.03...	373.0390	52.5837	34.3963	23.5934
38	676.1640	-7.26.85...	544.2590	165.8620	-11.6539	21.3408
39	824.5480	-580.25...	475.8900	92.8983	47.8092	81.8076
40	594.2670	-602.18...	426.4660	91.9461	-0.4744	79.6433

  - Measuring point: p1 (selected), p2, p3.
  - Nominal Joint Space table:

	q1	q2	q3	q4	q5	q6
37	-53.6383	45.9603	6.5768	-9.2281	-83.1463	55.7123
38	-47.4142	36.6110	-10.7416	-172.60...	-46.9143	-71.5455
39	-36.7788	42.2791	-5.4277	-41.1306	-42.5693	73.9340
40	-48.0725	32.6161	17.1309	133.5450	57.5433	-61.5798
- Parameter Estimation:**

value [deg]	dq1	dq2	dq3	dq4	dq5	dq6

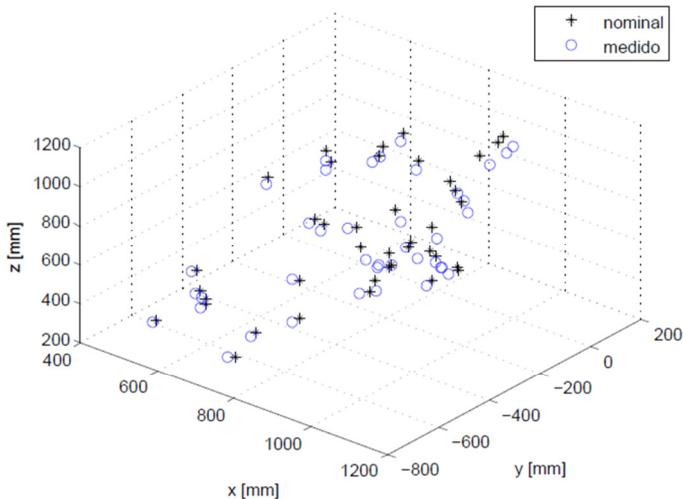
Fonte: do Autor

Após a comunicação efetuada, deve-se escolher no campo *Measuring arm* e *Mode choice* se o que se deseja são movimentos para avaliação de performance ou calibração. Também escolhe-se o tipo de movimentação, podendo ser em modo automático ou manual.

Em seguida, no campo *Get file points from measuring arm*, insere-se os arquivos que definem a matriz de transformação da flange de medição em relação ao efetuador final e dos pontos medidos na flange em relação ao sistema de coordenadas intermediário, localizado nessa flange, visto na Figura 32. Por sua vez, escolhe-se o número de replicações feitas durante as medições e verificam-se as posições

nominais e adquiridas através do sistema de medição, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – Posições nominais e medidas do Efetuador Final



Fonte: do Autor

No campo *Calibration* define-se o modelo cinemático do robô e, realiza-se a estimativa dos parâmetros e efetua-se a correção dos ângulos das juntas. Neste caso os *offsets* de juntas são apresentados no campo *Parameter estimation*.

O sistema foi desenvolvido para comandar a movimentação do robô em modo manual ou automático. O primeiro é utilizado nas medições reais para garantir maior segurança ao usuário, fazendo com que o robô prossiga sua trajetória somente quando o mesmo for autorizado pela interface. O segundo é utilizado nas simulações com o robô virtual, que é acessível no RobotStudio. Neste caso não há necessidade de pausas para a medição.

Com base nisso, tem-se todo o aparato, sistemas e conceitos para realizar a calibração a qual é implementada nas seguintes etapas para as medições.

#### 4.5 ATUALIZAÇÃO DOS CONTADORES DE REVOLUÇÃO

Em robôs industriais, comumente, não é possível acessar os parâmetros cinemáticos, porém, em seus controladores existem rotinas para realizar a atualização dos contadores de revolução ou *encoders/resolvers*, cujo procedimento se baseia em alinhar marcações dos elos do robô, como é mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Marcações para alinhamento



(a) Junta 1



(b) Junta 2



(c) Junta 3



(d) Junta 4



(e) Junta 5



(f) Junta 6

Fonte: do Autor

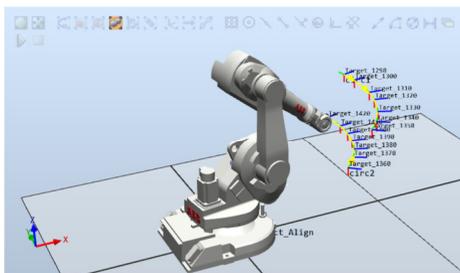
O início do processo de calibração se inicia com esses alinhamentos, cuja configuração resultante é chamada de *home position*, posteriormente, realizam-se as medições considerando as configurações das simulações para o robô 6R (Klimchik modificado) e o processo de estimativa de parâmetros. Com isso o programa Matlab envia um comando para o controlador do robô para retornar ao seu *home position* e corrige cada junta com os parâmetros de juntas (OJs) estimados utilizando uma função que move o robô através do espaço de juntas fornecido. Então, atualiza-se os contadores de revolução.

#### 4.6 ALINHAMENTO DA BASE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

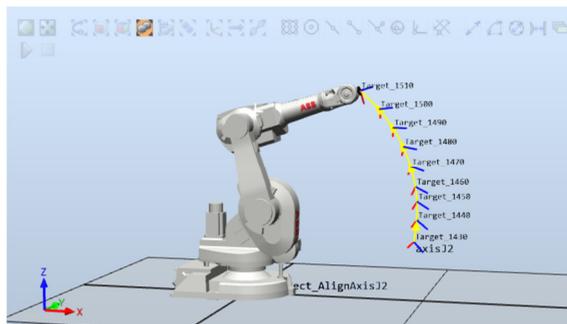
De acordo com a função objetivo empregada para a estimativa dos parâmetros, a qual considera a postura do efetuador final fornecida pelo controlador e medida pelo sistema de medição, necessita-se que esta última tenha como referência a base do robô. Dessa forma, torna-se necessário o alinhamento da base do braço de medição com a base do robô, a qual está localizada de acordo com a especificação técnica, como mostra a Figura 4, pag. 32.

O programa utilizado pelo braço de medição permite a mudança de seu sistema de coordenadas através de elementos geométricos criados a partir dos pontos medidos. Para isso seguem-se quatro etapas: criação do eixo da junta 1 (J1), eixo da junta 2 (J2), projeção do eixo J2 sobre J1, criando um ponto em J1 e, por fim, deslocamento deste ponto sobre o eixo J1 considerando a dimensão fornecida pela especificação da Figura 4. Na Figura 40 é apresentada as posições utilizadas para a formação dos elementos geométricos.

Figura 40 – Criação do SC do braço de medição



(a) Criação do eixo de J1



(b) Criação do eixo de J2

Fonte: do Autor

Apesar deste processo de alinhamento de base ser simples, nele estão inclusos os erros de *offsets* de elos, juntas e incerteza do sistema de medição, o que trará diferenças entre os resultados reais e simulados. Na sequência é descrito como foi desenvolvido o sistema de comunicação entre o controlador e o Matlab.

#### 4.7 ETAPAS DAS MEDIÇÕES

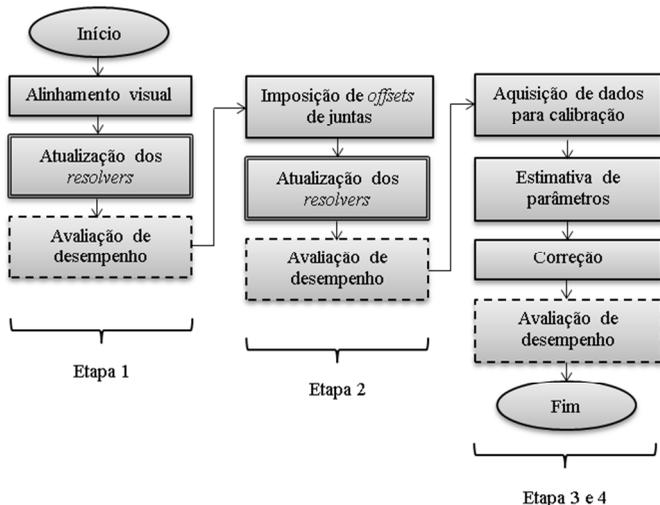
A sistematização apresentada nesta seção baseia-se em três etapas principais, conforme a descrição seguinte:

- Alinhamento visual das marcações dos elos e atualização dos contadores de revolução;
  - Alinhamento da base do braço de medição, conforme a seção 4.6;
  - Avaliação de desempenho para retitude e posição do EF em um ponto do volume de trabalho;
- Imposição dos mesmo OJs das simulações para o robô 6R;
  - Avaliação de desempenho (idem);
  - Aquisição de dados nas configurações do robô para a calibração;
- Calibração 1 – Estimativa e correção de parâmetros;
  - Atualização dos contadores de revolução;

- Avaliação de desempenho (idem);
- Calibração 2 – Nova aquisição de dados para calibração;

Nesta etapa realiza-se novamente o processo de aquisição, estimativa, correção e avaliação de desempenho. O fluxograma da Figura 41 resume o processo experimental.

Figura 41 – Fluxograma do processo experimental de calibração



Fonte: do Autor

## 4.8 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi detalhado o processo para os experimentos, apresentando o sistema de medição, a flange para as aquisições de posturas, o sistema de comunicação, as configurações utilizadas e as etapas do processo experimental.

A escolha do quadrante para as aquisições consideraram o alcance do sistema de medição e as condições físicas do laboratório onde o robô se encontrava. Apesar das simulações apresentarem erros de postura do robô após a calibração mais elevados do que em dois ou quatro quadrantes, seus resultados ainda são satisfatórios em relação a pesquisas similares de calibração de robôs industriais.

Com isso, no capítulo seguinte são apresentados os resultados experimentais.

## 5 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

A primeira atividade (*setup*) consistiu em posicionar o sistema de medição próximo das configurações de calibração e de avaliação de desempenho planejadas.

As medições exigiram considerável tempo devido ao processo de aquisição que era manual (Figura 42) e velocidade reduzida de movimentação do robô (100mm/s), de modo a não realizar paradas bruscas que poderiam alterar a posição da base do mesmo. Por fim, os tempos de estimativa de parâmetros foram menores que 1 minuto, sendo desprezíveis em relação ao tempo das outras etapas, apresentados na Tabela 13.

Figura 42 – Aquisição de pontos da flange de medição



Fonte: do Autor

Tabela 13 – Tempo médio da execução da calibração

<b>Atividade</b>	<b>Tempo de execução [min]</b>
<i>Setup</i> do equipamento	60
Alinhamento da base do braço de medição	20
Medições para avaliação de desempenho (4X) – 15min cada	60
Medições para estimativa de parâmetros (2X) – 30 min cada	60
<b>Total</b>	<b>200</b>

Fonte: do Autor

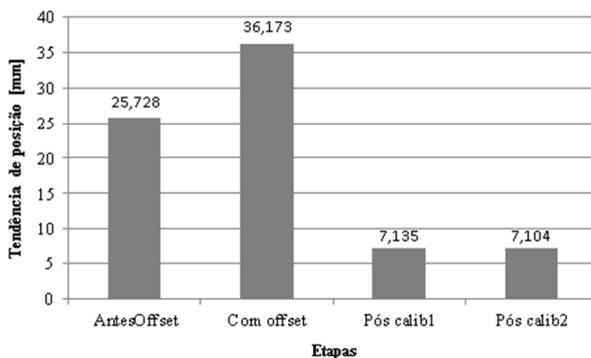
O software do sistema de medição fornece a média de diversas aquisições para um único ponto de medição da flange, permitindo a redução do efeito da incerteza do braço de medição.

## 5.1 RESULTADOS DAS ETAPAS

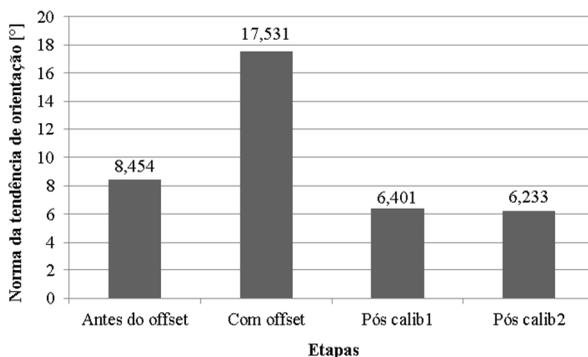
Em cada etapa foram avaliadas as retitudes, tendência em um ponto do volume de trabalho do robô e postura do efetuador final em *home position*.

A Figura 43 apresenta os resultados para a tendência de ponto para cada uma das quatro etapas (alinhamento visual; imposição de *offset*; calibração 1; calibração 2). Com o *setup* e o alinhamento visual das marcações dos elos realizados, encontrou-se 25,728mm para a tendência de posição e 0,288mm de retitude. Sendo esta tendência, inviável para grande parte das aplicações utilizando um braço robótico. Após a imposição de erros nas juntas, os critérios de desempenho pioraram conforme o esperado em simulações (Tabela 9). Nas etapas seguintes, foi realizado o processo de estimativa de parâmetros com suas correções, alcançando o resultado final de 7,104mm para a tendência de posição, 6,233° para orientação e 0,243mm para retitude.

Figura 43 – Desempenho para um ponto no volume de trabalho



(a) Tendência de posição



(b) Tendência de orientação

Fonte: do Autor

Qualitativamente, ambos os erros possuem comportamentos esperados, com aumento na segunda etapa, no qual se insere *offsets* de juntas e, posteriormente, redução dos erros após a estimativa e correção.

No entanto, o erro final de posição e orientação alcançado não condiz com o esperado na Tabela 10, pag. 65, cujo valor é na ordem de décimos de milímetros e graus para a tendência de posição e norma do erro de orientação. Uma das principais causas é o erro de alinhamento da base do braço de medição, visto que o processo parte do alinhamento visual das marcações dos elos e os *offsets* de juntas e de elos não são excluídos das medições.

Como no processo de medição não é utilizada a correção para cada medição, utiliza-se como fonte de incerteza de medição apenas o erro máximo encontrado. Para a última etapa da calibração o resultado de medição (RM) para a tendência de posição é o seguinte:

$$RM = 7,104 \pm 0,012 \text{ mm}$$

Os erros em *home position* para a última etapa são apresentados na Tabela 14 de modo a verificar o erro de posição inicial do robô.

Tabela 14 – Erro de posição em *home position* em mm

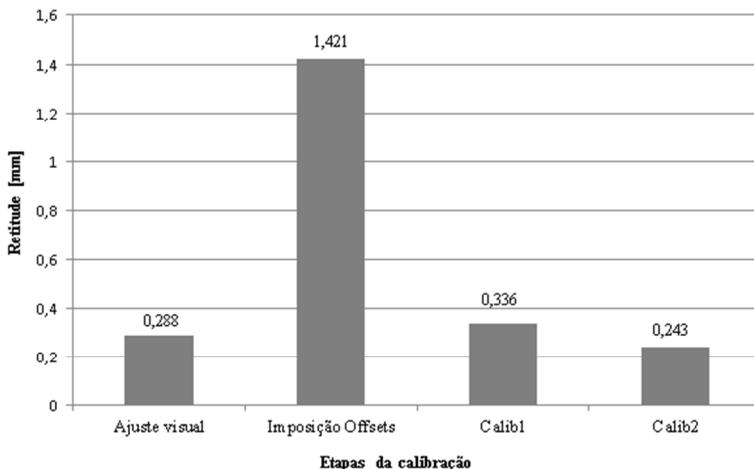
	x	y	z
Nominal	815	0	961,5
Medido	815,953	-4,598	959,698
Erro	-0,953	4,598	1,802

Fonte: do Autor

A partir disso, tem-se como tendência de posição 5,029mm, sendo inferior ao erro encontrado após a correção da última calibração apresentada na Figura 43. Este resultado é esperado devido ao fato de que nesta configuração em *home position* os OEs podem se compensar, como é o caso de um erro positivo na junta 2 e um negativo na 3, além disso, o erro sobre o eixo y depende apenas do erro de alinhamento da base do sistema de medição e da junta 1.

Em relação ao resultado da primeira etapa, o erro de posição foi reduzido em 72,4% e de orientação, 26,3%. Já avaliação de desempenho através da retitude é vista no gráfico da Figura 44.

Figura 44 – Avaliação de desempenho (Retitude)



Fonte: do Autor

O resultado da última etapa reduz o erro inicial em 15,6% para a região do volume de trabalho considerada. Devido à grande influência do erro de alinhamento, uma nova simulação foi realizada considerando erro de distâncias entre a postura fornecida pelo controlador do robô e os dados mensurados pelo MMC portátil, apresentado no APÊNDICE D. Nesse caso, a tendência de posição encontrada após a correção foi de 14,637mm e de orientação, 1,829°, 1,533° e 2,680° para rotações sobre os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Sendo valores maiores que o esperado, tornando este procedimento inviável para a calibração real.

## 5.2 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O processo de calibração desenvolvido apresentou significativa melhora no posicionamento do robô em relação às etapas consideradas, com redução de 72% e 26% para os erros de posição e orientação, respectivamente. No entanto, não alcançou os resultados esperados em relação às simulações.

Um dos fatores que influenciam nessa divergência é o erro de alinhamento da base do sistema de medição, cujo processo não exclui os *offsets* de juntas e elos do mecanismo robótico.

Para contornar este problema, foi realizada uma nova simulação considerando erros de distâncias a serem usadas na função custo. No entanto, a mesma não gerou resultados desejados e não foi aplicada aos experimentos.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivo utilizar a teoria de helicoides na calibração de um robô serial, com a realização de simulações e validação experimental. Inicialmente, buscou-se mapear as diversas pesquisas realizadas neste campo, identificando os modelos cinemáticos mais utilizados, os sistemas de medição e processos de estimativa de parâmetros.

As simulações foram feitas de modo a ter uma estimativa dos experimentos considerando limitações do ambiente onde se encontrava o robô e do sistema de medição. Os experimentos foram realizados em quatro etapas de acordo com o planejamento das medições no Capítulo 4.

Com este trabalho, foi possível publicar dois artigos em congressos internacionais. Sendo que o mais recente é também encontrado em um capítulo de livro.

- Simulation of a Serial Robot Calibration through Screw Theory (KATO et al, 2018);
- Screw Kinematic Model for Robot Calibration with PC-Robot Communication Overview (KATO et al, 2017);

### 6.1 SIMULAÇÃO E EXPERIMENTOS

O modelo cinemático adotado mostrou-se eficiente na simulação da calibração, sendo um modelo completo, contínuo e equivalente. Sua desvantagem é no número de parâmetros, que é maior que o DH.

Neste trabalho foram consideradas juntas virtuais para simular os erros de *offsets* causados pela leitura dos contadores de revolução e variações do comprimento dos elos, oriundos do processo de fabricação.

As condições adotadas para as simulações foram baseadas nos experimentos a serem realizados, considerando o volume de trabalho do sistema de medição, número e postura da configurações do robô a serem medidos.

Os resultados das simulações para o robô 6R, corrigindo os *offsets* de junta e de elo, mostraram-se satisfatórios em relação à pesquisas similares. No entanto, como no mecanismo real é possível corrigir apenas os *offsets* de juntas, foi realizada uma simulação contemplando este caso, e, como esperado, o resultado final do erro de

postura mostrou-se inferior ao primeiro caso. Sendo a correção somente dos OJs a referência a ser alcançada nos experimentos.

Para a aquisição de dados de posturas do robô, foi elaborada uma flange de medição com três furos de centro que possibilitam criar um sistema de referência intermediário. Sendo possível obter a postura do efetuador final em relação ao sistema de medição. Para isso, a base de tal sistema foi alinhada com a base do robô através de medições indiretas. Este procedimento mostrou-se pouco eficiente devido a não exclusão de *offsets* do mecanismo. Como consequência, os resultados finais não alcançaram os valores esperados para a avaliação de desempenho de um ponto no volume de trabalho. Porém, o método mostrou-se eficiente em relação aos erros iniciais e no critério de retitude, apresentando, ao final da calibração, erros menores que no alinhamento das marcações dos elos de forma visual.

De modo a agilizar o processo de aquisição de dados, foi desenvolvida um interface de comunicação entre o sistema robótico e o computador, utilizando o programa RobotStudio e Matlab. Com essa interface foi possível obter dados de postura do robô e comandá-lo para posturas desejadas de acordo com o resultado da estimativa de parâmetros.

Sendo assim, o processo de calibração desenvolvido apresentou melhora no desempenho do robô, mas não o suficiente em relação à pesquisas similares, sendo necessário, como próximo passo, estudar e aperfeiçoar métodos que não necessitem do alinhamento da base do sistema de medição com a do robô (APÊNDICE D). Outra dificuldade presenciada neste trabalho foi limitação para o acesso, transporte e uso do sistema de medição.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A calibração de robôs é um processo que depende do sistema de medição e do modelo utilizado, os quais vem se aprimorando cada vez mais. Sendo assim, o trabalho realizado pode ser aperfeiçoado com a aplicação dos seguintes passos:

- Utilizar modelos via Quartênios duais e Método de Davies da Teoria de Helicoides;
- Considerar fontes de erros não geométricos no modelo, tais como flexão de elos, erros de trens de engrenagens e considerar erros de manufatura dos elos nos três eixos ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

- Aquisição de dados com sistemas de medição sem contato, tais como, *laser trackers*, *laser scanners* e sistemas de visão;
- Aperfeiçoar o método que não necessita do alinhamento da base do sistema de medição com a do mecanismo robótico (APÊNDICE D);
- Adicionar informações de postura da flange de medição ao controlador do robô, reduzindo o número de cálculos necessários para o processo de otimização;



## REFERÊNCIAS

- ABB. **IRB 1600 Industrial Robot**, 2010.
- ADEPT. **Six-axis Robot Configuration Singularities**. Adept Technology, Inc., 2007.
- ALICI, G.; SHIRINZADEH, B. **Laser Interferometry Based Robot Position Error Modelling for Kinematic Calibration**. In: Proc. IEEE. International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pp. 3588-3593, Las Vegas, 2003.
- ANDREFF, N.; HORAUD, R.; ESPIAU, B. **Robot Hand-Eye Calibration Using Structure-from-Motion**. The International Journal of Robotics Research. Vol. 20, n. 3, pp. 228-248, 2001.
- BIPM et al. **The international vocabulary of metrology: basic and general concepts and associated terms (vim)**. 3. ed., 2012.
- BRANCO, V. D. Q. S. M. **Desenvolvimento e Implementação de Sistema de Calibração de Ferramenta de Robô Industrial**. 126f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Universidade do Porto, Porto, 2015.
- CAMPOS, A. **Cinemática Diferencial de Manipuladores empregando Cadeias Virtuais**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- CARL ZEISS. **Prismo Navigator**. Industrielle Messtechnik GmbH, 2016.
- Certificado de Calibração, **Barra de esferas**, Certificado número 3618/16, data da calibração 10/11/2016.
- CHEN, H. et al. **Practical industrial robot zero offset calibration**. In: Proc. IEEE. International Conference on Automation Science and Engineering. pp. 516–521, 2008.
- CHEN, J.; CHAO, L.-M. **Positioning error analysis for robot manipulators with all rotary joints**. IEEE Journal on Robotics and Automation, IEEE, v. 3, n. 6, pp. 539–545, 1987.
- CHEN, X.-Z.; HUANG, Y.-M.; CHEN, S.-b. **Model analysis and experimental technique on computing accuracy of seam spatial position information based on stereo vision for welding robot**.

Industrial Robot: An International Journal, Emerald Group Publishing Limited, v. 39, n. 4, pp. 349–356, 2012.

CHENG, F. S. **The Method of Recovering Robot TCP Positions in Industrial Robot Application Programs**. In: Proc. IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation. Pp. 805-810, 2007.

DENAVIT, J.; HARTENBERG, R. **Kinematic modelling for robot calibration**. Trans. ASME Journal of Applied Mechanics, v. 22, pp. 215–221, 1955.

DYNACAL. **Robot Calibration System**. Disponível em: <[http://www.dynalog-us.com/dynalogmainsite\\_030.htm](http://www.dynalog-us.com/dynalogmainsite_030.htm)>. Acesso em: 05 out. 2017.

ELATTA, A. Y.; GEN, L. P.; ZHI, F. L.; DAOYUAN, Y.; FEI, L. **An Overview of Robot Calibration**. Information Technology Journal. Vol. 3, pp. 74-78, 2004.

EVERETT, L. J.; DRIELS, M.; MOORING, B. W. **Kinematic Model for Robot Calibration**. In: Proc. IEEE. International Conference on Robotics and Automation, pp. 183 – 189, 1987.

EVERETT, L. J.; HSU, T.-W. **The theory of kinematic parameter identification for industrial robots**. Journal of dynamic systems, measurement, and control, American Society of Mechanical Engineers, v. 110, n. 1, pp. 96–100, 1988.

FARO. **Faro Arm Platinum**. Disponível em: <<http://www.faro.com>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

FARO. **Faro Ion – Features, benefits & technical specifications**. Faro Technologies Inc., 2013.

FONTAN, D. **Implementação da Cinemática Inversa de Robôs Redundantes Operando em Ambientes Confinados no Projeto Roboturb**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

GAN, Z.; TANG, Q. **Visual Sensing and its Applications: Integration of Laser Sensors to Industrial Robots**. Springer: Berlin, 2011.

GINANI, L. S.; MOTTA, J. M. S. **Theoretical and practical aspects of robot calibration with experimental verification**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, SciELO Brasil, v. 33, n. 1, pp. 15–21, 2011.

GAO, B.; LIU, Y.; XI, N.; SHEN, Y. **Developing an Efficient Calibration System for Joint Offset of Industrial Robots**. *Journal of Applied Mathematics*. Hindawi Publishing Corporation, Vol. 2014, 2014.

HA, I. **Kinematic Parameter Calibration Method for Industrial Robot Manipulator using the Relative Position**. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 22, pp. 1084-1090, 2008.

HAYATI, S.; MIRMIRANI, M. **Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators**. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 2, n. 4, pp. 397-413, 1985.

HE, R. et al. **A kinematic calibration method based on the product of exponentials formula for serial robot using position measurements**. *Journal Robotica*, Cambridge University Press, v. 33, n. 6, pp. 1295-1313, 2015.

HE, R. et al. **Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on poe formula**. In: *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, n. 3, pp. 411-423, 2010.

HOLLERBACH, J. M.; GIUGOVAZ, L.; BUEHLER, M.; XU, Y. **Screw Axis Measurement for Kinematic Calibration of the Sarcos Dextrous Arm**. In: *Proc. IEEE. International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Pp. 1617-1621, Yokohama, 1993.

HUNT, K. H. **Don't cross-thread the screw!**. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 20, n. 7, pp. 317-339, 2003.

ISO12780-1. **Geometrical product specifications (GPS) - Straightness - Part 1: Vocabulary and parameters of straightness**. [S.I.], 2007.

ISO9283. **Manipulating Industrial Robots: Performance criteria and related test methods**. [S.I.], 1998.

JANG, J. H.; KIM, S. H.; KWAK, Y. K. **Calibration of geometric and non-geometric errors of an industrial robot**. *Journal Robotica*, Cambridge University Press, v. 19, n. 3, pp. 311-321, 2001.

JOUBAIR, A.; BONEV, I. A. **Non-kinematic calibration of a six-axis serial robot using planar constraints**. *Precision Engineering*, Elsevier, v. 40, pp. 325-333, 2015.

JOUBAIR, A. et al. **Use of a force-torque sensor for self-calibration of a 6-dof medical robot.** Journal Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 6, pp. 798, 2016.

JUDD, R. P.; KNASINSKI, A. B. **A technique to calibrate industrial robots with experimental verification.** In: Proc. IEEE. International Conference on Robotics and Automation, v. 6, n. 1, pp. 20–30, 1990.

KAMALI, K.; JOUBAIR, A.; BONEV, I. A.; BIGRAS, P. **Elasto-geometrical calibration of an industrial robot under multidirectional external loads using a laser tracker.** In: Proc. IEEE. International Conference on Robotics and Automation. Pp. 4320–4327, 2016

KATO, L. K.; PINTO, T. L. F. C.; SIMAS, H.; MARTINS, D. **Simulation of a Serial Robot Calibration through Screw Theory.** Mechanism and Machine Science. 1<sup>st</sup> ed.: Springer International Publishing, vol. 54, pp. 295-304, 2018.

KATO, L. K.; PINTO, T. L. F. C.; SIMAS, H.; MARTINS, D. **Screw Kinematic Model for Robot Calibration with PC-Robot Communication Overview.** In: 24<sup>th</sup> ABCM International Congress on Mechanical Engineering, 2017, Curitiba. Proceedings of the 24<sup>th</sup> ABCM International Congress on Mechanical Engineering, 2017.

KLIMCHIK, A.; CARO, S.; WU, Y.; FURET, B.; PASHKEVICH, A. **Optimal Pose Selection for Calibration of Planar Anthropomorphic manipulators.** Journal of Precision Engineering. Vol. 40, pp. 214 – 229, 2015.

KUKA. **KR Agilus Hygienic Machine.** [S.l.], 2015.

LAUS, L. P. **Identificação da Cinemática de Robôs Industriais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial). Centro de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 1998.

LEE, M.; KANG, D.; CHO, Y-S.; PARK, Y.; KIM, J-H. **The effective Kinematic Calibration Method of Industrial Manipulator Using IGPS.** ICROS-SICE International Joint Conference, 2009.

LI, K-L.; YANG, W-T.; CHAN K-Y.; LIN, P-C. **An Optimization Technique for Identifying Robot Manipulator Parameters Under Uncertainty.** Springer International Publishing, 2016.

- LIM, H-K.; KIM, D-H.; KIM, S-R.; KANG H-J. **A Practical Approach to Enhance Positioning Accuracy for Industrial Robots**. In: ICROS-SICE International Joint Conference, 2009.
- LIU, B.; ZHANG, F.; QU, X.; SHI, X. **A Rapid Coordinate Transformation Method Applied in Industrial Robot Calibration Based on Characteristic Line Coincidence**. Journal Sensors. Vol. 16, 2016.
- LIU, Y.; ZHANG, G.; LI, X.; CHEN, H.; ZHANG, C.; JEFFERY, M. J.; FUHLBRIGGE, T. A. **An Automated Method to Calibrate Industrial Robot Joint Offset Using Virtual Line-Based Single Point Constraint Approach**. Proc. IEEE. International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, pp. 715-720.
- LIU, Z.; YANG, J.; WANG, M. **Research of Kinematics Parameter Calibration for Robot Manipulator Based on Measuring Method**. In: Proc. IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 2735-2740, 2009.
- MARTINS, D. **Análise Cinemática Hierárquica de Robôs Manipuladores**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- MOORING, B. W.; ROTH, Z. S.; DRIELS, M. R. **Fundamentals of manipulator calibration**. [S.l.]: Wiley-interscience, 1991.
- MOTTA, J. M. S. T. **An Investigation of Singularities in Robot Kinematic Chains Aiming at Building Robot Calibration Models for Off-line Programming**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering, vol. 27, pp. 200-204, 2005.
- MOZZI, G. **Discorso matematico sopra il rotamento momentaneo dei corpi**. [S.l.]: Donate Campo, 1763.
- NBR ISO2768-1. **Tolerâncias gerais Parte 1: Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.
- NEWMAN, W. S.; BIRKHIMER, C. E.; HORNING, R. J. **Calibration of a Motoman P8 Robot Based on Laser Tracking**. In: Proc. IEEE. International Conference on Robotics and Automation. Pp. 3597-3602, San Francisco, 2000.

NGUYEN, H-N.; ZHOU, J.; KANG, H-J. **A New Full Pose Measurement Method for Robot Calibration**. Journal Sensors, vol. 13, pp. 9132-9147, 2013.

NGUYEN T. T.; WEIß, H.; AMTHOR, A.; AMENT, C. **Fast and Robust Calibration of a Multi Laser Tracking System**. In: Proc. IEEE. Sixth International Conference on Development in eSystems Engineering. Pp. 141-144, 2013.

NUBIOLA, A.; BONEV, I. A. **Absolute calibration of an abb irb 1600 robot using a laser tracker**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, v. 29, n. 1, pp. 236–245, 2013.

NUBIOLA, A.; BONEV, I. A. **Absolute robot calibration with a single telescoping ball bar**. Journal of Precision Engineering, Elsevier, v. 38, n. 3, pp. 472–480, 2014.

PINTO, T. L. F. C. **Avaliação de Desempenho de Robôs Industriais Utilizando um Braço de Medição Portátil**. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

RADAVELLI, L. A. **Análise Cinemática Direta de Robôs Manipuladores via Álgebra de Clifford e Quatérnios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

RADKHAH, K. et al. **Towards the deployment of industrial robots as measurement instruments-an extended forward kinematic model incorporating geometric and non-geometric effects**. In: Proc IEEE/ASME. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 124–129, 2009.

RINGEL, F.; STÜER,C.; REINKE, A.; PREUSS, A.; BEHR, M.; AUER, F.; STOFFEL, M.; MEYER, B. **Accuracy of Robot-Assisted Placement of Lumbar and Sacral Pedicle Screws: A Prospective Randomized Comparison to Conventional Freehand Screw Implantation**. Journal Spine. Vol. 37, pp. 496-501, 2012.

ROMULUS, D. D.; IOAN, D. **An Overview on Accuracy and Calibration Methods for Manipulators**. In: Proc. Applied Mechanics and Materials. Vol. 658, 2014, pp. 606-611.

ROTH, Z., MOORING, B. W., RAVANI, B. **Robot Precision and Calibration Issues in Electronic Assembly**. Proc. IEEE Southcon, *Program Session Record 21*, Orlando, Florida, 1986.

SANTOLARIA, J.; GUILLOMÍA, D.; CAJAL, C.; ALBAJEZ, J. A.; AGUILAR, J. J. **Modeling and Calibration Technique of Laser Triangulation Sensors for Integration in Robot Arms and Articulated Arm Coordinate Measuring Machines**. *Journal Sensors*, Vol. 9, 2009, pp. 7374-7396.

SCHROER, K.; ALBRIGHT, S. L.; GRETHLEIN, M. **Complete, Minimal and Model-Continuous Kinematic Models for Robot Calibration**. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, vol. 13, n. 1, pp. 73–85, 1997.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Modelling and control of robot manipulators**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

SHAMMA, J. S.; WHITNEY, D. E. **A Method for Inverse Robot Calibration**. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. Vol. 109, pp. 36-46, 1987.

SUYI, L.; GUORONG, W. **Fast Calibration for Robot Welding System with Laser Vision**. In: Proc. IEEE. International Conference on Automation and Mechatronics, 2008.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. **Redes de Computadores**. 5ª Ed. Pearson Prentice Hall, 2011, pp. 933.

TSAI, L. W. **Robot Analysis**. John Wiley & Sons, Inc, 1999.

VEITSCHEGGER, W. K.; WU, C.-H. **Robot calibration and compensation**. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, IEEE, v. 4, n. 6, pp. 643–656, 1988.

WANG, H.; SUN, Q.; LIU, W.; LU, X. **Application of Screw Axis Identification Method for Serial Robot Calibration in The Service Robot**. In: Proc. IEEE. Chinese Control and Decision conference, 2013, pp. 5118-5122.

WANG, W.; LI, A.; XU, H.; TIAN, Y. **An Automated Method to Robot Calibration Using Line-Structure-Light Vision Sensor**. In: *Proc. IEEE*. International Conference on Automation and Logistics, 2009, pp. 1896-1899.

WANG, W.; LIU, F.; YUN, C. **Calibration method of robot base frame using unit quaternion form**. Precision Engineering, Elsevier, v. 41, pp. 47–54, 2015.

WEIHMANN, L. **Modelagem e Otimização de Forças e Torques Aplicados por Robôs com Redundância Cinemática e de Atuação em Contato com o Meio**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

WU, Y.; KLIMCHIK, A.; CARO, S.; FURET, B.; PASHKEVICH, A. **Geometric Calibration of Industrial Robots Using Enhanced Partial Pose Measurements and Design of Experiments**. Journal of Computer-Integrated Manufacturing. Vol. 35, 2015, pp. 151-168.

YANG, X. et al. **A Minimal Kinematic Model for Serial Robot Calibration Using Poe Formula**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, v. 30, n. 3, pp. 326–334, 2014.

YASKAWA. **EPX1250**. [S.l.], 2012.

ZHANG, B.; WANG, J.; ROSSANO, G.; MARTINEZ, C.; KOCK, S. **Vision-guided Robot Alignment for Scalable, Flexible Assembly Automation**. In: Proc. IEEE. International Conference on Robotics and Biomimetics. Pp. 944-951, 2011.

ZHANG, Y.; ZHANG, H. **An Approach of Robot Kinematics Parameters Calibration**. In: Proc. Advanced Materials Research, Vol. 655-657, 2013, pp. 1023-1028.

ZHUANG, H.; ROTH, Z.; HAMANO, S. **A Complete and Parametrically Continuous Kinematic Model for Robot Manipulator**. In: Proc. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 8, n. 4, pp. 451-463, 1992.

**APÊNDICE A – Pesquisa bibliográfica de trabalhos sobre calibração de robôs seriais a partir de 2007**

<b>Ano</b>	<b>Autor</b>	<b>Modelo Cinemático</b>	<b>Instrumento</b>
2007	Cheng	DH	Trena <sup>1</sup>
	Wanli et al.	DHM	Braço de medição
2008	Suyi; Guorong	DH	Sistema de visão a laser
	Chen et al.	DH	Braço de medição
2009	Lee et al.	DHM	IGPS
	Lim et al.	DHM	<i>Laser tracker</i>
	Liu, Y. et al.	DH	Laser e PSD <sup>2</sup>
	Liu, Z. et al.	DH	Máquina de Medir por Coordenadas
	Radkhah et al.	DHM	Sistema de visão
	Santolaria et al.	DH	Sensor de triangulação a laser
	Wang et al.	DH	Sensor de triangulação a laser
2011	Barati et al.	DH	Máquina de Medir por Coordenadas
	Ginani; Motta	DH	Braço de medição
2012	Santolaria; Ginés	DHM	<i>Laser tracker</i>
2013	Nguyen et al.	DH	<i>Laser tracker</i>
	Nubiola; Bonev	DHM	<i>Laser tracker</i>
	Wang et al.	Helicoide	Sistema de visão
	Zhang, Y;	DH	Interferômetro

<sup>1</sup> Trena – Sistema de medição por cabo (DynaCal, 2017)

<sup>2</sup> PSD – *Positioning-Sensitive Detector*

	Zhang, H		laser
2014	Gao et al.	DH	Sistema de visão
	Yang et al.	POE	Braço de medição
	Nubiola; Bonev	DH	<i>ballbar</i>
	Romulus; Ioan	DH	<i>Laser Scanner</i>
	Joubair; Bonev	DH	Apalpador
2015	Branco	DH	Apalpador
	Wang; Liu; Yun	Quatérnios	Braço de medição
	Wu et al.	DHM	<i>Laser tracker</i>
2016	Li et al.	DH	Apalpador
	He et al.	POE	Braço de medição
	Kamali et al.	DHM	<i>Laser tracker</i>
	Liu et al.	DH	<i>Laser tracker e fotogrametria</i>

## APÊNDICE B – Calibração inversa por helicoides

A calibração inversa através de helicoides parte do princípio de velocidades instantâneas dos mesmos, cuja função descreve as velocidades de posição e orientação do efetuador final em relação aos parâmetros helicoidais de cada junta, conforme a Eq. (AP. 1).

$$\dot{\chi} = f(\omega_x, \omega_y, \omega_z, v_x, v_y, v_z), \quad (\text{AP. 1})$$

onde  $\omega_i$  e  $v_i$  são as velocidades angular e linear do helicóide, respectivamente. Como essas equações são não lineares, faz-se a linearização de primeira ordem, cujo resultado é a Eq. (AP. 2).

$$\Delta\chi = \frac{\delta f}{\delta\omega_x} \Delta\omega_x + \frac{\delta f}{\delta\omega_y} \Delta\omega_y + \frac{\delta f}{\delta\omega_z} \Delta\omega_z + \frac{\delta f}{\delta v_x} \Delta v_x + \frac{\delta f}{\delta v_y} \Delta v_y + \frac{\delta f}{\delta v_z} \Delta v_z. \quad (\text{AP. 2})$$

A variação no deslocamento do efetuador final  $\Delta\chi$  é a diferença entre a postura comandada e alcançada que é mensuradas pelo sistema de medição, sendo  $\xi$  o vetor de parâmetros, como na Eq. (AP. 3).

$$\xi = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z \quad v_x \quad v_y \quad v_z]^T. \quad (\text{AP. 3})$$

Dessa maneira, a Eq. (AP. 2) pode ser descrita em sua forma compacta, como na Eq. (AP. 4).

$$\Delta\chi = J_c(\xi) \Delta\xi. \quad (\text{AP. 4})$$

A variação dos parâmetros pode ser encontrada a partir da pseudo-inversa do Jacobiano, Eq. (AP. 5), considerando que a matriz não é quadrada.

$$\Delta\xi = (J_c^T J_c)^{-1} J_c^T \Delta\chi. \quad (\text{AP. 5})$$

Com isso, atualiza-se o Jacobiano com a variação estimada acrescida do valor inicial dos parâmetros  $\xi_n$ , Eq. (AP. 6). O processo segue de forma iterativa até se alcançar determinado valor para  $\Delta\xi$ .

$$\xi_e = \xi_n + \Delta\xi \quad (\text{AP. 6})$$



## APÊNDICE C – Principais funções utilizadas no RobotStudio

Para a comunicação sob o protocolo TCP/IP foram utilizadas as seguintes funções:

- SocketCreate
- SocketBind
- SocketListen
- SocketAccept

Para a Leitura da postura do robô:

- CrobT – Lê a postura atual do robô. A orientação é dada em Quatérnios;
- EulerZYX – Transforma a orientação para ângulos de Euler;
- CjointT – Lê os valores de juntas atuais;

Para a movimentação do robô:

- MoveJ – Move o robô para uma postura específica sem trajetória definida;
- MoveL – Move o robô através de trajetória linear;



## APÊNDICE D – Simulação da calibração com erros de distância

Com o intuito de verificar a possibilidade de calibração sem a necessidade de alinhar a base do sistema de medição com a base do mecanismo robótico, considera-se a seguinte função objetivo:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \sum_{i=1}^M \varepsilon D_i^2 + pen, & (\text{AP. 7}) \\ & \text{Sujeito a } \begin{cases} \theta_{1\min} < \theta_1 < \theta_{1\max} \\ \vdots \\ \theta_{6\min} < \theta_6 < \theta_{6\max} \end{cases}, \end{aligned}$$

onde,  $\varepsilon D_i^2$  é o erro quadrático das distâncias nominais e medidas, sendo *pen*, a penalização imposta para caso as variáveis extrapolem o limite imposto para cada ângulo de junta. Esta simulação foi realizada através do métodos da Evolução Diferencial, cujos resultados são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 15 – Simulação com erro de distância

		T <sub>PO</sub> [mm]	Erro de orientação [°]		
			TOr <sub>i</sub>	TOr <sub>j</sub>	TOr <sub>k</sub>
<b>Klimchik Adaptado</b>	<b>Antes</b>	55,247	5,834	4,127	6,708
	<b>Depois</b>	14,637	1,829	1,533	2,68

Fonte: do Autor

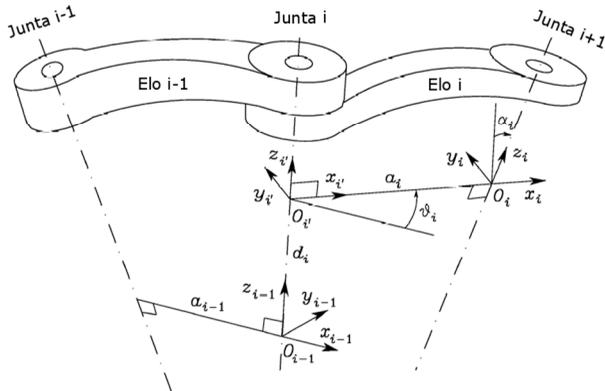
O resultado apresenta redução de 73,5% para o erro de posição e 68, 62 e 60% para os erros de orientação em relação aos eixos x, y e z. No entanto, estes resultados não se aproximam do esperado de acordo com o Capítulo 3. Sendo necessário reavaliar a função objetivo e os parâmetros de otimização adotados.



## ANEXO A – Método Denavit-Hartenberg

O método consiste em definir sistemas de coordenadas (SC) de elos de um mecanismo de forma sistemática. Cada SC é definido a partir de quatro parâmetros conforme a Figura 45

Figura 45 – Definição de parâmetros DH



Fonte: (SCIAVICCO, 2012)

onde,

$a_i$  – Distância entre  $O_i$  e  $O_{i'}$ .

$d_i$  – Coordenada de  $O_{i'}$  ao longo do eixo  $z_{i-1}$ .

$\alpha_i$  – Ângulo entre os eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$  sobre o eixo  $x_i$  com valor positivo quando a rotação é feita no sentido anti-horário.

$\theta_i$  – Ângulo entre os eixos  $x_{i-1}$  e  $x_i$  sobre o eixo  $z_{i-1}$  com valor positivo quando a rotação é feita no sentido anti-horário.

Com base nesses parâmetros, gera-se a matriz de transformação homogênea entre dois sistemas de coordenadas consecutivos, conforme a Eq. **Error! Reference source not found.**

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & a_i \text{sen}(\theta_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 1})$$

O mapeamento completo do espaço de juntas para o espaço de trabalho é feito com o produtório de todas as matrizes de transformação homogênea.

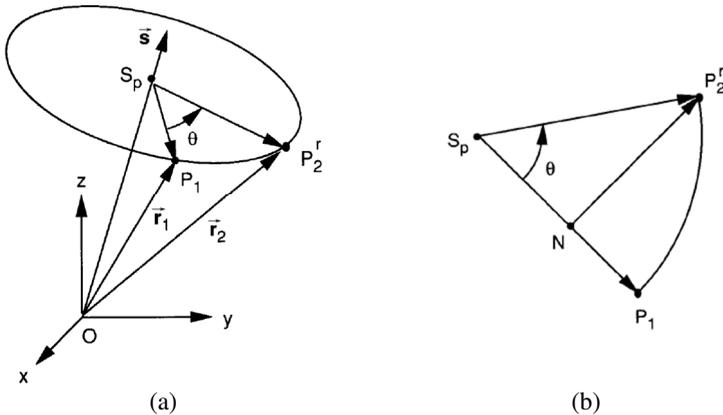
$$T_n^0 = \prod_{i=1}^n A_i^{i-1} \quad (\text{A. 2})$$

Para obtenção da postura do TCP multiplica-se a matriz  $T$  com a matriz homogênea que contém a orientação da ferramenta do robô em relação à última junta e sua posição em relação à base do mesmo.

## ANEXO B – Fórmula de Rodrigues

O detalhamento da formulação da matriz de transformação homogênea é apresentado em seguida com base em TSAI (1999). A Figura 46 representa um deslocamento esférico.

Figura 46 – Deslocamento esférico (a) e vista normal ao plano  $S_p, P_1$  e  $P_2$



Fonte: Adaptado de (TSAI, 1999)

Na Figura 46(a) apresenta-se o deslocamento de um ponto  $P_1$  através de uma rotação  $\theta$  sobre o eixo  $(\vec{s})$  e na Figura 46(b), a vista normal ao plano que contém os pontos  $S_p, P_1$  e  $P_2$ .

Dessa forma os vetores dados por  $(S_p, P_1)$  e  $(S_p, P_2)$  podem ser descritos da seguinte maneira:

$$\overline{S_p P_1} = \vec{r}_1 + (\vec{r}_1^T \vec{s}) \vec{s}, \quad (\text{A. 3})$$

$$\overline{S_p P_2} = \vec{r}_2 + (\vec{r}_2^T \vec{s}) \vec{s}. \quad (\text{A. 4})$$

Além disso, considerando que os vetores formados por  $(N, P_2^r)$  e  $(S_p, P_1)$  são perpendiculares e o módulo de  $\overline{S_p P_2^r}$  e  $\overline{S_p P_1}$  são iguais, tem-se:

$$\overline{S_p N} = \overline{S_p P_1} \cos(\theta), \quad (\text{A. 5})$$

$$\overline{NP_2^r} = \vec{s} \times \vec{r}_1 \sin(\theta). \quad (\text{A. 6})$$

Com estes resultados é possível determinar o valor de  $\overline{S_p P_2^r}$  somando-se as equações (A. 5) e (A. 6):

$$\overline{S_p P_2^r} = \overline{S_p N} + \overline{NP_2^r}. \quad (\text{A. 7})$$

Substituindo as equações (A. 3) a (A. 6) em (A. 7), resulta-se na seguinte representação vetorial, que se relaciona com a matriz de rotação da matriz homogênea.

$$\vec{r}_2 = \vec{r}_1 \cos(\theta) + \vec{s} \times \vec{r}_1 \sin(\theta) + \vec{s} (\vec{r}_1^T \vec{s}) (1 - \cos(\theta)). \quad (\text{A. 8})$$