



TESE DE DOUTORADO

**METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS
COM MEDIÇÕES EM SUB-REGIÕES VOLUMÉTRICAS**

JUAN SEBASTIAN TOQUICA ARENAS

Brasília, 22 de junho de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS
COM MEDIÇÕES EM SUB-REGIÕES VOLUMÉTRICAS**

JUAN SEBASTIAN TOQUICA ARENAS

**TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

APROVADA POR:

Prof. Dr. José Maurício S. T. Motta, ENM/UnB
Orientador

Prof. Dr. Rogério Sales Gonçalves, FEMEC/UFU
Membro Externo

Prof. Dr. Tiago L. F. Costa Pinto, EMC/UFSC
Membro Externo

Prof. Dr. Carlos Humberto Llanos, ENM/UnB
Membro Interno

BRASÍLIA DF, 22 DE JUNHO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

JUAN SEBASTIAN TOQUICA ARENAS

METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS COM MEDIÇÕES EM SUB-REGIÕES VOLUMÉTRICAS [Distrito Federal] 2022.

xvi, 124 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Engenharia Mecânica, 2022).

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 1. Calibração de robôs | 2. Medição em Sub-Regiões |
| 3. Erros cinemáticos | 4. Precisão dos robôs |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TOQUICA, JUAN S. (2022). *METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS COM MEDIÇÕES EM SUB-REGIÕES VOLUMÉTRICAS*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 124 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Juan Sebastian Toquica Arenas

TÍTULO: METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS COM MEDIÇÕES EM SUB-REGIÕES VOLUMÉTRICAS.

GRAU: Doutor em Sistemas Mecatrônicos ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Tese de Doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Tese de Doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Juan Sebastian Toquica Arenas

Depto. de Engenharia Mecânica (ENM) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70910-900 - Brasília - DF - Brasil

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me permitir mais uma vez ter a oportunidade de estar com vida e honrar seu nome por meio de meus pensamentos e minhas ações diárias.

Ao meu filho, meu príncipe amado, sendo ele uma eterna motivação desde as profundezas do coração. “A vida é uma constante busca de caminhos a serem explorados, como as áreas do conhecimento humano”, digo ao meu filho, “quando leres estás palavras já terás maturidade suficiente para entender as decisões que tomei na minha vida, onde um plano maior sempre esteve presente, e tu, meu filho, a cada instante esteve e continuará sendo parte fundamental desse grande plano. Sendo assim, querido príncipe Juan José lembre-se que você é capaz de superar os teus próprios limites, as tuas próprias fronteiras humanas, atingir teus sonhos, sempre confia e acredita que devemos estar presentes no dia seguinte para continuar a encontrar as respostas às nossas perguntas.” Te amo ilimitadamente.

Ao meu maravilhoso núcleo familiar: minha mãe Clara Inés, meu pai Efrain e minha irmã Diana Andrea que sempre esteve ao meu lado, mesmo na distância, pilares fundamentais da minha vida, que nunca duvidaram de mim, nem mesmo quando eu duvidei das minhas potencialidades. Minha mais sincera gratidão com todos os membros da minha família que me apoiaram em atingir meus sonhos, em especial para minha tia e madrinha Angie, que hoje faz parte dos anjos que cuidam de mim na eternidade.

Aos colegas e amigos Diego Benavides, Henrique, Yesid, Luiz Eduardo, Efrain, José, Lucas, Gerardo, Jairo, Maurício, Carolina, Eva e todos aqueles que estiveram por perto, que ao longo desse percurso do conhecimento nos tornamos maduros com as experiências vividas, onde a amizade faz parte importante para atingir nossos objetivos.

Para todas as pessoas que contribuíram para que este sonho pudesse hoje ser alcançado, através de uma palavra, um abraço, uma mensagem, uma caminhada noturna.

À Raquel Adjafre, quem me lembrou que a qualidade de vida e o cuidado pessoal são uma prioridade em nossa trilha por esse mundo. Obrigado à família Costa Matos por me permitirem tornar um espaço familiar em um recinto de conhecimento, sou grato eternamente.

Em especial, ao professor José Maurício pela oportunidade de aprender com ele, e ser um guia em momentos que precisava de uma palavra sensata e prudente para acreditar em mim, por sua paciência e sabedoria ao longo desse caminho de cinco anos.

À CAPES pela bolsa de doutorado que me permitiu permanecer com recursos financeiros ao longo do período de estudos, junto à FAP-DF pelos recursos que fizeram possível a participação em congressos internacionais, permitindo aportar um grão de areia na literatura relacionada à minha paixão: a robótica industrial. Ao PPMEC por me ter dado a oportunidade de concretizar mais um objetivo de vida.

Juan Sebastian Toquica Arenas

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para calibração de robôs industriais que utiliza o conceito de medição em sub-regiões, possibilitando soluções de baixo custo e de fácil implementação para atender os requisitos de precisão do robô em aplicações industriais. A implementação das soluções para aumentar a precisão dos robôs têm alto custo atualmente, tornando a calibração em todo o local de trabalho uma tarefa difícil e improvável na indústria. Assim, a redução do tempo gasto e do volume medido do espaço de trabalho com efetuator do robô são os principais benefícios da implementação do conceito de sub-região, garantindo flexibilidade suficiente na etapa de medição como parte dos procedimentos de calibração do manipulador. A principal contribuição deste trabalho é a proposta e discussão de uma metodologia para calibrar robôs utilizando vários pequenos volumes de medição e agrupar os dados medidos de forma equivalente às medições feitas em regiões de grande volume, viabilizando o uso de equipamentos de alta precisão, mas limitado a pequenos volumes, como sistemas de medição baseados em visão computacional. Os procedimentos de calibração do robô foram simulados de acordo com a literatura, de forma que os resultados da simulação estejam livres de erros devido a configurações experimentais para isolar os benefícios da metodologia de medição proposta. Procedimentos experimentais baseados na medição por sub-regiões foram realizados utilizando um *Laser-Tracker*, permitindo destacar os benefícios da medição em pequenos volumes. Além disso, é proposto um método para validar o modelo cinemático analítico *off-line* de robôs industriais utilizando o modelo nominal do fabricante do robô embarcado no seu controlador.

ABSTRACT

This work proposes a methodology for calibration of industrial robots that uses a concept of measurement sub-regions, allowing low-cost solutions and easy implementation to meet the robot accuracy requirements in industrial applications. The solutions to increasing the accuracy of robots today have high-cost implementation, making calibration throughout the workplace in industry a difficult and unlikely task. Thus, reducing the time spent and the measured workspace volume of the robot end-effector are the main benefits of the implementation of the sub-region concept, ensuring sufficient flexibility in the measurement step of robot calibration procedures. The main contribution of this work is the proposal and discussion of a methodology to calibrate robots using several small measurement sub-regions and gathering the measurement data in a way equivalent to the measurements made in large volume regions, making feasible the use of high-precision measurement systems but limited to small volumes, such as vision-based measurement systems. The robot calibration procedures were simulated according to the literature, such that results from simulation are free from errors due to experimental setups as to isolate the benefits of the measurement proposal methodology. Experimental procedures based on the proposed methodology were performed using a Laser-Tracker, allowing to highlight the benefits of measurement in small regions. In addition, a method to validate the analytical off-line kinematic model of industrial robots is proposed using the nominal model of the robot supplier incorporated into its controller.

RESUMEN

Este trabajo propone una metodología para la calibración de robots industriales que utiliza el concepto de sub-regiones de medición, permitiendo que soluciones de bajo costo y fácil implementación cumplan con los requisitos de precisión del robot en aplicaciones industriales. Las soluciones para aumentar la precisión de los robots hoy en día se caracterizan por tener alto costo en la implementación, lo que hace que la calibración en todo el espacio de trabajo sea una tarea difícil e improbable en la industria. Por lo tanto, reducir el tiempo empleado y el volumen del espacio de trabajo medido del efector final del robot son los principales beneficios al implementar el concepto de sub-región, asegurando suficiente flexibilidad en la etapa de medición como parte de los procedimientos de calibración de robots. La principal contribución de este trabajo es la propuesta y discusión de una metodología para calibrar robots utilizando varias volúmenes pequeños de medición, recopilando los datos de medición de manera equivalente a las mediciones realizadas en regiones de gran volumen, haciendo factible el uso de sistemas de alta precisión, pero limitados a pequeños volúmenes, como los sistemas de medición basados en visión computacional. Los procedimientos de calibración del robot se simularon de acuerdo con la literatura, de manera que los resultados de la simulación estén libres de errores debido a las configuraciones experimentales para aislar los beneficios de la metodología de medición propuesta. Los procedimientos experimentales basados en la metodología mencionada se realizaron utilizando un *Laser-Tracker*, lo que permitió resaltar los beneficios de la medición en pequeñas regiones. Además, se propone un método para validar el modelo cinemático analítico *off-line* de robots industriales utilizando el modelo nominal del fabricante del robot incorporado en su controlador.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
RESUMEN	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto	1
1.2 Resumo orientativo da proposta	3
1.2.1 Motivação	3
1.2.2 Hipótese a comprovar	3
1.2.3 Objetivos	4
1.3 Contribuições	5
1.4 Publicações	5
1.5 Estrutura do Documento	5
2 CALIBRAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS	6
2.1 Fontes de Erro e Tipos de Calibração	7
2.2 Padrões de desempenho	11
2.3 Modelagem para calibração de robôs	13
2.4 Métodos de medição	15
2.5 Identificação	17
2.6 Compensação	18
2.7 Comentários finais	20
3 REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1 Introdução	21
3.2 Considerações sobre a modelagem	21
3.3 Considerações sobre a identificação de parâmetros	23
3.4 Calibração de robôs seriais	23
3.4.1 Modelos de calibração utilizando transformações homogêneas	24

3.4.2	Modelos de calibração utilizando <i>screw theory</i> e CPA.....	37
3.4.3	Modelos de calibração utilizando formula POE	39
3.4.4	Modelos de calibração utilizando <i>dual-quaternions</i>	40
3.4.5	Modelos de calibração não-paramétricos.....	41
3.4.6	Modelos de calibração híbridos.....	44
3.4.7	Calibração simultânea de múltiplos robôs	45
3.4.8	Calibração tipo <i>Hand-Eye</i>	46
3.5	Calibração de robôs paralelos	52
3.6	Comentários finais	56
4	CONCEITO DE SUB-REGIÃO	57
4.1	Considerações teóricas.....	57
4.2	Similaridade de erro entre posturas adjacentes.....	58
4.3	Sub-Regiões no Espaço de Trabalho do Robô	61
5	METODOLOGIA	65
5.1	Metodologia para a calibração de robôs baseada em Sub-Regiões.....	65
5.1.1	Modelagem	67
5.1.2	Medição	68
5.1.3	Identificação e Compensação	68
5.1.4	Modelo de erros ajustado.....	69
5.2	Implementação computacional da metodologia proposta	70
6	ESTUDO DE CASO 1: ABB IRB140	72
6.1	Modelo cinemático ABB IRB-140.....	72
6.1.1	Cinemática Direta.....	72
6.1.2	Cinemática Inversa.....	75
6.1.3	Método para a validação da cinemática inversa.....	79
6.2	Modelo de erro ABB IRB-140.....	82
6.3	Identificação dos Parâmetros de Erro.....	84
6.4	Definição das Sub-Regiões no espaço de trabalho do robô	87
6.5	Identificação dos erros paramétricos em cada Sub-Região.....	88
6.6	Comparação dos métodos de calibração	91
7	ESTUDO DE CASO 2: FANUC LR 200i	93
7.1	Modelo Cinemático Fanuc 200i	93
7.2	Modelo de Erro Fanuc 200i.....	96
7.3	Identificação dos Parâmetros de Erro.....	96
7.4	Medições no espaço de trabalho do robô Fanuc 200i.....	97
7.5	Definição de Sub-Regiões no espaço de trabalho	99
7.6	Resultados no Volume de Avaliação.....	102
7.6.1	Avaliação do Experimento 1.....	103
7.6.2	Avaliação do Experimento 2.....	103

7.6.3	Avaliação do Experimento 3.....	103
7.6.4	Avaliação do Experimento 4.....	104
7.6.5	Avaliação do Experimento 5.....	104
7.6.6	Avaliação do Experimento 6.....	105
8	CONCLUSÕES	106
8.1	Conclusões.....	106
8.2	Trabalhos Futuros	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
	APÊNDICE	123
A	PUBLICAÇÕES.....	124

LISTA DE FIGURAS

2.1	Definições e Classificação das Fontes de Erro	8
2.2	Fatores externos que influenciam a precisão do robô	10
2.3	Critérios de desempenho e métodos de avaliação relacionados (ISO 9283:1998)	12
2.4	Exemplos de instrumentos de medição para a calibração de robôs industriais	17
2.5	Etapa de identificação	18
2.6	Compensação <i>off-line</i> controlador IRC5	19
2.7	Etapa de Compensação	19
3.1	Comparação de precisão dos métodos de calibração cinemática	22
4.1	Mapeamento da precisão segundo a trajetória e postura	58
4.2	Modelo de erro de posicionamento por interpolação	59
4.3	Medição e análise por sub-regiões para a calibração <i>on-line</i>	62
4.4	Vetor de erro em função do conceito de sub-regiões	62
4.5	Definição do Sistema de Coordenadas do Vetor Direcional (\vec{vd})	63
4.6	Nuvem de pontos de medição ao redor dos $\vec{v}g_i$	64
5.1	Metodologia baseada no conceito de sub-regiões para a calibração de robôs	65
5.2	Modelo IDEF0 da Metodologia de Calibração de Robôs Industriais	66
5.3	Modelo IDEF0 da Etapa de Modelagem	67
5.4	Modelo IDEF0 da Etapa de Medição por Sub-Regiões	68
5.5	Modelo IDEF0 da Etapa de Identificação dos Parâmetros de Erro	69
5.6	Implementação computacional do método proposto para a calibração de robôs	71
6.1	Definição sistemas de coordenadas segundo a notação DH: robô ABB IRB-140	73
6.2	Representação geométrica para o cálculo da primeira variável de junta (θ_1)	76
6.3	Variáveis da posição inicial do robô ABB IRB-140 no controlador IRC5	79
6.4	Validação do modelo cinemático analítico e o nominal(IRC5)	80
6.5	Posturas geradas em Matlab	81
6.6	Erro Volumétrico entre o Modelo Analítico e o Nominal	81
6.7	Eliminação das redundâncias nos parâmetros de erro	84
6.8	Pontos aleatórios no espaço de trabalho do robô: a) Vista superior e b) Vista em 3D	85
6.9	Pontos escolhidos para efetuar a calibração tradicional: a) Vista superior e b) Vista em 3D ..	86
6.10	Pontos medidos nas sub-regiões escolhidas: a) Vista superior e b) Vista 3D	88
6.11	Vetor de erro médio calculado a partir dos valores identificados em cada sub-região	89

6.12	Região de avaliação para a calibração do robô: a. vista superior e b. Vista 3d.....	91
6.13	Comparação do erro médio resultante dos dois métodos de calibração	92
7.1	Definição sistemas de coordenadas segundo a notação MDH: robô Fanuc 200i	94
7.2	Setup do <i>Laser-Tracker</i> e o Robô Fanuc 200i	98
7.3	Medições tomadas pelo <i>Laser-Tracker</i> do PMCLab	99
7.4	Fanuc 200i: (a) Vista lateral; (b)Vista 3D; (c) Vista superior; e (d) Vista superior com SR....	100
7.5	Sub-Regiões escolhidas no espaço de trabalho do Fanuc 200i: (a) Vista superior; e (b) Vista 3D	101
7.6	Espaço de trabalho para avaliação usando o Fanuc 200i.....	102

LISTA DE TABELAS

2.1	Comparação das definições de fontes de erro.....	9
3.1	Requisitos básicos para a calibração de robôs industriais	22
3.2	Síntese de métodos para a modelagem de robôs industriais.....	22
3.3	Requisitos básicos para a calibração de robôs industriais	23
3.4	Breve sumário dos trabalhos analisados na Subseção 3.4.1	35
3.5	Breve sumário dos trabalhos analisados na Subseção 3.4.2	39
3.6	Breve sumário dos trabalhos analisados na Subseção 3.4.8	51
3.7	Breve sumário dos trabalhos analisados na Seção 3.5	55
6.1	Parâmetros geométricos do robô ABB IRB-140.....	74
6.2	Parâmetros de erro associados o robô ABB IRB-140	83
6.3	Conjunto mínimo de parâmetros de erro para o robô ABB IRB140	85
6.4	Vetor de erro identificados com a calibração tradicional.....	86
6.5	Erros de posicionamento (mm) com a calibração tradicional.....	87
6.6	Variáveis para a definição das sub-regiões	87
6.7	Erro médio na calibração por sub-regiões	88
6.8	Vetores de erro identificados em cada sub-região e o vetor de erro médio	90
6.9	Erros médios (mm) calculados na região avaliação antes e depois da calibração em cada sub-região.	91
6.10	Comparação dos valores de erro médio resultantes dos dois métodos de calibração	92
7.1	Parâmetros geométricos do robô Fanuc 200i	94
7.2	Parâmetros de erro associados o robô Fanuc 200i.....	96
7.3	Conjunto mínimo de parâmetros de erro para o robô Fanuc 200i	97
7.4	Modelo de erro identificado para o robô Fanuc 200i	101
7.5	Modelo de erro identificado para o robô Fanuc 200i	102
7.6	Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 1 - Fanuc 200i.....	103
7.7	Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 2 - Fanuc 200i.....	103
7.8	Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 3 - Fanuc 200i.....	104
7.9	Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 4 - Fanuc 200i.....	104
7.10	Resultados da precisão da avaliação do experimento 5 - Fanuc 200i	104
7.11	Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 6 - Fanuc 200i.....	105
A.1	Artigos publicados pelo autor com relação direta ou indireta a esta pesquisa	124

LISTA DE SÍMBOLOS

AACMM	Articulated Arm Coordinate Measuring Machine
ABB	ASEA Brown Boveri
CMM	Coordinate-measuring machine
CNC	Computer Numerical Control
CPC	Complete and Parametrically Continuous
CPL	Common Perpendicular Line
DH	Denavit-Hartenberg
DOF	Degrees Of Freedom
FIS	Finite and Instantaneous Screw
IDEF	Icam DEFinition for Function Modeling
IMU	Inertial Measurement Unit
IPS	Identifiable Parameters Separation
ISO	International Organization for Standardization
L-M	Levenberg–Marquardt
LSM	Least Square Methods
MDH	Modified DH
PCB	Printed Circuit Board
POE	Product Of Exponentials
PSO	Particle Swarm Optimization
RMIS	Robot-assisted Minimally Invasive Surgery
ROS	Robot Operating System
SVD	Singular Decomposition Value
VIM	Vocabulaire International de Métrologie - JCGM 200:2012

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nesse capítulo se apresenta o contexto que motivou o desenvolvimento e a validação teórica e prática desta tese de doutorado, assim como um resumo orientativo da hipótese que foi comprovada ao longo deste manuscrito. Além disso, será apresentado o detalhamento das atividades específicas que foram feitas através do referido objetivo geral e os objetivos específicos. Finalmente, são relacionadas as contribuições geradas neste projeto de doutorado, mediante uma metodologia adequada aos requisitos da indústria, possibilitando a obtenção dos resultados necessários para a inserção na literatura do conceito de medição por Sub-Regiões nos procedimentos da calibração de robôs industriais.

1.1 Contexto

No ambiente competitivo do mercado atual, os sistemas de produção exigem um alto nível de flexibilidade para se adaptar às mudanças e demandas dos clientes, com baixos custos de fabricação e garantia de aumento de produtividade. Portanto, as indústrias aeroespaciais e automotivas estão investindo progressivamente em automação e robótica, aumentando a produção e atendendo às demandas sem deixar de conservar os requisitos estritos de qualidade [1]. Nos últimos anos, a tecnologia de manufatura moderna baseada em robôs industriais para sistemas de fabricação inteligentes, flexíveis e altamente automatizados evoluiu de forma rápida no mundo, em particular na indústria de fabricação de equipamentos pesados e de alta tecnologia. Portanto, a precisão do posicionamento dos robôs industriais afetou diretamente a qualidade e a eficiência da fabricação desse tipo de equipamentos [2].

Os robôs industriais são um componente importante na automação da manufatura moderna, integrando tecnologias multidisciplinares como mecanismos, eletrônica, controle, computação, sensoriamento, inteligência artificial etc. Atividades produtivas como soldagem, pintura, montagem, operações submarinas e embalagem têm se beneficiado com a incorporação de robôs industriais na linha de produção [3, 4].

Uma alternativa para melhorar o posicionamento dos manipuladores é a integração de sistemas de metrologia, como sensores de força, encoders de junta, *Laser-Tracker* (LT) para medir continuamente as posições do robô e os parâmetros de rigidez e defeitos mecânicos. No entanto, não é suficiente a integração de equipamentos de medição de alta precisão, é necessário introduzir o conceito de calibração de robôs industriais para melhorar a precisão nos processos mencionados [5]. Em consequência, um conjunto de

parâmetros de compensação é criado para corrigir a posição do robô e, portanto, seus movimentos [1].

A precisão da posição do robô desempenha um papel muito importante em aplicações industriais avançadas [6], pois o valor real dos parâmetros geométricos é diferente do valor nominal informado pelo fabricante de robôs. Isto ocorre devido à existência de erros de fabricação, erros de montagem, mudanças ambientais e outros fatores. A união destas fontes de erro leva ao erro de posicionamento final do efetuador [7]. Portanto, a distribuição de robôs industriais nas indústrias é restrita, devido à aplicação final e a precisão dos robôs, assim como o espaço de trabalho ou carga máxima [8].

Como foi mencionado anteriormente, os robôs industriais são um elemento chave dos sistemas de fabricação inteligente e em cada aplicação os robôs precisarão de características específicas, por exemplo, na robótica cirúrgica os manipuladores requerem uma precisão que talvez para aplicações industriais de grande porte não seja necessária [9]. No entanto, sem importar a aplicação existe uma condição evidente na calibração de robôs industriais, a diferença entre o modelo nominal e o robô físico, o que será detalhado posteriormente. O objetivo principal da calibração de robôs é encontrar um modelo adequado para compensar os erros do modelo nominal, considerando os requisitos das aplicações a serem desenvolvidas pelos robôs industriais [10].

O conjunto de parâmetros definidos para serem compensados são conhecidos como parâmetros *cinemáticos e dinâmicos*, sendo parte do modelo dos manipuladores, os quais influenciam a precisão do posicionamento desejado do efetuador. Dessa forma, é possível identificar os erros de posicionamento de um robô por meio dos parâmetros cinemáticos. Sendo assim, a calibração de parâmetros cinemáticos é um método eficaz para melhorar a precisão dos robôs industriais [11]. O sistema utilizado para a calibração de manipuladores em ambientes reais (fora de laboratórios de pesquisa) deve ser flexível para ter compatibilidade com qualquer tipo de dispositivo de medição, especialmente os dispositivos que têm menor custo financeiro garantindo sua flexibilidade de aplicação no setor acadêmico e produtivo.

As fontes de erro de posicionamento do manipulador são minimizadas em um ambiente de trabalho controlado, ou seja, onde variáveis do ambiente de trabalho do manipulador são constantes, por exemplo, a temperatura. Portanto, é necessário um método de calibração flexível quanto à variação das dimensões dos elementos estruturais do robô real considerando a maior quantidade possível de fontes de erro que afetam o posicionamento do efetuador, introduzindo um conceito conhecido na literatura como calibração *on-line* [12]. Este método *on-line* tem ganhado atenção da indústria, por exemplo, nos sistemas de inspeção onde o robô industrial tem um sensor óptico montado no efetuador de modo que executam simultaneamente a calibração do manipulador [13].

Comparados aos robôs seriais, os robôs paralelos podem potencialmente alcançar maior rigidez e agilidade, uma vez que há mais de um elo conectado ao efetuador e os atuadores pesados (motores) geralmente não precisam ser montados diretamente nas articulações, reduzindo significativamente a massa e a inércia do mecanismo. Portanto, essas características resultam em uma precisão maior dos mecanismos paralelos em comparação com as contrapartes seriais, devido à não acumulação de erros das juntas [14], considerando também que os erros de fabricação e as folgas nas juntas são os principais fatores de imprecisão [15].

Nas indústrias de fabricação, os robôs industriais têm sido amplamente utilizados para realizar tarefas complexas e de alta precisão garantindo um trabalho eficiente e de alta qualidade. Porém, os robôs têm

erros inerentemente de precisão e a calibração é o método mais barato e eficiente para reduzir os erros de posicionamento [16].

Os desafios dos atuais procedimentos para a calibração de robôs industriais estão relacionados a tarefas demoradas, tediosas e caras que as indústrias nem sempre são capazes ou estão dispostas a assumir, por exemplo, grande quantidade de medições com equipamentos complexos e custosos necessários para a calibração, ainda mais considerando o surgimento da indústria 4.0, exigindo por parte das indústrias processos de inspeção mais rápidos, mantendo a qualidade e reduzindo custos de produção [17].

1.2 Resumo orientativo da proposta

Considerando que os métodos de calibração de robôs estão em contínua evolução, seguindo as tecnologias e teorias que possam melhorar a precisão de posicionamento de robôs, cada vez mais os métodos de calibração com maior grau de maturidade se tornam uma solução universal [7]. Portanto, a seguir serão indicados os quesitos que foram parte do projeto de doutorado, no intuito de contribuir no desenvolvimento dos métodos de calibração para manipuladores industriais.

1.2.1 Motivação

A motivação para a escolha do tema e o desdobramento das atividades que levaram aos resultados alcançados nessa tese de doutorado considerou a seguinte pergunta:

Como desenvolver e implementar uma metodologia para a calibração de robôs industriais que permita diminuir o erro de posicionamento a partir de uma análise numérica em pequenos volumes de medição, dentro do espaço de trabalho do manipulador e de fácil medição, garantindo a precisão requerida em processos associados à indústria aeroespacial e automotiva, assim como a flexibilidade para ser integrada na linha de produção sem afetar a operação?

1.2.2 Hipótese a comprovar

Considerando a pergunta feita anteriormente, é importante realçar que os requisitos das indústrias quanto à precisão dos robôs são cada vez maiores, demandando robôs cada vez com mais precisão, portanto, os métodos de calibração de robôs precisam ter flexibilidade suficiente para se adaptar a essas demandas do mercado. As soluções industriais atuais são onerosas e a implementação é complexa, o que torna a calibração contínua no local de trabalho uma tarefa improvável [16], exigindo a evolução dos procedimentos de calibração. Portanto, a hipótese comprovada nesta tese de doutorado foi processar e avaliar as medições locais no espaço de trabalho do robô que permita o uso de qualquer tipo de instrumento de medição garantindo alta precisão em pequenos volumes de medição, sem alterar a operação das linhas de produção onde os robôs são utilizados.

Já na parte de compensação dos erros de posicionamento é necessário que os sistemas de controle proprietários possam ser adaptados aos procedimentos de calibração, permitindo uma compensação que garanta os critérios da aplicação. Em consequência, o desenvolvimento de uma metodologia de calibração

deve ser compatível com arquiteturas abertas e fechadas de controle para robôs industriais permitindo analisar numericamente os resultados da calibração em pequenos volumes de medição, dentro da área de trabalho do robô, e avaliar os erros de posicionamento após a calibração, considerando que a solução proposta é flexível nas condições do ambiente de produção e que possa se adaptar às demandas do mercado.

1.2.3 Objetivos

1.2.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar uma metodologia para a calibração de robôs industriais que permita fazer a identificação dos erros de posicionamento a partir de medições processadas e analisadas em pequenos volumes de medição, obtendo uma alternativa que permita integrar instrumentos de medição de baixo custo e flexíveis, considerando os requisitos de precisão de aplicações industriais (indústria automotiva e aeronáutica).

1.2.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral proposto no presente trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Fazer a modelagem do robô ABB IRB-140 através de matrizes de transformação homogênea, validando com o modelo nominal embarcado no controlador do robô físico;
- Gerar o modelo de erro otimizado do robô ABB IRB-140 com os parâmetros cinemáticos adequados;
- Desenvolver a comunicação entre o algoritmo de identificação e o controlador IRC5 do robô ABB IRB-140 ;
- Simular e processar os erros de medição para estabelecer os erros de posicionamento do efetuador;
- Identificar os valores dos parâmetros cinemáticos do modelo de erro e analisar os valores obtidos considerando o conceito de sub-regiões;
- Fazer a modelagem de um robô Fanuc 200i através de matrizes de transformação homogênea e gerar o modelo de erro paramétrico otimizado;
- Identificar os valores dos parâmetros de erro do robô Fanuc 200i e analisá-los utilizando o conceito de sub-regiões, através de medições reais com um *Laser-Tracker*;
- Avaliar o erro de posicionamento segundo os resultados no cenário simulado (ABB IRB-140) e prático (Fanuc 200i) com a metodologia de calibração proposta baseada no conceito de medição sub-regiões.

1.3 Contribuições

A seguir se relacionam as contribuições geradas nessa tese de doutorado:

- Método para a avaliação da cinemática inversa analítica e do modelo nominal embarcado no controlador de um robô industrial;
- Metodologia para a calibração de robôs industriais através de medições em pequenos volumes que possibilite a integração de qualquer sistema de medição;
- Validação do erro de posicionamento depois da calibração baseada em pequenos volumes de medição com valor inferior à precisão exigida na indústria automotiva, especificamente em processos de inspeção tipo *Body in White (BIW)*, com tolerância de $\pm 1,5$ mm [18]. Enquanto na indústria aeronáutica, o processo *Incremental Sheet Metal Forming (ISMF)* requer um nível de tolerância de $\pm 0,5$ mm [19];

1.4 Publicações

Artigos publicados por este autor estão relacionados a esta pesquisa ou têm relação indireta, e estão listados na Tabela A.1 do Apêndice A.

1.5 Estrutura do Documento

O presente relatório está composto por oito capítulos com informação relevante para o desenvolvimento do projeto de doutorado e os resultados obtidos na elaboração da metodologia de calibração proposta. Inicialmente no Capítulo 2 são apresentados os conceitos e etapas básicas da calibração de robôs industriais, assim como as abordagens consideradas na presente pesquisa. Uma extensa revisão de literatura com os mais recentes trabalhos correlatos é desenvolvida no Capítulo 3, com o intuito de realçar a contribuição da proposta de doutorado. Em seguida, no Capítulo 4 é descrita a definição de sub-regiões, já no Capítulo 5 é discutida a metodologia proposta, enquanto os resultados associados à calibração de robôs industriais usando o conceito de sub-regiões são apresentados no Capítulo 6 e 7. Finalmente, as conclusões e trabalhos futuros são descritos no Capítulo 8.

Capítulo 2

CALIBRAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS

A calibração de robôs industriais é importante para diminuir o erro de posicionamento do efetuador e dessa forma cumprir com requisitos de aplicações específicas. O erro de posicionamento de forma geral ocorre pelo fato de que o modelo nominal do controlador do robô e as especificações técnicas do robô não incluem as fontes de erros derivados da fabricação ou da montagem [6]. Portanto, são necessários métodos de compensação dos erros para melhorar a exatidão dos robôs industriais.

Existem duas abordagens principais para melhorar a precisão dos robôs: (i) calibração em malha aberta ou *off-line* e (ii) calibração em malha fechada ou *on-line* [20, 21]. A calibração em malha aberta é conhecida por identificar facilmente os parâmetros cinemáticos do robô e obter melhores resultados de calibração, sendo amplamente utilizada para aplicações industriais. No entanto, os equipamentos de medição necessários para a calibração são caros. Por outro lado, o processo de identificação de parâmetros na calibração em malha fechada é difícil, mas os dispositivos de medição utilizados podem ser econômicos e convenientes. As principais desvantagens da maioria dos métodos de calibração de malha fechada são a quantidade de tempo necessária para a calibração, assim como a baixa precisão atingida. Atualmente, os métodos de calibração em malha fechada não são amplamente utilizados na indústria, já que várias empresas do setor da robótica fornecem serviços de calibração de robôs em malha aberta, mas isso é apropriado apenas para clientes com um ou poucos robôs e a implementação de equipamentos de medição em ambientes industriais complexos é difícil e demorada. Portanto, métodos de calibração *off-line* que sejam econômicos tem boa probabilidade de serem comercializados e utilizados pela indústria da manufatura [22].

O processo de calibração segundo a literatura compreende usualmente quatro passos, sendo estes a modelagem, a medição, a identificação e a compensação [15, 16, 20, 23, 24, 25]. Para outros autores a calibração de robôs industriais só envolve três passos [26], deixando de lado a compensação só para quantificar a diminuição do erro depois de implementar o método proposto.

De fato, igual às digitais dos seres humanos, cada braço robótico tem seu próprio grupo de características geométricas, inclusive entre robôs do mesmo modelo, deste modo essas características podem ser consideradas como uma “assinatura do manipulador”. Tais variações requerem um procedimento para a calibração de características geométricas ou parâmetros cinemáticos para depois levar em conta a com-

pensação dos parâmetros de uma modelagem complexa [27, 28]. Em empresas de manufatura os robôs industriais têm sido amplamente utilizados para realizar tarefas complexas e de alta precisão, o que prioriza o uso de métodos para aprimorar a precisão dos manipuladores.

Os parâmetros de desempenho, em geral, são atribuições que qualificam um método de ensaio considerando suas características funcionais [29]. Já no desempenho dos manipuladores existem dois critérios de avaliação utilizados segundo a norma ISO 9283 [30], sendo estes a repetibilidade e a precisão. Esses dois critérios tem um papel importante em várias aplicações com robôs industriais, mas os erros de posicionamento são maiores que a repetibilidade na programação *off-line* devido a fatores como as tolerâncias mecânicas, erros de montagem e deformações elásticas [31]. Os critérios mencionados vão ser explicados em maior detalhe nas próximas seções.

No entanto, os robôs são naturalmente imprecisos e a calibração é o método mais barato e eficiente para diminuir o erro de posicionamento [16]. A calibração de manipuladores industriais é um processo meticuloso, no qual procedimentos sistemáticos estão envolvidos de acordo com o método de calibração a ser utilizado [32]. A seguir são descritas as fontes de erro e os tipos de calibração, além dos quatro procedimentos necessários para alcançar a calibração de um robô serial.

2.1 Fontes de Erro e Tipos de Calibração

Os robôs industriais normalmente têm alta repetibilidade, mas a precisão é relativamente baixa. Segundo várias pesquisas desenvolvidas na avaliação do desempenho de robôs manipuladores os erros geométricos são responsáveis por 90% do erro de posicionamento total dos robôs [33, 34]. Outros autores afirmam que os erros geométricos são responsáveis por 95% do erro de posicionamento do manipulador [35].

Na maioria das vezes, a origem da falta de exatidão inclui erros geométricos e não geométricos. É amplamente conhecido que os erros geométricos do manipulador fazem parte de inevitáveis imperfeições e erros de montagem, assim como do desgaste natural dos mecanismos do robô. Os erros não geométricos são gerados pela mudança de temperatura, erros de deformação, folga, fricção etc. Sendo uns dos dois tipos de fonte de erro que levam à falta de exatidão do robô, sendo que os erros geométricos tem um papel dominante. Alguns trabalhos tem validado que os erros não-geométricos são responsáveis por apenas 8-10% do erro de posicionamento total [10, 36].

A maioria de trabalhos consideram só os erros geométricos devido ao fato que os erros não geométricos mudam de um robô a outro [37]. Os erros geométricos do robô não são influenciados pela posição do efetuador, enquanto a exatidão do efetuador é motivada pelos erros geométricos [10, 36]. Em consequência, esta proposta de doutorado vai se restringir à análise dos erros geométricos.

Os erros de posicionamento de um robô industrial podem ser divididos em dois grupos [6, 26] sendo o primeiro os erros geométricos ou erros associados com os parâmetros cinemáticos, como o comprimento dos elos ou erros de fabricação. O segundo grupo é composto pelos erros não geométricos ou erros não-cinemáticos, como os erros causados pela deformação, temperatura, medição, fatores ambientais, fricção, folga, desgaste e etc [28]. Além disso, existem estudos que descrevem a estrutura e as juntas do robô como

componentes não rígidos, implicando que a posição do efetuador seja afetada pela deflexão dos componentes do manipulador especialmente quando forças externas são aplicadas no sistema. Essas diferenças também fazem parte dos erros não-cinemáticos [38]. Na Figura 2.1 são apresentados os dois grupos de fontes de erro que tem sido utilizados por autores da área da calibração de robôs industriais.

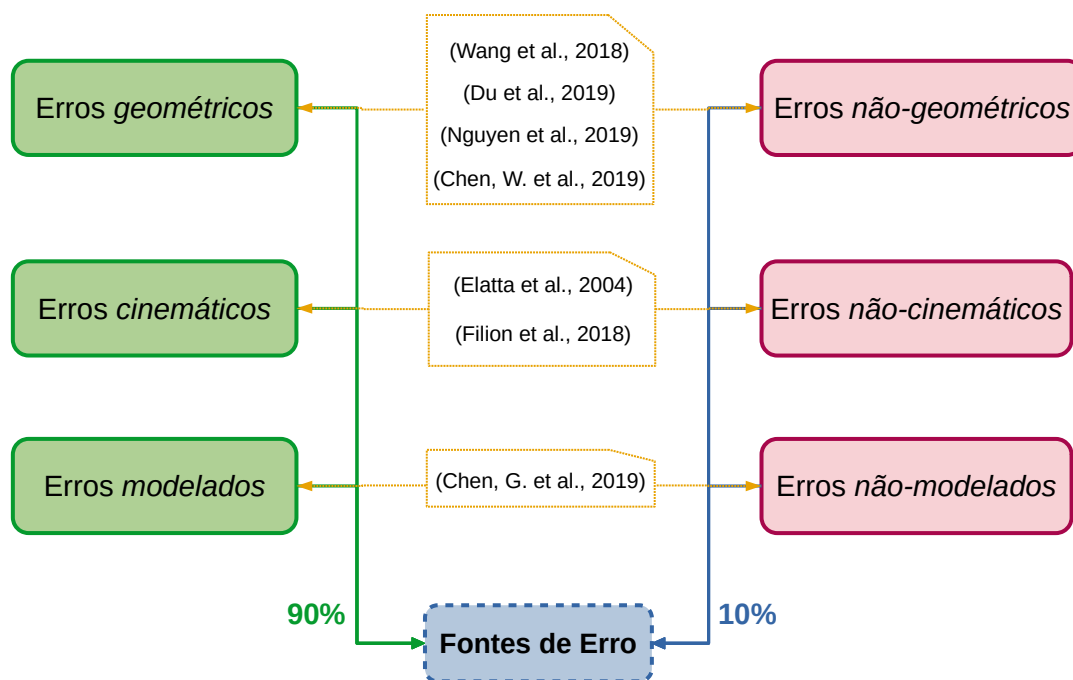


Figura 2.1: Definições e Classificação das Fontes de Erro

Com a distinção feita por vários autores segundo a fonte de erros para a calibração de manipuladores é viável comparar as definições dos autores, deduzindo que sem importar a denominação dada pelos autores a definição dos tipos das fontes de erro é semelhante. A Tabela 2.1 apresenta algumas definições associadas com os erros derivados de modelagem complexa, permitindo concluir que o nome dado pelos autores não representa diferenças de conceito.

Tabela 2.1: Comparação das definições de fontes de erro

Autor	Definição de Fonte Erro
Nguyen et al. [6]	Erros não geométricos
	Como erros de transmissão na engrenagem, folgas na engrenagem e deformação do braço, que são difíceis de considerar geometricamente em um modelo cinemático existem outras fontes de erro não geométricas que afetam significativamente a precisão do robô; portanto, não é recomendável desconsiderar nenhum parâmetro de erro não geométrico. O modelo de deformação das juntas (em inglês: <i>compliance</i>), em uma configuração estática do robô, pode se definir como o torque da junta do robô que gera uma deformação por torção em torno de um eixo de rotação (que representa o sistema de acionamento do motor e o elo associado).
Filion et al. [38]	Erros não cinemáticos
	A estrutura e as articulações do robô são componentes não rígidos. Essa flexibilidade implica que a posição do efetuador é afetada pela deflexão dos componentes do robô, especialmente quando forças externas são aplicadas. Essas diferenças são conhecidas como erros não cinemáticos.
Chen et al. [7]	Erros não modelados
	Incluindo folga nas juntas, expansão térmica e ruído na medição. Embora esses erros não modelados ocupem uma pequena proporção no erro de posicionamento do manipulador, afetarão significativamente o desempenho da calibração. De fato, os erros não modelados são difíceis de eliminar. Considerando que os efeitos dos erros não modelados são diferentes ao usar posturas diferentes, é possível reduzir o impacto dos erros não modelados escolhendo as posturas apropriadas. Outro fator é a diferença na capacidade de mapear erros dos parâmetros cinemáticos em diferentes posturas (posição e orientação do efetuador).

Segundo Shan e Cheng et al. [39] as fontes de erro para as estruturas podem ser definidas em duas classes, sendo estes erros estáticos e dinâmicos. Os erros estáticos estão associados aos já mencionados erros geométricos, enquanto os erros dinâmicos estão relacionados aos erros não-geométricos [39]. Só que as palavras “estático” e “dinâmico” podem ser confundidas com outras definições da robótica, como a resposta dinâmica [40], correção dinâmica [41], dinâmica do robô [42] etc.

Existem diferentes fatores que influenciam o desempenho associado ao posicionamento final de manipuladores industriais, como os aspectos mecânicos e os sistemas de controle gerando a classificação das fontes de erro (cinemáticos e não cinemáticos). Com esses dois grupos de fontes de erro é possível identificar três tipos de calibração para robôs industriais. Na Figura 2.2 são descritas as fontes de erro mais comuns e a distribuição segundo os tipos de calibração que tem evoluindo conforme os requisitos da indústria.

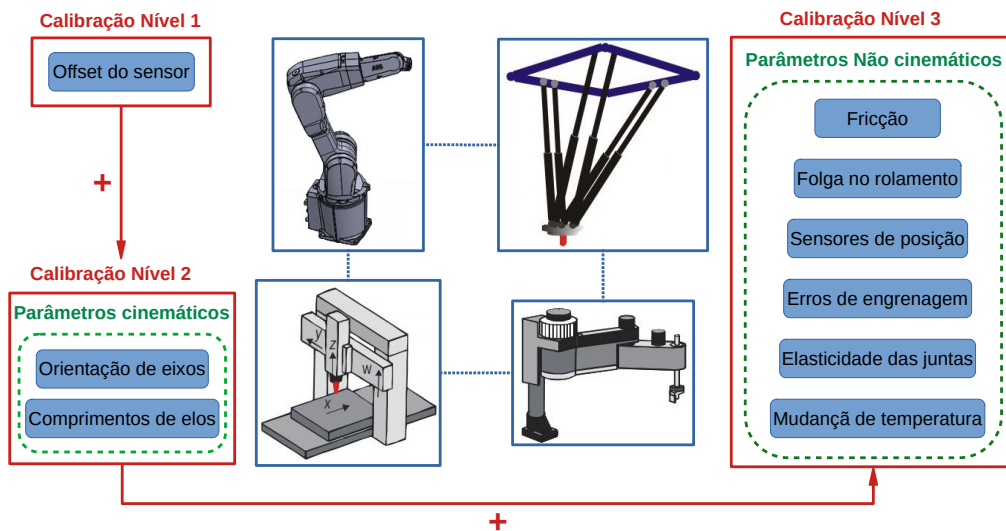


Figura 2.2: Fatores externos que influenciam a precisão do robô
Adaptada de: Wollnack [43]

Na literatura são definidas três categorias de calibração derivadas das fontes de erros detalhadas anteriormente [38, 44, 45]. A seguir são apresentadas as características associadas com cada nível:

Nível 1: O nível básico é conhecido como calibração de nível de junta, que se concentra apenas na determinação de posições zero no espaço da junta, assumindo que outros parâmetros geométricos são ideais [46]. Os únicos erros considerados são os compensados nas variáveis articulares das juntas;

Nível 2: Definido como nível avançado, será responsável pela compensação de erros geométricos no espaço cartesiano [46]. Inclui o nível 1, considerando também todos os erros cinemáticos;

Nível 3: Também chamado como calibração não-cinemática [47]. Inclui os dois níveis mais baixos e acrescenta a consideração dos erros não cinemáticos.

Existem os erros residuais não lineares, definidos por Zhao et al. [48] como os erros que não conseguiram ser identificados depois de fazer uma calibração Nível 2. Existem duas fontes principais de erros residuais não lineares, sendo o desempenho não linear de erros paramétricos em diferentes configurações de robôs e os erros não-paramétricos devido a erros de rigidez, folga, realimentação não uniforme do codificador e etc.

Segundo Cai et al. [49] existem duas categorias que agrupam os métodos para calibração de robôs industriais, sendo consideradas no modelo e sem o modelo. Nos métodos de calibração sem modelo, como as Redes Neurais Artificiais, não há necessidade de criar modelos cinemáticos exatos e compensar os parâmetros nominais no software de controle. Esses métodos de calibração sem modelo concentram-se na construção da relação entre erros de posição dos robôs e o espaço de trabalho ou espaço conjunto, e se caracterizam por ter apenas três etapas compostas por medição, previsão e compensação.

Existem técnicas pouco exploradas que permitem modelar os erros da distância entre duas posturas do robô para depois implementar a calibração do manipulador. Zhang et al. [2] define o modelo de minimi-

zação do erro de distância entre dois pontos como uma condição de restrição para calibrar os parâmetros cinemáticos do robô. No entanto, esse modelo não precisa obter a transformação de coordenadas entre o robô e o sistema de medição, e desta forma, o controle em malha fechada do sistema de medição externo não pode ser realizado fazendo com que a exatidão de posicionamento do robô não possa ser melhorada. Em consequência, os erros intrínsecos aos processos efetuados pelos manipuladores são relevantes não só dentro do procedimentos da calibração, mas também são importantes na classificação dos tipos de calibração segundo as fontes de erro a serem compensadas.

Existem outros tipos de modelagem que permitem melhorar a exatidão em operações específicas como a usinagem com robôs industriais, através da diminuição da deflexão do efetuator causada por forças externas próprias de processos CNC [50]. Esses tipos de modelagem são conhecidos como modelos de rigidez estática, que possibilitam compensar as posturas do robô em relação à gravidade e a fricção das juntas, e os modelos de rigidez dinâmica que consideraram parâmetros inerciais e de amortecimento. No caso, o trabalho descrito por Xu et al. [51] definiu um modelo estático que permitiu descrever e avaliar as deflexões do efetuator causadas por fatores como torções externas, compensadores de gravidade e o peso dos elos de robôs de grande porte, utilizados para usinagem. Como alternativa aos modelos de rigidez, foi proposto por Lin et al. [52] um método baseado no índice de erro de contorno para otimizar a postura do efetuator do robô e melhorar a qualidade da usinagem, considerando tanto as forças de corte quanto a rigidez associada a uma determinada postura, assim como os parâmetros cinemáticos do manipulador.

Também foram propostos modelos que permitem o controle em tempo real para prever a estabilidade em malha fechada de robôs industriais, através da identificação de parâmetros associados à massa, amortecimento e rigidez em sistemas de segunda ordem, ou superior, que possibilitam avaliar a resposta dos robôs. Como exemplo, a proposta feita por Cvitanic e Melkote [53] onde foram identificados a vibração da estrutura do robô e o atraso do controlador como principais fontes de erro da movimentação. De igual forma, foi introduzida a conversão de comandos da posição do robô em tempo real em forças resultantes, utilizadas como entradas no modelo dinâmico baseado na Regressão do Processo Gaussiano para prever o erro vibracional associado a um determinado comando dos robôs industriais. Nesse contexto, mesmo que não sejam considerados no escopo desse trabalho, esses tipos de modelagem podem trazer outra perspectiva para a calibração de robôs em tempo real, incorporando informação geométrica, de rigidez, inercial, amortecimento etc. [54].

2.2 Padrões de desempenho

A avaliação de desempenho de um manipulador se caracteriza por comprovar que o robô está na capacidade de desenvolver as atividades para as quais foi fabricado. Os robôs industriais são máquinas feitas para mover materiais, peças, tochas, câmeras etc. Dessa forma é possível com uma avaliação de desempenho obter uma medida da eficácia do manipulador na execução de atividades específicas [55].

Como foi mencionado anteriormente o desempenho posicional dos robôs industriais é geralmente classificado em dois aspectos, sendo estes a repetibilidade e a precisão, mas não há garantia que a repetibilidade seja uniforme ao longo do espaço de trabalho do manipulador [56]. A programação *off-line* se caracteriza por ter baixa precisão [57], onde a calibração de robôs é comumente utilizada na indústria moderna como

um método eficaz para melhorar a precisão dos manipuladores na programação *off-line* [31].

A repetibilidade, conforme a definição na ISO 9283 [30], é usada por todos os fabricantes de robôs industriais, e se refere apenas à repetibilidade unidirecional, ou seja, a capacidade de retornar à mesma postura na mesma direção, quantificando os efeitos da folga nos mecanismos. Contudo, existe outro tipo de repetibilidade multidirecional, podendo ser o dobro da repetibilidade unidirecional ou até maior [58].

Ao longo do presente relatório serão adotados os termos precisão e exatidão conforme os conceitos expressos abaixo, de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (em inglês: *International Vocabulary of Metrology - VIM*) [59]:

- **Precisão:** definido como o grau de concordância entre valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas, sendo geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação;
- **Exatidão:** definido como o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando, considerando que a exatidão não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico.

A precisão é uma das especificações de desempenho mais importantes para robôs industriais [24, 31]. Portanto, a forma de quantificar essa precisão e de acordo com o princípio descrito na norma ISO 9283, é com o erro de posição e erro de orientação, considerados como padrões de avaliação do erro da postura do robô. Na Figura 2.3 são apresentadas as definições associadas com a norma ISO 9283:1998.

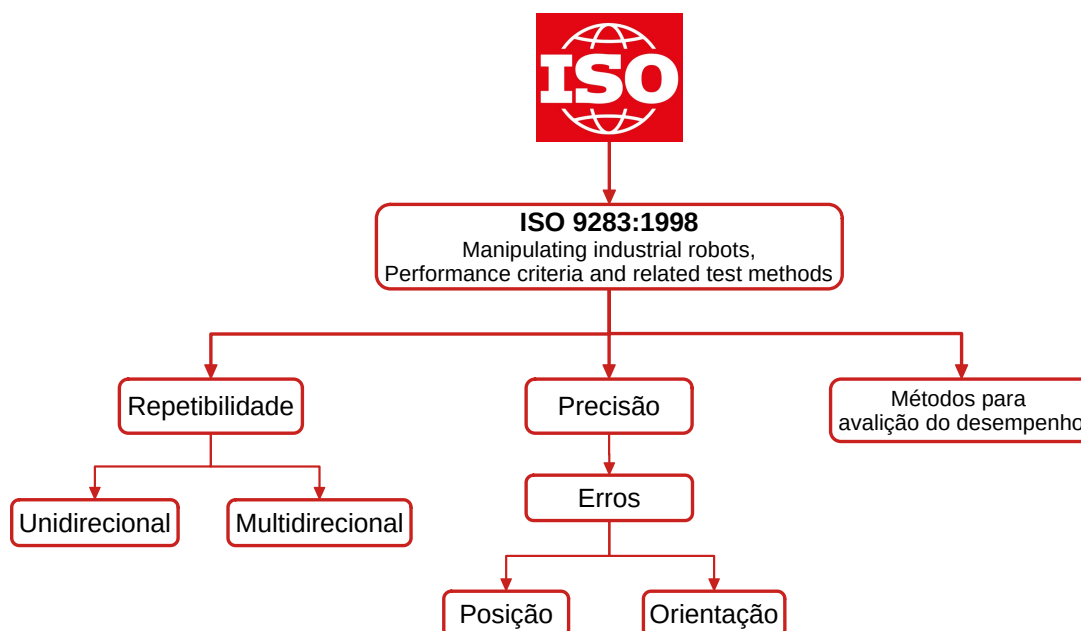


Figura 2.3: Critérios de desempenho e métodos de avaliação relacionados (ISO 9283:1998)

A exatidão de um manipulador é afetada pelos mesmos fatores que a repetibilidade multidirecional, mas é influenciada principalmente por imprecisões geométricas e a elasticidade presentes nas juntas e nas

transmissões da estrutura do robô. Só que esses dois tipos de erros podem ser modelados até certo ponto nos procedimentos de calibração [58].

A ISO 9283 normaliza critérios e testes de desempenho robótico [8], que se referem à repetibilidade e precisão médias da posição unidirecional em cinco posturas e trinta ciclos obtidos [37]. Portanto, a norma ISO 9283 consegue definir e especificar como esses critérios de desempenho devem ser avaliados [58], evidenciando a relevância dos critérios de desempenho na calibração de robôs industriais.

2.3 Modelagem para calibração de robôs

O primeiro passo para a calibração de robôs é elaborar seu modelo matemático com o objetivo principal de relacionar o deslocamento de cada uma das juntas em relação ao posicionamento do efetuador [23]. Um robô consiste em uma série de corpos rígidos (elos) conectados por meio de juntas ou pares cinemáticos, de modo que a estrutura completa forma uma cadeia cinemática. Em uma perspectiva topológica, a cadeia cinemática é denominada “aberta” quando existe só uma sequência de juntas conectando duas extremidades da cadeia. Por outro lado, o robô tem uma cadeia cinemática “fechada” quando a sequência das juntas formam um laço. A estrutura mecânica de um robô é definida pelo número de graus de liberdade (em inglês: *Degrees of Freedom* - DOF), o que determina de forma única sua postura. Cada DOF é comumente associado com a junta e constitui uma variável da junta [60].

Existem duas formas básicas que o modelo matemático de um robô pode ter:

i) **Cinemática direta:** é associada com a relação entre cada uma das juntas do robô e a posição e orientação do efetuador, ou seja, tendo as magnitudes das variáveis de junta do robô é possível determinar a posição e orientação do efetuador;

ii) **Cinemática inversa:** consiste em encontrar o valor das variáveis cinemáticas em termos da posição e orientação do efetuador [61].

As duas formas de modelagem fazem parte do processo de calibração, mas a cinemática inversa é usada na parte de compensação. Portanto, a etapa de modelagem na calibração faz referência à cinemática direta [23]. Cabe ressaltar que a modelagem que permite aprimorar o posicionamento dos robôs industriais pode se classificar com base nas fontes de erro, apresentadas na Seção 2.1, resultando em três grupos: as modelagens cinemática, estática e dinâmica. Fontes de erros associadas com os parâmetros estruturais do robô fazem parte da primeira classificação, enquanto a modelagem estática e dinâmica consideram fatores como forças externas, a força centrífuga, a força de Coriolis, as deformações presentes nos acoplamento entre as juntas etc. [50, 4]. Nessa seção se apresentam alguns métodos de modelagem para a calibração cinemática de robôs industriais, na tentativa por modelar a maioria de fontes de erro associadas a nível cinemático e não cinemático.

São várias as características a serem consideradas na modelagem cinemática, mas quando se usam os procedimentos para a calibração do robô, o modelo cinemático precisa atender três requisitos básicos [62]:

1. **Completo:** o modelo cinemático do robô deve ter parâmetros suficientes para definir qualquer desvio possível dos valores nominais;

2. **Contínuo:** quaisquer mínima mudança na estrutura do robô deve corresponder a pequenas mudanças nos parâmetros cinemáticos;
3. **Mínimo:** evitar a redundância dos parâmetros, onde o modelo do robô só deve incluir o número essencial de parâmetros.

É possível dizer que os requisitos “completo” e “contínuo” são evidentes, enquanto o requisito “mínimo” é relativo, mas seu fundamento matemático é claro só quando os procedimentos para a identificação de parâmetros são analisados. É necessário ressaltar que as afirmações sobre o requisito “mínimo” no modelo não podem ser feitas para os parâmetros não-geométricos da modelagem, por exemplo, as deformações elásticas das juntas [20].

Os métodos para a calibração de robôs têm se tornado relevantes para várias pesquisas na área, que geralmente os classificam como calibração baseada em modelos paramétricos e não-paramétricos [63]. Os métodos de calibração baseados em modelos são comumente utilizados por suas vantagens associadas às poucas medições e algoritmos simples. Nos últimos anos, esses métodos têm sido melhorados com o uso de modernos equipamentos de medição, diferentes notações para a modelagem e técnicas computacionais avançadas [48]. Enquanto os métodos de calibração baseados em modelos não-paramétricos se caracterizam por usar procedimentos de interpolação numérica ou técnicas de inteligência artificial, como as redes neurais [63]. Os métodos de calibração tradicionais usam principalmente modelagem cinemática baseada em definições geométricas [15].

A notação Denavit-Hartenberg (DH) é uma das mais utilizadas para a modelagem nos procedimento de calibração, deduzindo as matrizes de transformação homogênea dos manipuladores, embora existam outros tipos de métodos como alternativa [64], mas a seguir se apresentam seis opções que são usadas com frequência na calibração [63]:

1. DH: é a notação mais conhecida, sendo as matrizes de transformação homogêneas a base da análise cinemática. O modelo está baseado no grupo euclidiano para representar a posição e a orientação de um corpo rígido no espaço tridimensional [45], apenas com quatro parâmetros. Porém, quando duas juntas adjacentes são paralelas, pequenas alterações podem causar mudanças drásticas na perpendicular comum entre os dois eixos, gerando singularidade no modelo e criando descontinuidade na definição geométrica [37]. Para resolver o problema da singularidade, Hayati [5] fez uma substituição de um parâmetro para descrever a relação angular das juntas paralelas, propondo o modelo DH modificado.
2. Modelo S: adicionou dois parâmetros com base na notação DH [65]. Assim, este modelo pode descrever a cinemática completamente sem singularidade, embora os parâmetros não possam ser identificados exatamente devido à redundância [66] e falta de continuidade [67].
3. CPC (*Complete and Parametrically Continuous*): o modelo pode representar elos consecutivos de maneira contínua usando seis parâmetros, três são utilizados para representar orientação e os restantes para a posição. O CPC elimina o problema de singularidade dos parâmetros na modelagem, mas a desvantagem é a inclusão de parâmetros redundantes [65, 66, 67].

4. Modelo de referência zero: define a chamada configuração de referência zero do robô o que possibilita descrever a direção e orientação de cada junta segundo essa configuração. Esse modelo simplifica o processo de modelagem, sem restringir a definição dos sistemas de coordenadas das juntas, embora a redundância dos parâmetros persista [68, 66].
5. Fórmula POE (*Product of Exponentials*): esse método é baseado no conceito do mapa exponencial derivado da álgebra de Lie. A fórmula POE pode evitar o problema de singularidade e formular as equações cinemáticas de forma compacta [45].
6. *Dual Quaternion*: é utilizado como operador de transformação e pode representar a rotação e translação de um corpo rígido no espaço simultaneamente. A vantagem dessa representação é oferecer uma maneira computacionalmente eficiente de estabelecer o modelo do robô na análise cinemática [69].

A modelagem por *Dual Quaternion* é simples de entender e tem a mesma eficiência que a álgebra de Lie na análise cinemática. Os *Dual Quaternion* podem expressar o deslocamento do efetuador em forma mais eficiente e compacta que as matrizes de transformação homogênea. Porém, a álgebra de Lie é complexa para algumas configurações de manipuladores [45].

2.4 Métodos de medição

Nesta segunda etapa da calibração de robôs industriais, um instrumento de medição ou sensor com um nível de precisão adequado deve ser utilizado, dada uma aplicação com requisitos específicos de precisão. Os métodos de calibração cinemática estão focados em encontrar estimativas dos parâmetros cinemáticos do modelo de erro, através de medições do posicionamento do robô físico [60].

A escolha de um sistema de medição apropriado, na prática, é fundamental, pois determina a qualidade dos dados experimentais e a eficiência da calibração do robô. Atualmente, o instrumento *Laser-Tracker* é o dispositivo ideal que atende a esse objetivo de calibração de manipuladores industriais [26]. No entanto, esses sistemas de medição sem contato que empregam lasers ou teodolitos são complexos de usar, custosos e requerem pessoal altamente treinado para operá-los [70]. Portanto, na escolha de sistemas de medição um dos requisitos a serem levados em conta é o baixo custo e facilidade de adaptação em ambientes industriais [9].

Segundo Hollerbach e Wampler [71] existem duas perspectivas de medição para praticar a calibração, o sensor redundante e a restrição de movimento. A primeira técnica é baseada em dispositivos eletrônicos de baixo custo que possibilitam medir de forma redundante a posição e a orientação das juntas do manipulador, desta forma, os valores obtidos dos parâmetros cinemáticos são processados. Uma restrição com o uso desses sensores é garantir que as condições do ambiente de trabalho sejam constantes (iluminação, temperatura, ruído etc.) para possibilitar uma leitura adequada dos dados no processo de calibração [72]. A segunda técnica se caracteriza por efetuar a medição restringindo a movimentação do robô com elementos mecânicos, seja através de contato direto no efetuador ou nas juntas do manipulador, por exemplo, o braço de medição de coordenadas ou os sistemas tipo *ballbar* [73].

Para Niu [46] existem dois cenários para a etapa de medição, sendo o primeiro responsável por obter a distância entre o efetuador e um ponto fixo no espaço de trabalho sob várias posturas predefinidas e determina os erros subtraindo as distâncias calculadas da cinemática direta e o modelo nominal. O outro cenário atua de maneira mais direta, a posição espacial 3D do efetuador é medida diretamente e comparada com a posição ideal na mesma postura para determinar o erro de posicionamento.

Para Zhao et al. [24] e Qian et al. [74] as abordagens para a calibração de robôs industriais segundo o instrumento de medição podem ser classificadas em duas categorias:

- i) auto-calibração ou calibração autônoma;
- ii) calibração externa.

A primeira categoria se determina com base em sensores que são fixados nas juntas ativa, passivas e/ou redundantes. Embora essa abordagem permita uma calibração automática e compensação *on-line*, a instalação de um grande número de sensores aumenta a complexidade do sistema e seu custo de fabricação. Portanto, esse método ainda é muito limitado em aplicações industriais. A outra abordagem é mais comum, a calibração externa é realizada minimizando o resíduo entre os valores medidos e nominais do efector final do robô, com o suporte de sensores de posição externos.

As técnicas de medição para calibração de erros cinemáticos propostas em pesquisas desenvolvidas podem ser classificadas em dois métodos segundo Guo et al. [31]. O primeiro método obtém a posição ou postura relativa do efetuador diretamente pelo equipamento de medição. Os sistemas de medição comumente utilizados são o *Laser-Tracker*, Maquinas de Medição de Coordenadas (em inglês: *Coordinate-measuring machine - CMM*), Barra de Esferas Telescópicas, sistema de medição tipo *CompuGage* etc. O equipamento de medição necessário para este método geralmente é caro e complexo. O segundo método de medição é chamado de restrição por geometria, que adiciona uma restrição ao efetuador do manipulador, seja através de ponto fixo, linha e/ou plano. Essa mesma classificação é feita por Du et al. [28], fundamentado no trabalho apresentado por Hollerbach e Wampler [71], só que dessa vez os métodos são denominados como *open-loop calibration* (medição externa) e *close-loop calibration* (por restrição).

Foram mencionadas várias definições para os tipos de calibração de robôs industriais baseados nos instrumentos de medição, porém é possível considerar as semelhanças entre os autores abordados anteriormente e classificar os métodos de medição em três categorias [36], sendo estas instrumento externo, auto-calibração e restrição de movimento. Na Figura 2.4 são apresentadas as três categorias e um exemplo do instrumento associado.

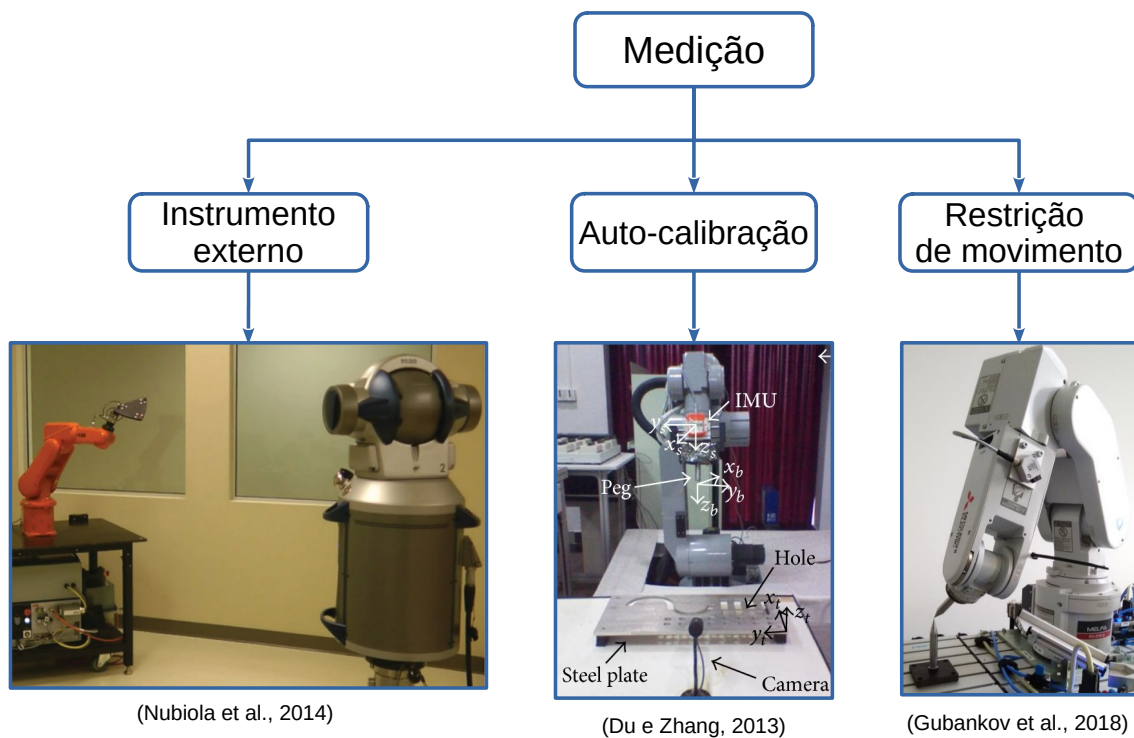


Figura 2.4: Exemplos de instrumentos de medição para a calibração de robôs industriais

Os dados da medição das posturas são relevantes para obter alta precisão e soluções robustas de identificação de parâmetros cinemáticos. No entanto, apenas um número limitado de estudos abordou diretamente o problema da medição e como a qualidade das amostras de medição pode melhorar significativamente a eficiência da calibração de robôs [26]. Outra característica que deve ser levada em conta na escolha adequada dos sistemas de medição é que os instrumentos utilizados para a medição de máquinas-ferramenta não são adequados para robôs industriais, devido às diferenças do modelo cinemático entre diferentes configurações [31].

2.5 Identificação

Uma vez que o modelo do robô industrial tem sido obtido através da notação escolhida e os dados da medição tem sido coletados por parte dos sistemas de medição, a seguinte etapa tem o objetivo de determinar o valor dos parâmetros de erro que permitam diminuir a diferença entre a configuração dos dados medidos e o modelo analítico identificado. A identificação de parâmetros tem sido estudada em profundidade ao longo do tempo, com aplicações na teoria do controle e modelagem de sistemas dinâmicos. Várias das técnicas para a identificação de parâmetros são aplicados aos métodos de calibração de robôs industriais [23].

O problema fundamental nos métodos de calibração cinemática baseados em modelos matemáticos é estabelecer e calcular o modelo de erros cinemáticos. O modelo de erro descreve a relação entre os erros dos parâmetros cinemáticos e o erro de postura do efetuador. O modelo erro utilizado para compensar os parâmetros cinemáticos precisa satisfazer os requisitos de “completo” e “contínuo”, o que pode ser cumprido

só quando o método de modelagem tem essas mesmas características. Um modelo de erro “incompleto” não tem como representar a relação entre o erro de postura e os erros dos parâmetros cinemáticos, enquanto se for “descontínuo” o modelo de erro poderia gerar condições de singularidade.

Existem duas formas para evitar a redundância de parâmetros no modelo de erro, sendo estas a construção do modelo de erro sem parâmetros redundantes e a eliminação dos parâmetros redundantes depois de elaborar o modelo de erro [63] (método de otimização de modelos cinemáticos) [75]. A Figura 2.5 relaciona os elementos básicos na etapa de identificação de parâmetros cinemáticos, usando a notação DH.

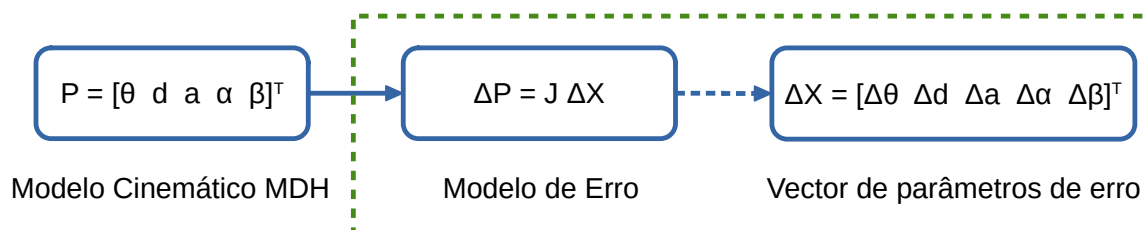


Figura 2.5: Etapa de identificação

Os métodos de identificação disponíveis podem ser classificados amplamente em duas categorias sendo estas a identificação não linear e linear [76]. Esses métodos usam linearização local dos modelos não-lineares dos robôs e, em seguida, uma solução iterativa baseada no problema dos mínimos quadrados é efetuada [77]. A identificação não linear permite estimar os valores dos parâmetros de erro, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre as posturas obtidas pelo sistema de medição e as posturas calculadas através da cinemática direta do manipulador. As abordagens comumente usadas incluem o método Newton-Gauss, o algoritmo Levenberg–Marquardt (L-M), algoritmos genéticos etc. A maioria dos erros de origem geométrica são menores do que as dimensões associadas, e a prática mais comum é o uso de mínimos quadrados na parte de identificação dos parâmetros de erro. No caso do presente trabalho é utilizado o método L-M [76].

Um dos métodos para resolver problemas de mínimos quadrados não lineares que tem sido validado com bons resultados na prática e, portanto, recomendado para soluções gerais é o algoritmo Levenberg-Marquardt. Esse método integra as propriedades de convergência rápida de outros dois métodos não lineares: o método *Hessian* e o método *steepest-descent* [77]. Portanto, o algoritmo L-M vai ser utilizado nesse trabalho para a identificação dos parâmetros de erro, devido às características mencionadas e a aceitação em vários trabalhos associados com a calibração de robôs industriais.

2.6 Compensação

Ao longo das três etapas anteriores (modelagem, medição e identificação) se descreveram os procedimentos necessários para obter uma versão melhorada do modelo nominal do manipulador. Os novos valores dos parâmetros cinemáticos poderiam ser incluídos no controlador do robô, no entanto os fornecedores de manipuladores industriais mais conhecidos como ABB, KUKA, FANUC e YASKAWA [78] tem arquiteturas de controle fechadas que restringem a modificação do sistema proprietário dos robôs [79].

No entanto, existem alternativas para usar a nova versão do modelo do robô como um tipo de controle

de trajetórias de forma paralela, enviando só as posições finais para o controlador através de métodos de comunicação Socket, por exemplo [80]. Na Figura 2.6 se apresenta o envio de trajetórias a partir de um modelo de controle feito em Matlab (Cliente) e o controlador IRC5 virtual (Servidor) através de uma comunicação tipo Socket.

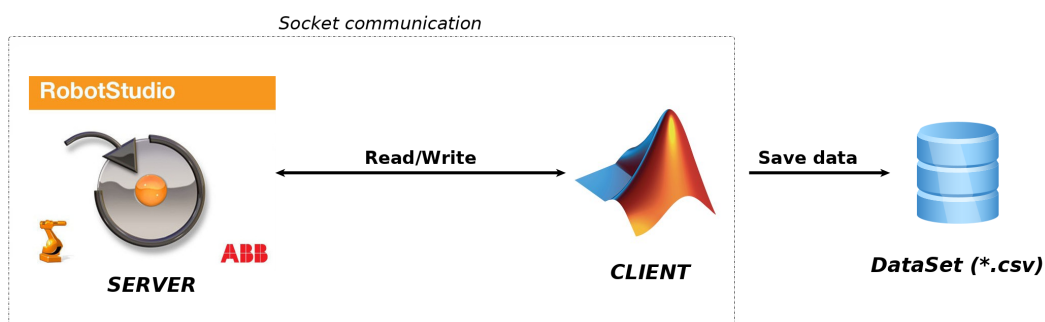


Figura 2.6: Compensação *off-line* controlador IRC5

Fonte: Toquica et al. [80]

Vários autores têm descrito e utilizado a etapa de compensação para avaliar o erro de posicionamento do robô para que a repetibilidade seja adequada através de métricas associadas com os critérios de desempenho dos manipuladores (Seção 2.2), ou seja, fazendo a compensação *off-line* sem a correção automática diretamente no modelo nominal do controlador. Na Figura 2.7 se apresenta o procedimento convencional na etapa de compensação de robôs industriais, assim como uma alternativa para a correção dos parâmetros de erro de forma automática.

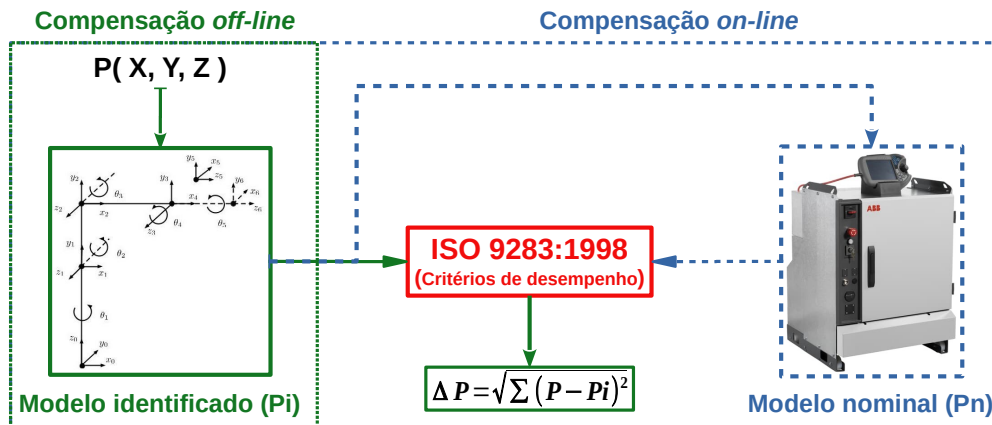


Figura 2.7: Etapa de Compensação

A etapa de compensação, nos métodos de calibração de robôs industriais, se torna uma oportunidade a ser explorada em pesquisas futuras, devido a que a compensação automática (*on-line*) não tem sido implementada até o momento [10]. Autores como Chen et al. [26] sugerem o desenvolvimento de técnicas de compensação *on-line* de erros, considerando métodos para a correção de trajetórias.

2.7 Comentários finais

A calibração de robôs industriais tem quatro etapas fundamentais, sendo estas a modelagem, a medição, a identificação e compensação, onde cada uma das etapas tem características específicas para reduzir o erro de posicionamento do robô industrial. Neste capítulo foram descritas as fontes de erro que contribuem para o erro de posicionamento do efetuador, viabilizando a categorização a partir da literatura dos três tipos de calibração: o nível básico, o avançado e a calibração não-cinemática. Junto com as características já mencionadas nos procedimentos da calibração foram descritos os padrões de desempenho para avaliar os resultados da calibração.

Também foram apresentadas neste capítulo alternativas que têm sido abordadas e as que continuam sendo utilizadas na modelagem dos robôs, assim como as três categorias na etapa de medição que dependem do tipo de instrumento utilizado, por exemplo, o *Laser-Tracker*, IMU, CMM etc. O algoritmo L-M foi introduzido junto à descrição da etapa de identificação como uma das abordagens não-lineares comumente usadas na calibração de robôs. Finalmente, foram mencionadas as duas possibilidades existentes na etapa de compensação, sendo a compensação *on-line* uma possibilidade a ser explorada em trabalhos futuros dentro os procedimentos da calibração de manipuladores.

Capítulo 3

REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Introdução

No presente capítulo é apresentada a fundamentação teórica associada à proposta de calibração de robôs industriais, tentando destacar ao longo da seção as quatro etapas tradicionais para diminuir o erro de posicionamento dos manipuladores para realçar a contribuição da proposta de doutorado. São apresentados trabalhos associados à implementação e simulação de métodos de calibração que adaptaram as etapas mencionadas contribuindo na evolução dos procedimentos de calibração. Foram sintetizados em tabelas os trabalhos analisados conforme os procedimentos de calibração utilizados e as características principais identificadas.

3.2 Considerações sobre a modelagem

As técnicas de modelagem para calibração cinemática estão se multiplicando através de pesquisas na área, mas o método MDH (em inglês: *Modified DH* - MDH) tem melhores resultados do que os métodos MCPC (em inglês: *Modified Complete and Parametrically Continuous*) e POE, no que se refere à precisão da posição e orientação do efetuador, conforme é apresentado na Figura 3.1. No entanto, é necessário mencionar que essa comparação não significa que um método é melhor que outro, já que as condições dos trabalhos analisados por Xuan et al. [63] são diferentes.

Com os requisitos para uma modelagem eficiente apresentados na Capítulo 2 (“Completo, Contínuo e Mínimo”), é possível classificar os métodos de modelagem na Tabela 3.1, visando obter uma comparação entre as diferentes notações/métodos de modelagem de robôs industriais.

Na comparação feita por Xuan et al. [63], foi incluída uma quinta coluna (Modelo nominal) que permite descrever a compatibilidade do método de modelagem com o modelo nominal embarcado nos controladores dos robôs industriais. Em outras palavras, comparar se o método utilizado na modelagem pelos fabricantes para gerar o modelo nominal do robô é o mesmo (notação/método) utilizado para modelar analiticamente o robô.

Portanto, foram considerados quatro marcas líderes na fabricação de manipuladores para a indústria

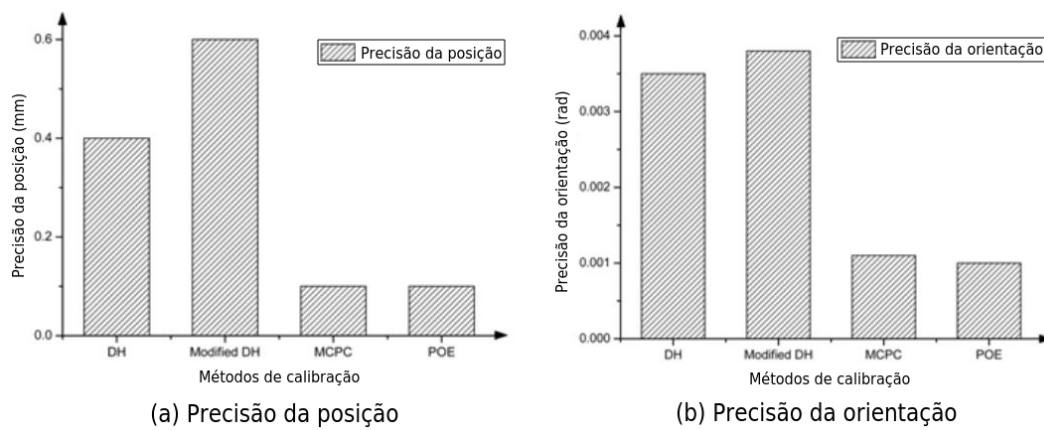


Figura 3.1: Comparação de precisão dos métodos de calibração cinemática
Adaptado de: Gang et al. [63]

Tabela 3.1: Requisitos básicos para a calibração de robôs industriais

Método/Notação	Completo	Contínuo	Não Redundante	Mínimo	Modelo nominal
Notação DH	×	×	✓	×	×
Notação MDH (Hayati)	✓	✓	✓	✓	✓
S model	✓	×	×	×	×
CPC model	✓	✓	✓	✓	×
MCPC model	✓	✓	✓	✓	×
Sistema de Referência Zero	✓	✓	×	×	×
POE fórmula	✓	✓	✓	✓	×

Adaptado de: Gang et al. [63]

[78], com o intuito de definir a quinta coluna adaptada na tabela de comparação feita por Xuan et al. [63]: ABB (Robotstudio); KUKA (SimPro); FANUC (RoboGuide); e YASKAWA (MotoSIM). Constatase, então, a importância de ter uma solução transversal a todas as arquiteturas robóticas sem dependência do sistema de controle do fabricante [80].

A partir dos trabalhos analisados, identificou-se que a notação MDH é priorizada na comparação feita [81], quando a etapa de modelagem cinemática está sendo realizada. Adicionalmente se destaca a preferência por parte dos autores dos trabalhos descritos, portanto a Tabela 3.2 apresenta uma síntese dos trabalhos que foram analisados nesse capítulo, constatando que a notação MDH foi a mais usada na etapa de modelagem. Cabe mencionar que os outros métodos para a modelagem foram rotulados como outros, simplificando a apresentação na tabela a seguir.

Tabela 3.2: Síntese de métodos para a modelagem de robôs industriais

Tipo de robô	Notação	
	MDH	Outros
Manipuladores Seriais	45 (48%)	39 (42%)
Manipuladores Paralelos	-	9 (10%)
Total trabalhos analisados:	93 artigos	

No entanto, a escolha de métodos de modelagem para a calibração cinemática deve considerar fatores como a configuração do robô, os dispositivos de medição e os requisitos finais da aplicação [63], procurando sempre a consolidação das etapas de calibração para obter soluções que acompanhem os requisitos industriais e os conceitos associados à indústria 4.0 [7].

3.3 Considerações sobre a identificação de parâmetros

Através dos artigos que foram compilados anteriormente é possível sintetizar os métodos utilizados para a identificação dos parâmetros de erro, que serão incluídos no modelo nominal do controlador ajustado ao robô real. Na Tabela 3.3 se apresenta a síntese dos métodos de identificação que foram utilizados nas pesquisas analisadas nesse capítulo.

Tabela 3.3: Requisitos básicos para a calibração de robôs industriais

Tipo de robô	Método		
	Mínimos quadrados	L-M	Outro
Manipuladores Seriais	27 (29%)	6 (7%)	51 (54%)
Manipuladores Paralelos	2 (2%)	1 (1%)	6 (7%)
Total trabalhos analisados:	93 artigos		

Da Tabela 3.3 pode-se inferir que o método dos mínimos quadrados é o mais utilizado nos procedimentos propostos da calibração de robôs industriais, no entanto o algoritmo L-M tornou-se uma técnica padrão para problemas não-lineares de mínimos quadrados [82], além de integrar as características dos métodos *steepest descent* e *Gauss-Newton* [83]. Em consequência, o algoritmo L-M foi escolhido para identificar os parâmetros de erro na metodologia proposta neste trabalho.

3.4 Calibração de robôs seriais

Os fabricantes de robôs adotaram estratégias de fabricação para facilitar a usinagem de peças com manipuladores, focando na aplicação do usuário final, mediante pacotes de software com múltiplas funcionalidades, entre outras ferramentas de programação *off-line*. A usinagem por meio de robôs é uma alternativa para o uso de tecnologias CNC, principalmente na operação de acabamento. Os projetos de robôs atuais não são completamente compatíveis com operações sujeitas a cargas elevadas, já que os mecanismos dos manipuladores poderiam ser afetados pelas forças geradas no processo de usinagem. Não obstante, em materiais de baixa densidade e aplicações relacionadas ao posicionamento de objetos, os robôs são utilizados devido à flexibilidade da estrutura mecânica [84].

Para evitar a aplicação de altos torques nas juntas dos robôs industriais, foram desenvolvidos sistemas para monitorar as forças intrínsecas na operação de usinagem, permitindo o controle da velocidade da ferramenta. Um método para compensar o erro de usinagem com robôs seriais foi proposto com base na rigidez do manipulador e na taxa de remoção do material, melhorando a precisão da usinagem real com um robô de 6-DOF, reduzindo os erros médios de 0,9mm para 0,3 mm [85].

Na fabricação avançada com manipuladores, a maioria das trajetórias geradas são descritas com dados tipo CL (em inglês: *Cutter Location*), gerados por softwares CAD/CAM, onde a dinâmica do robô é considerada, assim como o movimento das juntas é minimizado ao longo da trajetória [42]. Assim, a eficiência da usinagem com robôs é um desafio em pesquisas futuras através da otimização das variáveis inerentes aos processos industriais, onde a calibração tem um papel importante.

3.4.1 Modelos de calibração utilizando transformações homogêneas

Ha [70] propôs um método de calibração para um robô de 6-DOF usando uma placa de fixação tipo CMM (*grid plate*) para as medições nos eixos XY e um sensor laser para o eixo Z. O modelo de erro foi obtido a partir de transformações homogêneas, enquanto a medição foi feita usando duas posições e obtendo uma posição relativa como resultado da diferença entre as duas posições medidas. Na identificação dos parâmetros cinemáticos foi utilizado o método dos mínimos quadrados (LSM), enquanto a compensação dos erros foi feita de forma *off-line* segundo a descrição no documento. A informação associada com o desempenho do robô foi disponibilizada, dando como resultados da calibração a medição antes e depois da compensação com um erro RMS (em inglês: *Root Mean Square*) de zero (0,0) o que coloca em dúvida os resultados. Só foram usadas 10 medições sem nenhuma justificativa, levando em conta que para garantir um comportamento uniforme dos dados é necessário ter um mínimo de 30 medições [79]. Não foi feita uma análise das consequências de usar um volume de medição reduzido comparado ao volume de trabalho do manipulador, mas permite validar um sistema de medição de baixo custo para a calibração de robôs. Não foi especificado o número de parâmetros utilizados no modelo de calibração, mas pelo texto apresentado se pode deduzir que foram utilizados 30 parâmetros, sem uma análise sobre o número adequado de parâmetros.

Uma das alternativas na medição do posicionamento do efetuador de um robô industrial são os instrumentos de contato, como o trabalho desenvolvido por Ginani e Motta [86] que usaram um braço de medição para desenvolver e validar um sistema de calibração. Na proposta, a modelagem de uma manipulador industrial de 6-DOF foi feita com transformações homogêneas, limitando o modelo de calibração em 30 parâmetros dos quais seis deles estão associados com o sistema de coordenadas que relaciona o efetuador com o sistema de medição. Já o método utilizado para a identificação de parâmetros foi o L-M onde, segundo os autores, foram identificados 6 parâmetros, sem detalhar a condição na seleção da quantidade de parâmetros identificados, nem a influência no resultado final. Três regiões de medição foram selecionadas, calibrando o robô em cada uma dessas regiões. O erro de posicionamento foi reduzido de 1,4 mm para 0,3 mm.

O conceito de *auto-calibração* foi considerado como opção para o desenvolvimento da calibração no contexto industrial e acadêmico por Du e Zhang [87], onde um sensor IMU foi utilizado para obter informações da orientação do robô, junto com uma câmera para medir a posição do efetuador (*peg-in-to-hole*). Dessa forma, o método proposto usa a modelagem através de transformações homogêneas de um robô de 6-DOF, incluindo filtros de Kalman, Kalman estendido e o Algoritmo de Quatérnion Ponderado (FQA), para reduzir os efeitos do ruído e melhorar a precisão dos sensores IMU. O trabalho apresenta melhores resultados de experimentos, em termos de erro médio 3D (distância euclidiana para X-Y-Z) e o tempo de execução da calibração, em comparação com o método baseado em visão computacional de

Meng e Zhuang [88], onde com uma câmera conectada ao robô PUMA 560 era realizado um processo de auto-calibração semelhante.

Com a variável tempo como complemento para métodos de calibração automática, Du et al. [11] propôs um trabalho para melhorar os resultados obtidos por outros trabalhos semelhantes [89, 90, 91]. Dessa forma, foi reduzido não apenas o tempo de execução do sistema, mas também o erro na posição do efetuador com ajuda do sensor IMU (para orientação e estimativa de posição utilizado em [87]). O erro absoluto médio da posição com o sistema de visão (*peg-in-to-hole*), também foi reduzido com os 3 trabalhos mencionados.

As vantagens do método de calibração proposto por Du et al. [11] é o custo dos sensores, mais baratos para medir e estimar parâmetros cinemáticos, em comparação com dispositivos baseados em laser ou máquinas de medição por coordenadas. Portanto, reduzir o erro de posicionamento do robô é um desafio para os métodos de auto-calibração, sem depender de dispositivos caros de medição, aumentando as probabilidades da implementação na indústria. No entanto, as IMUs utilizadas são comerciais, de baixo custo e menor desempenho, comparadas com dispositivos de uso militar, por exemplo, limitando a precisão final do método proposto [92].

Com dois instrumentos de medição diferentes: *Laser-Tracker* e CMM, dois métodos de calibração foram propostos para um manipulador industrial serial [93]. Foi proposto um modelo robótico mediante transformações homogêneas com erros não geométricos relacionado à elasticidade das caixas de engrenagens, identificando 30 parâmetros do modelo de erro, através de 50 posturas na medição. Com três diferentes setups para cada instrumento de medição foi validado o método de calibração descrito, onde o dispositivo CMM teve melhor eficiência do que o *Laser-Tracker* em termos de erro máximo de posição, tempo de processamento e custos financeiros.

Um método de calibração absoluta foi realizado com uma barra telescópica, usando o modelo robótico, incluindo erros não-paramétricos [93]. Foi feita uma calibração preliminar com 45 posturas e calibração final com 15 posturas. Para validar o método, foi utilizado um *Laser-Tracker*, demonstrando que o método apresentado por Nubiola et al. [94] é adequado para pequenas áreas de trabalho. No entanto, os procedimentos de medição utilizados têm a limitação de trabalhar com 72 posturas do robô, o que não permite validar se é uma quantidade adequada ou não para a precisão final.

Dois modelos de calibração foram propostos por Xu et al. [33], em que o primeiro não depende de cargas externas, enquanto o segundo tem uma carga externa fixada na última junta. O processo de medição foi feito com um *Laser-Tracker*, com 200 grupos de posturas aleatórias. O método utilizado para a identificação dos parâmetros foi de mínimos quadrados (LSM), onde o autor usou 12 parâmetros no modelo de calibração para reduzir os cálculos da cinemática direta, justificando que os outros parâmetros não tinham influência no modelo. Os resultados foram melhores quando o modelo de rigidez (com carga) foi utilizado, com um erro médio de posicionamento de 0,230 mm, em contraste com um erro de 0,377 mm usando o modelo sem considerar carga externa. Em consequência, a proposta feita por Xu et al. [33] abrange a calibração do manipulador comparando o desempenho do sistema com e sem carga externa, analisando as causas da diferença da precisão atingida.

Considerando que algumas juntas de robôs industriais são dependentes da rotação de alguma outra junta, Mei et al. [34] propuseram o cálculo da relação de redução das engrenagens das juntas como parâ-

metros a ser identificados junto com o modelagem DH-Hayati. Usando um *Laser-Tracker* foram medidas 14 posturas de um robô de 6 graus de liberdade, identificando e compensando 12 parâmetros do modelo de calibração com o método de mínimos quadrados (LSM). Não foi detalhada a razão de usar só 12 parâmetros para calibrar o robô, além do que não foram utilizados os valores da relação de redução dos engrenagens. O erro médio passou de 36,780 mm para 0,232 mm com o procedimento mencionado no trabalho, o que permite aprofundar na discussão de justificar o número de parâmetros utilizados no modelo de calibração.

A desativação de processos dentro de usinas nucleares é uma aplicação que pode ser feita por manipuladores, devido a procedimentos que exigem alta precisão na manipulação de resíduos pesados e detritos. Por tal motivo, diminuir o erro de posicionamento característico dos robôs utilizados nessas aplicações é o objetivo principal da proposta feita por Joo et al. [95] com um robô de 6-DOF. No procedimento para medir as coordenadas foi usinada uma placa com 4 furos, com o diâmetro do efetuator, fixada numa placa CMM o que permite conhecer a posição do robô em relação com o centro de cada furo da placa usinada. A modelagem cinemática foi feita usando transformações homogêneas, enquanto a identificação de 12 parâmetros foi feita com o algoritmo dos mínimos quadrados sem justificativa da escolha da quantidade de parâmetros identificados. Não foram apresentados os valores do erro de posicionamento antes e depois da calibração, o que dificulta validar numericamente o benefício do método apresentado. Uma limitação desse trabalho é que a medição como foi apresentada só possibilita obter a distância em duas direções (X e Y), o que influencia na identificação dos parâmetros devido ao fato de que um dos eixos de coordenadas de posição do robô não foi considerado.

Como outra alternativa para diminuir o custo dos instrumentos de medição na calibração de robôs industriais, Messay-Kebede et al. [96] propuseram um procedimento como alternativa aos instrumentos de medição. A proposta consiste em uma lâmina fabricada com precisão testada em máquina CMM, onde é feita a medição em vários pontos da superfície da lâmina com um apalpador montado no efetuator de um robô de 6-DOF. Posteriormente, com as medições feitas e foi usando o algoritmo de otimização por enxame de partículas (em inglês: *Particle Swarm Optimization - PSO*) para identificar o valor dos parâmetros do modelo de erro com transformações homogêneas. No caso, só foram utilizados 10 parâmetros, uma vez que o cálculo é mais rápido com esse modelo incompleto, mas ainda assim melhora a precisão do manipulador [97]. O desvio padrão do erro de posicionamento passou de 0,248 mm para 0,044 mm. No entanto, apesar de ser uma proposta econômica por não usar instrumentos de calibração caros, poderia existir um modelo mais completo para avaliar que fontes de erro não modeladas afetem a precisão atingida.

A calibração de um robô industrial pode ser executada de forma simultânea com um processo industrial, como no caso da proposta feita por Yu e Xi [13] onde um sensor para a inspeção de peças fabricadas foi montado num robô industrial de 6-DOF. A ideia principal desse trabalho era ter 4 pontos ou objetivos para fazer uma pré-calibração do sistema, que foi modelado usando transformações homogêneas e utilizando 30 parâmetros para o modelo de calibração. Foi utilizado o método L-M para a identificação dos parâmetros. A medição foi feita com um *Laser-Tracker*, enquanto a fase de calibração se caracterizava por otimizar as posturas de medição usando 4 pontos constantes, diferenciando-se da pré-calibração por usar posturas aleatórias na medição. Com a otimização das medições os autores obtiveram uma redução de 18.60% do erro médio quadrático, em comparação com a etapa de pré-calibração, o que se mostra uma estratégia interessante na medida em se pode estimar onde deve ser feita a medição. Não foi mencionada a necessidade de repetir os procedimentos de calibração para essa aplicação específica, nem sua periodicidade.

Além do uso do *Laser-Tracker* para a medição do posicionamento de efetuador do robô, têm sido utilizados sistemas de fotogrametria portáteis como no caso da proposta de Fillion et al. [38] que comparou o desempenho desses dois sistemas de medição na calibração de um robô de 6-DOF. A modelagem do manipulador feita por transformações homogêneas, levando em conta os sistemas de coordenadas do instrumento de medição e da base no robô, além de incluir os erros “não-cinemáticos” ou elasticidade da estrutura. Na questão das posturas para a medição e validação do método foram geradas 1000 posturas, cumprindo dois requisitos básicos: os pontos de medição devem estar dentro do espaço de trabalho, garantindo que a medição possa ser feita pelo *Laser-Tracker* e o sistema de fotogrametria, além de evitar colisões. Foi também feita uma análise para excluir as posturas com o menor índice de observabilidade (em inglês: *observability index*) escolhido pelos autores dentro cinco índices propostos na literatura [98, 99]. Depois de escolher 34 posturas para medir a posição do robô com os dois instrumentos de medição, a identificação de parâmetros foi realizada com um algoritmo baseado no método de mínimos quadrados. Com o restante das posturas foi feita a validação da calibração, usando só o *Laser-Tracker*. A precisão de posicionamento foi de 0,197 mm para o sistema de fotogrametria e de 0,147 mm para o *Laser-Tracker*, mostrando que o desempenho dos processos de calibração foram similares.

A calibração de um robô serial de 6-DOF foi proposta por Liang et al. [100], através da modelagem com transformações homogêneas, onde um *Laser-Tracker* foi empregado na medição e a identificação dos parâmetros foi feita com o método dos mínimos quadrados. O erro de posicionamento máximo passou de 3,2347 mm para 1,3745 mm, embora tenham sido utilizados 15 pontos na medição, sem mencionar a justificativa quanto ao efeito na posição final depois da calibração. Daqui a relevância de gerar uma análise estatística ou uma seleção nos pontos que são utilizados para achar o modelo de erro [98].

A relação entre o sistema de coordenadas do instrumento de medição e a base do manipulador é um componente importante na calibração de robôs industriais, especificamente quando é utilizado um *Laser-Tracker* como no caso do trabalho feito por Zhang et al. [2], que definiu o erro de posicionamento como a diferença entre as coordenadas nominais da base do manipulador e as que foram medidas. Para isso, a transformada que define a relação do *Laser-Tracker* e a base do robô de 6-DOF foi calculada considerando a posição medida no efetuador e as componentes axiais das primeiras duas juntas do sistema. Adicionalmente, com o modelo definido através de transformações homogêneas foram identificados os parâmetros geométricos com o método de mínimos quadrados. Foram comparados os erros de posicionamento informados por Zhang et al. [2], obtendo erros de posicionamento de 0,834 mm e 0,271 mm respectivamente, partindo de um erro nominal de 2,329 mm. A relação entre os sistemas de coordenadas pode contribuir com os métodos de calibração, por exemplo, vinculando requisitos de precisão em aplicações específicas, condição ausente na proposta descrita.

Considerando que restrições de medição na calibração de robôs podem diminuir os custos do sistema de medição, a proposta feita por Guo et al. [31] descreve o uso de um sensor de deslocamento a laser para medir a distância de uma esfera de precisão fixada no efetuador de um manipulador de 6-DOF. Para gerar um desvio da posição inicial em duas direções (X e Y), o sensor foi deslocado em cada direção para obter novas medições. Com esses dados e um modelo de erro proposto pelos autores, foi possível identificar 11 valores dos parâmetros cinemáticos utilizando o método dos mínimos quadrados. No entanto, não foi mencionada a notação usada para a modelagem cinemática do sistema, assim como não foram apresentados os valores dos erros de posicionamento antes e depois de implementar o método proposto, o que restringe

a comparação com outros métodos de calibração. A proposta mencionada economiza custos de medição em detrimento do tempo de medição, uma vez que o sensor precisa ser movido em cada ponto de medição.

Seguindo com a calibração baseada em medições por restrição [101], uma proposta foi feita por Gubankov e Yukhimets [102] identificando parâmetros associados a um robô de 6-DOF através de várias deduções matemáticas, considerando a modelagem cinemática baseada em transformações homogêneas. A novidade dessa proposta é a leitura das posições das juntas do manipulador em uma mesma posição do efetuador em diferentes orientações, enquanto está em contato direto com um ponto de referência no espaço de trabalho, sem uso de instrumentos de medição. O algoritmo Levenberg Marquart (LM) foi utilizado para identificar os parâmetros obtendo um erro de posicionamento de 0,003 mm, mas não foi especificado o erro inicial que foi corrigido antes da calibração. No entanto, torna-se difícil garantir que sempre exista a mesma posição de contato, devido a efeitos elásticos durante o processo de medição [31]. Mesmo sendo uma solução com certo grau de novidade às soluções convencionais, ainda devem ser feitas comparações com outros métodos para validar sua viabilidade em aplicações específicas.

Foi apresentado por Wang et al. [103] um procedimento para o mapeamento das melhores posições e orientações de um robô de 6-DOF para realizar uma determinada trajetória segundo a precisão real do sistema. Para isso, foi modelado o manipulador através de transformações homogêneas o que possibilitou definir um modelo do erro de posicionamento para analisar a sensibilidade ao erro em cada junta. Várias simulações foram feitas para estabelecer a influência do erro de cada junta no posicionamento desejado do efetuador. As três primeiras juntas têm maior contribuição no erro de posicionamento em contraste com as três juntas finais. Para verificar a influência da orientação numa trajetória definida, foram estabelecidas 45 trajetórias dentro do espaço de trabalho do robô modificando a orientação em cada trajetória. No caso, foram mapeadas as zonas onde existia um erro mínimo com a variação da posição e orientação do manipulador, permitindo avaliar a compatibilidade com requisitos mínimos de fabricação em aplicações específicas.

No trabalho apresentado por Gaudreault et al. [104] foi desenvolvido um dispositivo baseado em três indicadores digitais posicionados de forma ortogonal, TriCal (Quebec, Canada) fixados no efetuador de um manipulador de 6-DOF, possibilitando a medição de 3 esferas de precisão localizadas no espaço de trabalho e deduzindo matematicamente o posicionamento do robô. São descritos três procedimentos para garantir o *setup* das medições com o dispositivo proposto, além de que foram otimizadas as posturas para as medições com o mesmo método utilizado por Fillion et al. [38] (índice de observabilidade). Transformações homogêneas foram usadas para modelar o robô, junto com a referência espacial da estrutura onde estavam as esferas de precisão. Um dos aportes interessantes do método proposto foi a análise dos erros com respeito à seleção das posturas para as medições. Por exemplo, se o número de posturas é alto, na calibração se obtêm melhores resultados. No caso, foram utilizados 30 grupos de 75 posturas para a análise estatística dos resultados, concluindo que usar um maior número de posturas gera resultados simulares de desempenho. O método de mínimos quadrados foi utilizado para a identificação dos parâmetros, procedimento que foi feito com várias posturas do robô para obter a média e desvio padrão dos parâmetros. O erro de posicionamento depois de calibração foi de 0,482 mm, menor que dois métodos já implementados pelos autores (*Laser-Tracker* e *CMM*), mas com um instrumento consideravelmente mais barato.

Se depois de um procedimento de calibração em robôs industriais a precisão atingida não satisfaz os

requisitos em operações como usinagem de precisão ou microcirurgias, é necessário avaliar novas alternativas que permitam obter melhores resultados. Esse é o caso de Chen et al. [7] que propuseram um método para otimizar o posicionamento do robô através dos seguintes fatores de avaliação da calibração: i) definição do número mínimo de posturas do robô; ii) calcular o valor dos primeiros três índices de observabilidade ($O_{1,2,3}$) [98] das posturas candidatas; iii) adoção índices de dispersão e uniformidade. No caso, foi definido um índice de qualidade geral baseado nos índices de observabilidade, dispersão e uniformidade, permitindo estabelecer uma função objetivo para gerar posturas otimizadas do robô usando o algoritmo PSO. Foi feita a simulação do método proposto para um robô de 8-DOF, determinando o número adequado de posturas para a calibração com os índices de observabilidade ($O_{1,2,3}$). A modelagem considerou transformações homogêneas, permitindo identificar 45 parâmetros de erro paramétricos através das medições de 40 posturas otimizadas, melhorando o erro de posicionamento nominal em 43.86%. Não foi informado se os erros inseridos na simulação tinham comportamento gaussiano, nem a justificativa da ausência de testes em condições reais para comparar os resultados da simulação.

O robô da Vinci é utilizado para cirurgias minimamente invasivas (em inglês: *robot-assisted minimally invasive surgery* - RMIS), o que torna a exatidão da postura do robô um procedimento essencial. Por isso, a proposta de Huang et al. [44] usou os dois primeiros níveis de calibração (por juntas e parâmetros cinemáticos) para a modelagem do robô cirúrgico. Empregando um sensor de posição infravermelho (*Polaris Vicra optical tracker*) foi possível obter o posicionamento do robô. Foram comparados os 2 níveis de calibração, dando como resultado um melhor desempenho quando a modelagem através de transformações homogêneas é usada. O erro de posicionamento passou de 3,5 mm para 0,5 mm com o segundo nível de calibração, mediante 20 medições. A novidade da proposta foi a compensação dos valores identificados, usando o método de mínimos quadrados, no controlador ROS, tornando viável o uso de um controlador tipo *open-source* dos métodos de calibração em robôs.

Com o intuito de diminuir os custos do instrumento de medição Xie et al. [5] desenvolveu um método de calibração que integra o modelo baseado em transformações homogêneas de um robô de 6-DOF e a matriz da relação *hand-eye* entre um sistema de medição laser e o efetuador. O modelo de calibração teve 31 parâmetros, mas depois da remoção dos parâmetros redundantes, restaram 25 parâmetros, 19 associados com o modelo do robô e 6 da relação *hand-eye*. O experimento consistiu em medir o centro de uma esfera localizada no espaço de trabalho com 54 posturas diferentes, onde a identificação dos parâmetros de erro foi realizada através do método de mínimos quadrados, diminuindo o erro de posicionamento de 0,0982 mm para 0,0248 mm. É importante ressaltar a integração da abordagem *hand-eye* com a modelagem por transformações homogêneas, propondo e validando alternativas nos métodos de calibração relacionando conceitos existentes.

Segundo Wang et al. [10] a incerteza associada à configuração da medição pode ser considerada menor e não contribui de forma significativa com os erros de posicionamento. No entanto, analisar o efeito da incerteza dos parâmetros geométricos de um robô de 6-DOF na calibração foi o objetivo do trabalho feito por Wen et al. [37]. Uma simulação com 1000 posturas e erros gaussianos introduzidos nos parâmetros do modelo cinemático do manipulador baseado em transformações homogêneas permitiu observar que os parâmetros dos ângulos tinham maior efeito na distribuição de incerteza do efetuador, em comparação com os parâmetros de comprimento. Já nos experimentos práticos foram identificados 25 parâmetros geométricos e usadas três estratégias para obter os valores da incerteza dos parâmetros, concluindo que a

distribuição da incerteza é diferente da simulação devido ao valor dos erros geométricos. Cabe ressaltar que a incerteza dos parâmetros geométricos é importante em aplicações como a especificação geométrica de produto (GPS), podendo ser explorada na calibração de robôs industriais.

A calibração por restrição permite diminuir os custos associados ao instrumento de medição, mas a definição matemática tem que ser consistente para caracterizar adequadamente o sistema, como no caso de He et al. [16] que propuseram uma alternativa para a calibração dos parâmetros cinemáticos de um manipulador industrial usando varias restrições de posicionamento. Para isso, a modelagem de um robô de 6-DOF com transformações homogêneas foi desenvolvida, no qual o efetuador é deslocado para uma posição fixa e varias orientações são geradas no mesmo ponto. Nos experimentos realizados foram contemplados dois dispositivos padrão. O primeiro é composto por dois ferramentas compridas com uma pontas cônicas, uma fixada no espaço de trabalho e a outra no efetuador do manipulador. A ideia do primeiro experimento foi medir numa mesma posição 36 orientações diferentes tendo como condição inicial que as pontas das ferramentas devem estar em contacto. Depois da calibração o erro máximo entre as pontas da ferramenta passou de 4,62 mm para 0,1 mm, usando um paquímetro para medir a distância entre as pontas das ferramentas. Um instrumento de medição de maior precisão foi utilizado (em inglês: *non-bar device*) em outro robô de 6-DOF composto por um sensor fixado no efetuador e uma esfera instalada em um dispositivo fixo no espaço de trabalho. O erro com o segundo sensor passou de 329,714 μm para 144,488 μm . Mesmo com a melhora da precisão é necessário discutir a existência de erro randômico de medição sistemático associado ao uso de um paquímetro como instrumento de medição.

Instrumentos de medição na área da metrologia como o *Laser-Tracker* e as máquina de medição de coordenadas do tipo braço robótico (em inglês: *articulated arm coordinate measuring machine - AACMM*) têm ganhado relevância na indústria automotiva, aeroespacial, montagem, processamento de metais etc., devido à flexibilidade para efetuar medições complexas em ambientes congestionados, afetando a confiabilidade das medições. Um procedimento para a identificação dos parâmetros de uma AACMM e garantir os requisitos de precisão das indústrias mencionadas foi proposto usando transformações homogêneas de um sistema Faro Platinum de 7-DOF, junto com uma base móvel que suporta o instrumento de medição. Foram propostos 4 parâmetros de qualidade de erro para avaliar o processo de identificação de forma simultânea, considerando um sistema calibrado tipo *ballbar* como referência para as medições. O algoritmo L-M foi implementado no processo de identificação de 28 parâmetros da AACMM junto com os parâmetros que relacionam a base móvel. O interessante do trabalho proposto em [17] foi a avaliação da qualidade dos parâmetros identificados através de 8 funções objetivo que consideravam métricas como o desvio padrão, a distancia Euclidiana, a repetibilidade etc. Os grupos de parâmetros identificados que tiveram os melhores resultados foram avaliados em pontos de medição diferentes ao processo de identificação usando o sistema *ballbar*, resultando em um erro máximo de 0,012625 mm na função objetivo com o melhor comportamento. É importante ressaltar que o tempo pra completar a calibração do AACMM foi de 3 horas, abrindo a discussão sobre uma aplicação real deste tipo de procedimentos em ambientes de produção.

Uma das possibilidades para melhorar o modelo de calibração dos robôs industriais é mediante a identificação dos parâmetros de rigidez das juntas, como foi proposto por Theissen et al. [8], permitindo reduzir as deflexões não desejadas no efetuador de um robô de 6-DOF. Para isso, foi necessário aplicar o conceito de um sistema elasticamente conectado mediante uma barra de esferas dupla de carga, com o intuito de gerar um laço de carga fechado. Desta forma, 19 posturas foram medidas com uma *Laser-Tracker*, ajus-

tando em cada postura a carga através da barra para criar um vetor de forças e torques necessários para identificar a deformação das juntas. Mediante a modelagem com transformações homogêneas e o modelo elastoestático foi possível identificar com o método de mínimos quadrados os valores de rigidez em cada junta, no entanto a compensação dos erros não foi informada, o que não permitiu verificar o impacto das deformações no posicionamento do efetuador.

Compensar os erros não-geométricos elásticos (em inglês: *compliance error*) de um robô de 6-DOF foi feita a proposta de Du et al. [28], usando o efeito da gravidade e do componente elastoestático das juntas. No caso, a modelagem usou transformações homogêneas para ter uma calibração inicial com os parâmetros cinemáticos (erros geométricos) e modelar posteriormente os erros não-geométricos. Uma análise da influência de cada junta no posicionamento final do manipulador foi feita, identificando a segunda e terceira juntas como tendo maior contribuição no erro de posicionamento. Usando o algoritmo de mínimos quadrados foi possível estimar os erros considerando os efeitos da gravidade e os componentes elastoestáticos. Com um *Laser-Tracker* foram medidas 80 posturas para identificar os erros associados com a gravidade, reduzindo o erro de posicionamento de 0,456 mm para 0,224 mm. No caso da compensação do componente elastoestático, foram utilizadas as mesmas posturas, incluindo cargas externas no efetuador do manipulador, evidenciando a relação entre a carga e o erro de posicionamento, assim como o fator de compensação da componente elastoestática. Com a carga externa mais pesada foi reduzido o erro de posicionamento de 1,365 mm para 1,254 mm. Cabe ressaltar que os erros não-geométricos devem ser considerados dependendo dos requisitos da aplicação final [105], já que no caso da compensação associada com a gravidade o erro de posicionamento diminuiu quase 50%, mesmo tendo uma calibração inicial dos parâmetros cinemáticos. É importante mencionar que a calibração inicial não foi detalhada, o que não evidencia o grau de complexidade dos procedimentos necessários para atenuar o erro de posicionamento.

A modelagem de todos os erros não-geométricos presentes num sistema robótico é um procedimento complexo, portanto as redes neurais se convertem em uma solução alternativa como foi proposto por Nguyen et al. [6]. No caso, foi descrito um método de calibração híbrido onde foi possível modelar, mediante transformações homogêneas, os parâmetros associados aos erros geométricos e a deformação das juntas de um robô serial de 6-DOF, incluindo a rede neural para compensar os erros residuais derivados dos erros não-geométricos. Um *Laser-Tracker* foi utilizado para medir 500 posturas divididas em vários grupos, permitindo compensar os erros geométricos, assim como o treinamento e validação do modelo de redes neurais. O erro de posicionamento passou de 4,0654 mm para 0,6919 mm sem usar redes neurais, já com a compensação dos erros não-geométricos o erro diminuiu para 0,3264 mm. A proposta feita por Nguyen et al. [6] é interessante devido ao fato de juntar uma técnica analítica com métodos do tipo *soft-computing* para compensar erros não-geométricos residuais.

Uma das fontes de erro com maior contribuição no erro de posicionamento de um robô é a deformação das juntas, por isso, Chen et al. [26] propuseram um método de calibração para um robô de 6-DOF com dois objetivos: i) modelar o erro de acoplamento rígido-flexível, que considera os erros geométricos e por deformação; e ii) definir um critério para a medição completa e otimizada do efetuador. No caso, o modelo cinemático foi obtido através de transformações homogêneas, junto com a modelagem por deformação que considera cada junta do robô como uma mola de torção linear. Para a otimização das medições obtidas por um *Laser-Tracker* foi desenvolvido um método intermediário para registrar a orientação do efetuador, além de implementar um algoritmo PSO que permitisse otimizar as posturas do robô considerando a interferência

estrutural, limitação angular e dois índices de observabilidade. Com 14 posturas otimizadas e o algoritmo L-M foram identificados 36 parâmetros de erro, diminuindo o erro de posicionamento de 1,41 mm para 0,15 mm. Cabe destacar a relevância da etapa de medição da proposta descrita para obter alta precisão na identificação de parâmetros cinemáticos.

Diminuir o efeito dos erros residuais depois da calibração de um robô de 6-DOF foi o objetivo da proposta feita por Zhao et al. [48], através da associação de um *Laser-Tracker* com o controlador do manipulador, permitindo medir mais de dez mil posturas de forma automática. Adicionalmente foi desenvolvido um método para gerar uma trajetória apropriada garantindo a medição das posturas. Posteriormente, foram identificados 29 parâmetros de erro derivados do modelo cinemático do robô usando o método de mínimos quadrados. Em outra etapa da proposta foi descrita uma rede neural profunda para compensar o efeito dos erros residuais, diminuindo o erro máximo de posicionamento de 1,96 mm para 0,22 mm. Cabe destacar a integração de uma técnica paramétrica e outra preditiva, permitindo processar e diminuir os erros não modelados.

Na calibração de robôs industriais o erro de posicionamento derivado da deformação das juntas é relevante em aplicações com grandes cargas e forças externas, como a usinagem de peças. No entanto, poucos estudos têm considerado os efeitos de forças externas e da gravidade integralmente, o que permitiu propor o estudo dos efeitos de forças externas multi-direcionais e torques na exatidão dos manipuladores, através de um modelo elasto-geométrico usando transformações homogêneas, incluindo parâmetros cinemáticos e a deflexão das juntas [21]. Para isso, um mecanismo acionado por cabos (em inglês: *cable-driven*) foi implementado para aplicar as forças externas em três direções (XYZ). Um dos aportes significativos da proposta foi o uso do Projeto Ótimo de Experimentos (em inglês: *Optimal Design of Experiments*) para escolher o conjunto de medições, a postura do robô e a tensão externa (força e torque) aplicada pelo mecanismo paralelo, considerando 3 critérios de otimização, onde dois deles se relacionam com os índices de observabilidade O_1 e O_2 . O procedimento consistiu em movimentar o robô segundo as posturas selecionadas e medir com um *Laser-Tracker*, só depois que o mecanismo paralelo ajustava a tensão dos cabos conectados a uma plataforma móvel fixada no efetuador do robô. A validação da proposta consistiu em avaliar o erro de posicionamento entre o modelo calibrado e as medições efetuadas pelo *Laser-Tracker* com um conjunto de posturas-tensões diferente no processo de identificação. Os experimentos do critério que usa o O_1 tiveram melhores resultados no que diz respeito aos outros critérios e ao erro de posicionamento, passando de um erro máximo de 3,02 mm para 0,902 mm depois da calibração. Uma desvantagem da proposta foi o espaço de trabalho definida para as medições, pois deviam ser feitas dentro do espaço de trabalho do robô e do mecanismo paralelo (zonotopo).

Lattanzi et al. [106] propuseram um método para a calibração de robôs industriais enfatizando na precisão da posição final nas operações de montagem no setor aeronáutico (tolerância de $\pm 0,5$ mm). Para isso, foi utilizado um manipulador DENSO VS-087 de 6-DOF modelado através de transformações homogêneas. Foram definidas e medidas 196 posições compatíveis com processos industriais usando um *Laser-Tracker*, posteriormente o modelo calibrado foi validado em uma área de teste e os resultados foram avaliados através de métricas estatísticas (média, desvio padrão etc.), assim como índices de capacidade do processo (C_p e C_{pk}), sendo estes um ponto a destacar em comparação a outros trabalhos relacionados à calibração de robôs. A precisão do manipulador em processos do setor aeronáutico foi de até 0,1 mm, utilizando limites de três-sigma, as análises baseadas na avaliação de capacidade e controle estatístico de

processos alternativas adequadas para a calibração de robôs industriais em aplicações reais.

Du et al. [107] apresentou um procedimento para a calibração *on-line* que usa um sensor IMU no efetuador de um robô de 6-DOF, junto com duas câmeras que permitem medir a postura do robô de forma automática. A modelagem usou transformações homogêneas, assim como uma estratégia de amostragem probabilística que permite ao algoritmo de identificação calcular valores globais, estimando de forma contínua mínimos locais. O experimento *peg-into-hole* foi utilizado nos testes com 50 posturas usadas na identificação dos erros paramétricos, enquanto 50 posturas adicionais permitiram a validação da proposta, diminuindo o erro de posicionamento de 4,24 mm para 0,1 mm. Mesmo que a proposta tenha dados sobressalientes na diminuição do erro, uma análise fundamentada na aplicabilidade do método em condições reais não foi descrita, o que permite questionar se uma área de teste de 30×50 mm e pouco deslocamento do efetuador no eixo Z possibilita cumprir com os requisitos da indústria automotiva ou aeronáutica.

Um método de calibração com restrição de ponto e distância foi proposto por Wang et al. [22] usando uma câmera montada no efetuador de um robô Staübli TX60 de 6-DOF, usando transformações homogêneas para a modelagem. Foram obtidas imagens de uma esfera estática com diferentes posturas do robô para as medições da restrição de ponto, enquanto as medições com restrição de distância foram obtidas colocando a esfera em duas posições separadas por uma distância conhecida, determinada por blocos padrões. Os dados associados à restrição de distância foram utilizados como complemento para melhorar a precisão da identificação feita com as medições por restrição de ponto que mostraram alta variação dos mínimos locais. A verificação usou o erro de medição contínua de uma distância específica através de um relógio comparador, diminuindo o erro médio de 2,05 mm para 0,24 mm. O erro posicional consistiu em medir a mesma posição nominal com a variação da orientação do efetuador, passando de um erro médio de 1,637 mm para 0,139 mm. No entanto, a área de medição é reduzida (35 cm) em comparação com aplicações de grande porte, como a indústria automotiva ou aeronáutica.

A proposta de Liu et al. [108] permite integrar um sistema de rastreamento óptico e um marcador montado no efetuador de um robô de 6-DOF para a compensação *on-line* do erro de posicionamento. A abordagem incluiu a correção dos erros paramétricos derivados da modelagem baseada em transformações homogêneas, assim como os erros da base e da ferramenta do manipulador em relação ao sistema de medição, totalizando 36 parâmetros de erro que foram identificados com o algoritmo L-M, depois das medições das posturas. Na parte experimental, foi usada a técnica de inserção pino-orifício em vários pontos numa placa com 24 orifícios, onde o robô UR-10 executou a operação de inserção em 30 pontos durante a calibração, verificando o modelo corrigido em 10 pontos adicionais, diminuindo o erro de posicionamento de 2-3 mm para 0,348 mm. Comparado aos métodos existentes que utilizam *Laser-Tracker*, o método descrito é mais barato e é flexível devido às vantagens do sistema de rastreamento óptico, além de considerar um controlador adicional que permitiria fazer a correção automática.

No intuito de analisar e avaliar o erro de posicionamento em medições contínuas feitas num plano XY, um método de calibração foi proposto por Yang et al. [109] usando um sistema tipo *Double Ball Bar*. Foram usadas transformações homogêneas para obter o modelo de erro de um robô EPSON C4-A901 de 6-DOF considerando uma trajetória circular plana. Foram retirados parâmetros redundantes do modelo de erro até obter 17 erros paramétricos independentes. A relação entre a trajetória circular e o modelo de erro permitiu avaliar o desempenho da proposta através do erro de aproximação. Simulações permitiram

analisar a influencia dos erros paramétricos angulares e de comprimento em três diferentes ordens de grandeza. Através de 30 medições e depois da identificação dos parâmetros de erro mediante métodos de mínimos quadrados, o erro de aproximação médio diminuiu de 0,437 mm para 0,3644 mm, no entanto a métrica usada para avaliar o erro de posicionamento foi comparada com métricas tradicionalmente usadas em trabalhos correlatos associados à distancia Euclidiana.

Jiang et. al [110] sugerem agrupar os parâmetros de erro em diferentes modelos de identificação segundo vários níveis de sensibilidade, tornando os modelos de erro completos e estáveis. Para isso, foram comparadas as sensibilidades de diferentes tipos de erros cinemáticos e parâmetros de elasticidade, assim como os impactos na identificação. Posteriormente, os erros paramétricos foram agrupados em submodelos, usando transformações homogêneas, e através de índices de observabilidade e o número de condicionamento foram avaliados os erros paramétricos. Dois submodelos que agrupam os parâmetros de erro das juntas 1-3 e as juntas 4-6 foram escolhidos, calibrados a partir de 120 medições aleatórias obtidas por um *Laser-Tracker* e um robô BORUNTE 1510-A de 6-DOF. A calibração incluindo parâmetros não-cinemáticos foi mais precisa do que o uso apenas de parâmetros cinemáticos, segundo a identificação com submodelos. Um trabalho semelhante com o mesmo robô e usando a divisão da matriz Jacobiana permitiu obter espaços de identificação com menor quantidade de erros paramétricos [111], utilizando a sensibilidade do índice de observabilidade O_1 , reduzindo o erro de posicionamento médio de 1,29 mm para 0,592 mm, validando os métodos que usam sub-modelos para a calibração, incluindo a sensibilidade dos parâmetros de erro de forma agrupada para avaliar o posicionamento final do manipulador.

A análise de confiabilidade cinemática em robôs industriais tem ganhado cada vez mais atenção, avaliando a probabilidade que o efetuador se mantenha num intervalo específico do erro de posicionamento. Dessa forma, um novo método para a análise de confiabilidade do posicionamento de robôs industriais foi proposto por Huang et al. [112], usando a cinemática diferencial e a aproximação “ponto de sela” (em inglês: *saddlepoint*). A confiabilidade pode ser avaliada depois de obter a função de estado limite (em inglês: *Limit State Function - LSF*), no caso, foi redefinida a LSF segundo o modelo de erro estabelecido pela cinemática diferencial e a propagação de erro. Foi descrito o procedimento para a avaliação da proposta com um robô de 6-DOF, através da definição de um erro permissível de 0,5 mm, considerando que os parâmetros de erro foram assumidos como independentes e normalmente distribuídos (incertezas), introduzindo desvios entre as posições real e objetivo. Foi demonstrado que o método proposto tem desempenho aceitável tanto em exatidão quanto em eficiência quando foi comparado com os métodos existentes, se tornando uma alternativa para a avaliação probabilística do erro de posicionamento em robôs industriais.

Na Tabela 3.4 se apresenta um sumário dos trabalhos associados aos modelos de calibração utilizando transformações homogêneas, através das etapas vinculadas aos procedimentos de calibração. Na primeira coluna se indicam os instrumentos de medição utilizados, na segunda coluna a técnica de identificação implementada, enquanto a terceira coluna descreve o tipo de compensação adotado. Finalmente a principal contribuição é mencionada de forma geral.

Tabela 3.4: Breve sumário dos trabalhos analisados na Subseção 3.4.1

Autores	Instrumentos de Medição	Método de Identificação	Tipo de Compensação	Principal Contribuição
Ha [70]	CMM (<i>grid plate</i>) e sensor laser	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Dois instrumentos de baixo custo pra medição.
Ginani e Motta [86]	Braço de medição	L-M	<i>off-line</i>	Erro de posicionamento de 1,4 mm para 0,3 mm.
Du et. al [11, 87]	IMU, câmera e <i>peg-in-to-hole</i>	Kalman e FQA	<i>on-line</i>	Conceito de auto-calibração com sensores IMU para redução dos custos de medição.
Nubiola et al. [93]	<i>Laser-Tracker</i> e CMM	-	<i>off-line</i>	Comparação de dois instrumentos de medição na calibração
Nubiola et al. [94]	Barra telescópica e <i>Laser-Tracker</i>	-	<i>off-line</i>	Comparação de dois métodos de medição com dois instrumentos de medição na calibração.
Xu et al. [33]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Comparação de modelos com carga externa e sem carga, onde a calibração com o modelo baseado em carga externa foi melhor.
Mei et al. [34]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Uso de 12 parâmetros de erro no modelo com diminuição do erro de posicionamento de 0,232 mm.
Joo et al. [95]	Placa CMM	Mínimos quadrados	-	Calibração de robôs aplicada na desativação de processos em usinas nucleares.
Messay-Kebede et al. [96]	Placa CMM	Algoritmo PSO	<i>off-line</i>	Modelo de erro com 10 parâmetros que permitiu diminuir o erro de 0.248 mm para 0.044 mm.
Yu e Xi [13]	<i>Laser-Tracker</i>	L-M	<i>on-line</i>	Implementação da calibração simultânea para a inspeção de peças.
Filion et al. [38]	<i>Laser-Tracker</i> e sistema de fotogrametria portátil	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Comparação de dois instrumentos de medição na calibração, incluindo índices de observabilidade para escolher a posturas medidas.
Liang et al. [100]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Diminuição do erro de posicionamento de 3,2347 mm para 1,3745 mm.
Zhang et al. [2]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Definição do erro de posicionamento a partir da relação entre sistemas de coordenadas para calibração.
Guo et al. [31]	Sensor de deslocamento a laser com restrição da medição em X e Y	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Uso da calibração por restrição de medição com instrumento de baixo custo.
Gubankov e Yukhimets [102]	Medição por restrição de contato	L-M	<i>off-line</i>	Sem uso de instrumento de medição, a orientação do efetuador varia, mantendo a posição para a obter os dados da postura através do controlador.
Wang et al. [103]	Simulação de erros dos parâmetros de junta	-	<i>off-line</i>	Mapeamento das melhores posições e orientações em determinadas trajetórias.
Gaudreault et al. [104]	TriCal	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Calibração baseada em um dispositivo baseado em três indicadores digitais para medição das posturas do robô.
Cheng et al. [7]	Simulação de erros de medição	PSO	<i>off-line</i>	Método para otimizar o posicionamento do robô através de fatores de avaliação.

Huang et al. [44]	sensor de posição infravermelho (<i>Polaris Vicra optical tracker</i>)	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	O erro de posicionamento passou de 3,5 mm para 0,5 mm com o robô da Vinci para RMIS.
Xie et al. [5]	Sistema de medição a laser	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Diminuição do erro de posicionamento de 0,0982 mm para 0,0248 mm, integrando duas abordagens na modelagem (Transformações homogêneas e <i>Hand-Eye</i>).
Wen et al. [37]	Simulação dos erros de medição e <i>Laser-Tracker</i>	Método para avaliação da incerteza na medição	<i>off-line</i>	Estudo para analisar a distribuição da incerteza nos parâmetros geométricos de um robô e o impacto na calibração.
He et al. [16]	Dois dispositivos de medição padrão	-	<i>off-line</i>	Para cada dispositivo de medição foi usado um robô diferente, diminuindo o erro de posicionamento de 4,62 mm para 0,1 mm, e 329,714 μm para 144,488 μm respectivamente.
Brasu-Avila et al. [17]	Sistema tipo <i>ballbar</i>	L-M	<i>off-line</i>	Procedimento para a identificação dos parâmetros de uma AACMM e garantir os requisitos de precisão em indústrias específicas.
Theissen et al. [8]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	-	Identificação dos parâmetros de rigidez das juntas de um robô para obter um modelo de erro de nível 3 de calibração.
Du et al. [28]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Compensação dos parâmetros de erro levando em conta o efeito da gravidade e do componente elastoestático das juntas, reduzindo o erro de posicionamento de 0,456 mm para 0,224 mm, e 1,365 mm para 1,254 mm, respectivamente.
Nguyen et al. [6]	<i>Laser-Tracker</i>	-	<i>off-line</i>	Calibração híbrida incluindo redes neurais para compensar os erros residuais não modelados, onde o erro de posicionamento passou de 4,0654 mm para 0,6919 mm sem usar redes neurais, e a compensação dos erros não-geométricos o erro diminuiu para 0,3264 mm.
Chen et al. [26]	<i>Laser-Tracker</i>	L-M	<i>off-line</i>	Definição de critérios para a medição completa e otimizada do efetuador, diminuindo o erro de posicionamento de 1,41 mm para 0,15 mm.
Zhao et al. [48]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Integração de uma rede neural profunda para compensar o efeito dos error residuais, diminuindo o erro máximo de posicionamento de 1,96 mm para 0,22 mm.
Kamali e Bonev [21]	<i>Laser-Tracker</i> e mecanismo <i>Cable-driven</i>	-	<i>off-line</i>	Estudo dos efeitos de forças externas e da gravidade na exatidão dos robôs industriais, diminuindo o erro de posicionamento de 3,02 mm para 0,902 mm.
Lattanzi et al. [106]	<i>Laser-Tracker</i>	-	<i>off-line</i>	Enfatizou-se na precisão da posição final nas operações de montagem no setor aeronáutico (tolerância de $\pm 0,5 mm$), resultando em uma precisão do robô utilizado de até 0,1 mm.
Du et al. [107]	IMU e <i>peg-into-hole</i>	Amostragem probabilística	<i>on-line</i>	Área de teste de 30×50 mm, diminuindo o erro de posicionamento de 4,24 mmm para 0,1 mm.

Wang et al. [22]	Medição com restrição	-	<i>off-line</i>	A restrição de ponto e distância com uma câmera montada no efetuador, diminuindo o erro de posicionamento de 1,637 mm para 0,139 mm, variando a orientação do efetuador.
Liu et al. [108]	Rastreamento óptico e <i>peg-into-hole</i>	L-M	<i>on-line</i>	Diminuição do erro de posicionamento de 2-3 mm para 0,348 mm.
Yang et al. [109]	Sistema tipo <i>Double Ball Bar</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Diminuição do erro de aproximação médio diminuiu de 0,437 mm para 0,3644 mm.
Jiang et. al [110, 111]	<i>Laser-Tracker</i>	-	<i>off-line</i>	Diminuição do erro de posicionamento médio de 1,29 mm para 0,592 mm, através de sub-modelos.

3.4.2 Modelos de calibração utilizando *screw theory* e CPA

Screw theory é um método para a modelagem de robôs industriais que se diferencia dos métodos que utilizam transformações homogêneas em que os parâmetros sofrem variações. Na *screw theory* existem juntas virtuais de revolução ou prismáticas reduzindo o número de parâmetros a ser estimados. Com essa teoria de modelagem foi feita uma simulação para a calibração de um robô serial de 6-DOF por Kato et al. [35], utilizando padrões para limitar o erro sistemático das juntas prismáticas virtuais. Já para a juntas rotativas os autores consideraram o maior deslocamento segundo Gao et al. [113], ou seja, uma função gaussiana com menos de $0,09^\circ$ de desvio padrão por junta. Além de apresentar uma alternativa de modelagem, foi utilizada uma normalização interessante no momento de incluir erros randômicos no procedimento de calibração. Para a identificação de parâmetros foi usada uma função em Matlab baseada no método de minimização por mínimos quadrados (LSM), só que não foi detalhado o condicionamento da matriz Jacobiana para restringir o número de parâmetros do modelo de calibração para dez.

A calibração de um robô híbrido foi proposta por Zhao et al. [24] justificando que esse tipo de robôs são uma solução de baixo custo e com maior flexibilidade que as máquinas para polimento de superfícies. O robô utilizado está integrado por um mecanismo paralelo (3-DOF) e um pulso serial (3-DOF) com um efetuador, usando a técnica POE e *Screw Theory* para a modelagem, seguindo a notação DH para definir os sistemas de coordenadas. Para a medição da posição do efetuador foi utilizado um *Laser-Tracker*, além disso foi posicionada uma placa de medição numa superfície do espaço de trabalho como referência adicional. Dessa forma, foi definido o erro de posicionamento do robô em relação à placa de medição, através de várias deduções geométricas segundo a modelagem usada. Devido à presença de parâmetros linearmente dependentes existem relações lineares definidas como multicolinearidade, precisando decompor o jacobiano e aplicar uma técnica de mínimos quadrados para a identificação adequada dos parâmetros de erro. Foram medidas 36 posições diferentes para identificar 44 parâmetros de erro no modelo, reduzindo o erro de posicionamento de 6,886 mm para 0,065 mm. É interessante destacar os procedimentos na identificação e na modelagem de erros paramétricos, garantindo uma compensação adequada do erro de posicionamento segundo a topologia do robô.

Considerando a deflexão das juntas por conta da força gravitacional foi proposto um procedimento de calibração baseado na fórmula POE e CPA (em inglês: *Circle Point Analyses*) [66], onde se destaca

a construção dos modelos com e sem deflexão das juntas, assim como a definição de uma função de custo para identificar os parâmetros próprios desse tipo de modelagem. Usando o conceito do SVD foi possível definir um argumento de otimização que permitisse escolher as melhores posturas e melhorar a identificabilidade dos parâmetros na trajetória CPA. Para validar a proposta, foi simulado um robô de 9-DOF, comparando o modelo tradicional POE (sem deflexão) e os modelos com o método proposto com a otimização da trajetória, que teve os melhores resultados. No entanto, os detalhes da validação não foram descritos. Adicionalmente, dois robôs foram utilizados, um manipulador de 6-DOF e um robô antropomórfico, mas para efeitos do presente trabalho só os resultados do robôs serial foram analisados. Foi utilizado um *Laser-Tracker* para medir a trajetória circular do método CPA e a obtenção dos parâmetros do modelo POE com o mesmo procedimento validado na simulação. Os resultados com o procedimento proposto foram comparados com o modelo DH do robô em 137 posturas aleatórias, onde a calibração baseada em CPA teve um erro médio final de 0,3339 mm, enquanto o outro obteve 0,4542 mm. No modelo DH, só foram identificados os erros angulares e as deflexões, deixando de lado os erros associados aos comprimentos.

Vários métodos existentes para a compensação do erro de posicionamento em robôs industriais são baseados em sensores externos ou vinculados à estrutura do manipulador associado ao efetuador, deixando de lado uma metodologia genérica para medir e estimar a geometria real do robô. Com isso, uma metodologia para estimar as juntas do robô foi proposta por Boldsai Khan [114], medindo a posição de cada junta com um *Laser-Tracker* e estimando os parâmetros através do método de ajuste circular, calculando a distância residual entre os pontos medidos e o plano circular ajustado. Um mecanismo de três juntas foi simulado, usando erros geométricos e níveis de ruído associados ao instrumento de medição, concluindo que distâncias residuais menores (desvio entre um ponto medido e a órbita circular estimada) podem se traduzir em melhor exatidão de todo o mecanismo. No entanto, a ausência de testes com robôs comerciais dificultam avaliar a aplicabilidade do método proposto em condições reais.

Os métodos atuais para a modelagem dos erros são geometricamente pouco intuitivos e não descrevem explicitamente a física dos erros, o que torna a implementação ineficiente. Portanto, foi apresentado um trabalho focado em investigar as propagações de erros de robôs seriais de forma concisa e intuitiva, destacando uma modelagem baseada no método finito e instantâneo *screw* (em inglês: *Finite and Instantaneous Screw - FIS*), baseado na teoria *screw*, a qual descreve o movimento de qualquer elemento rígido, incluindo o deslocamento ou velocidade infinitesimal do elemento na postura atual [115]. Depois de obter o modelo através do método FIS foram removidos os parâmetros de erro redundantes, gerando um modelo de erro simplificado. Um robô KUKA 7R800 de 6-DOF e o *Laser-Tracker* Leica foram utilizados nos experimentos, identificando os parâmetros através de um algoritmo de mínimos quadrados, a partir de 200 posturas geradas de forma aleatória. A validação do modelo calibrado usou 50 posturas adicionais, comparando os resultados com 4 métodos de calibração baseados na fórmula POE, diminuindo o erro de posicionamento de 0,6 mm para 0,09 mm na proposta com a modelagem FIS.

Visando obter um modelo de erros ótimo, é necessário relacionar o número de parâmetros de erro, a complexidade do modelo obtido e a robustez do processo de identificação, sendo que a problemática consiste na modelagem que use um número mínimo de parâmetros segundo o tipo de junta. Com isso, Chanal et al. [116] propuseram um método que permitisse modelar o invariante das juntas rotacionais de um manipulador através de 4 parâmetros independentes por cada junta, usando um robô tipo SCARA. O

invariante de uma junta rotativa é a linha reta (orientação do eixo da junta rotativa e um ponto). Com as medições feitas por um *Laser-Tracker* foram identificados os parâmetros do modelo proposto através do método CPA, o qual consiste em medir a trajetória do efetuador durante o movimento da junta acionada. O modelo corrigido teve um erro médio de 0,027 mm, enquanto o modelo baseado em transformações homogêneas incluindo erros cinemáticos e não cinemáticos tiveram um erro médio de 0,098 mm e 0,033 mm, respectivamente.

Na Tabela 3.5 se apresenta um sumário dos trabalhos associados aos modelos de calibração utilizando *screw theory* e CPA, através das etapas vinculadas aos procedimentos de calibração. Na primeira coluna se indicam os instrumentos de medição utilizados, na segunda coluna a técnica de identificação implementada, enquanto a terceira coluna descreve o tipo de compensação adotado. Finalmente a principal contribuição é mencionada de forma geral.

Tabela 3.5: Breve sumário dos trabalhos analisados na Subseção 3.4.2

Autores	Instrumentos de Medição	Método de Identificação	Tipo de Compensação	Principal Contribuição
Gao et al. [113]	Simulação das fontes de erro	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Modelagem <i>Screw-theory</i> para calibração de um robô serial de 6-DOF.
Zhao et al. [24]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Calibração de robô híbrido (mecanismo paralelo (3-DOF) e um pulso serial (3-DOF)) através de POE e <i>screw-theory</i> .
Cho et al. [66]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Integração de CPA com formula POE para calibração de três robôs: 9-DOF, antropomórfico e 6-DOF. O erro de posicionamento depois da calibração do robô de 6-DOF foi de 0,3339 mm.
Boldsaiikhan [114]	Simulação do <i>Laser-Tracker</i>	-	-	Metodologia para estimar o comprimento das juntas de um mecanismo de 3-DOF com CPA.
Sun et al. [115]	<i>Laser-Tracker</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	Método FIS para a calibração de um robô serial de 6-DOF, diminuindo o erro de posicionamento de 0,6 mm para 0,09 mm.
Chanal et al. [116]	<i>Laser-Tracker</i>	-	<i>off-line</i>	Método para modelagem do invariante das juntas rotacionais de um manipulador através de 4 parâmetros independentes por cada junta, usando um robô tipo SCARA e CPA. O erro de posicionamento foi reduzido até 0,027 mm.

3.4.3 Modelos de calibração utilizando formula POE

Focar na modelagem do sistema é uma das alternativas para melhorar os métodos existentes da calibração de robôs industriais, como o caso da proposta de Shen et al. [68] que propuseram uma notação para modelar robôs seriais chamada de Linha Perpendicular Comum (em inglês: *Common Perpendicular Line - CPL*). Essa notação está fundamentada na fórmula POE, também usada para a modelagem de manipuladores. A modelagem CPL introduz um movimento de torção finita (em inglês: *twist motion*) com o objetivo de incluir no modelo a diferença entre a torção real e a nominal. Foram feitas simulações e testes em um

robô de 6-DOF, implementando a técnica dos mínimos quadrados para a identificação dos parâmetros definidos pelo modelo CPL. Foram medidas 20 posturas do manipulador com um sensor C-Track e testados em 50 pontos para compensar os erros identificados. Com a calibração usando o modelo CPL foi corrigido o erro de posicionamento máximo de 27,088 mm para 1,983 mm. No entanto, a proposta não justifica a ausência de experimentos em condições reais, já que só foram comparados os testes da simulação com o modelo POE proposto por Yang et al. [117] melhorando a precisão com erros inseridos de forma uniforme.

Uma simulação de um robô tipo PUMA 560 foi feita por Van Toan e Khoi [118] para validar o método de calibração usando a técnica POE (em inglês: *Product of Exponentials Formula*) para modelar o manipulador. Essa técnica permite resolver o problema de singularidade da notação DH quando existem juntas paralelas, porém a abordagem da modelagem POE tem bastante sensibilidade quando existe variação significativa do erro de posicionamento entre as posturas do robô, produzindo alterações consideráveis nos valores dos erros paramétricos. Para diminuir essa sensibilidade foi usada a técnica decomposição em valores singulares (em inglês: *Singular Decomposition Value - SVD*), calculando os parâmetros de erro através de um sistema de equações linearizado, como alternativa ao cálculo da matriz Jacobiana inversa. O método de mínimos quadrados foi utilizado nas equações resultantes para obter os valores dos parâmetros. A solução proposta por Van Toan e Khoi [118] gerou melhores resultados quando foi aplicado ruído na simulação do instrumento de medição, daí a relevância do ajuste dos parâmetros da função para simular o ruído do ambiente de trabalho.

3.4.4 Modelos de calibração utilizando *dual-quaternions*

Os processos de furação têm sido incluídos dentro das atividades feitas pelos robôs industriais, em especial os robôs humanóides (compostos de dois braços), que permitem desempenhar ações semelhantes aos humanos, como a fabricação de placas de circuitos impressos (em inglês: *Printed Circuit Board - PCB*). No trabalho feito por Li et al. [69] um robô humanoide com 8-DOF em cada braço foi utilizado para melhorar a qualidade na fabricação de PCB, sendo compensada a deformação causada pelas forças e torques próprias do processo, usando a modelagem por *dual quaternions* que garante ausência de singularidades. A dita compensação foi feita através de sensores de torque e um *Laser-Tracker*, identificando os parâmetros de rigidez da modelagem proposta pelo algoritmo de mínimos quadrados. O erro máximo de posicionamento passou de 3,5 mm para 1,81 mm num braço e de 4,2 mm para 1,72 mm no outro. Dessa forma é possível melhorar o posicionamento de um robô serial incluindo as características dinâmicas no efetuador atingindo requisitos específicos de precisão.

O mesmo robô humanoide utilizado no trabalho anterior foi utilizado dessa vez para a calibração dos parâmetros cinemáticos, sem considerar a deformação na estrutura do manipulador [45]. No caso, foram implementados dois algoritmos para a identificação dos parâmetros baseados na modelagem *dual quaternions*. A diferença consiste em que um dos algoritmos contém parâmetros redundantes e as juntas rotativas consecutivas não são paralelas. Foram utilizados os mesmos instrumentos de medição escolhidos por Li et al. [69], sem considerar uma carga externa no manipulador. Depois da calibração os dois algoritmos tiveram desempenho semelhantes, passando de 3,3659 mm para 0,4523 mm num braço e de 3,7913 mm para 0,7109 mm no outro. Uma contribuição importante nesse trabalho foi a identificação do vetor de erro *dual quaternions*, permitindo observar a tendência na variação do erro de posicionamento do efetuador.

3.4.5 Modelos de calibração não-paramétricos

A diminuição do erro de posicionamento dos robôs pode ser alcançada sem os métodos convencionais de modelagem analítica, sendo uma solução alternativa para o problema de calibração de robôs. No caso, só é usada a posição final do efetuador como entrada do sistema, tornando os resultados do erro de posicionamento absoluto maiores do que os métodos de calibração convencionais, onde os parâmetros cinemáticos são modelados matematicamente. Por exemplo, Vsvaco et al. [119] desenvolveu um método sem contato usando um sistema de visão-estéreo conectado ao braço do robô para fornecer medições de pontos de calibração no espaço, reduzindo o erro de posicionamento de um robô industrial de 6-DOF de 3,63 mm para 1,29 mm, depois da calibração. O sistema de visão-estéreo contém duas câmeras CCD para desenvolver uma solução de calibração com modelo não-paramétrico. Os resultados desse trabalho foram testados apenas no ambiente de simulação, já que o modelo embarcado no controlador do robô não foi substituído. O método proposto é limitado a 24 pontos medidos para obter os valores estimados de calibração. Desta forma, os métodos convencionais de calibração apresentam melhores resultados que esse tipo de soluções não-paramétricas.

Com a chegada da inteligência artificial no contexto da robótica, a calibração de robôs industriais tem obtido desenvolvimentos usando redes neurais. Por exemplo, o estudo apresentado por Gao et al. [120] onde foi usada uma rede neural do tipo *Back Propagation* (BP) para calibrar uma AACMM. A rede BP foi treinada com dados fornecidos pela cinemática direta modelada com transformações homogêneas, otimizados com o método Monte-Carlo para diminuir o viés nos dados. Desta forma, o procedimento de calibração está focado na definição adequada da estrutura da rede neural, dependendo de um instrumento externo de medição, no caso foi utilizado um braço de medição. O erro médio de posicionamento diminuiu em quase um 97% segundo os autores, mas a quantidade de dados utilizados para o treinamento e validação do modelo precisa maiores pesquisas para validar propostas semelhantes. Esse tipo de técnicas são caracterizadas como compensação, devido ao uso de uma região específica que faz parte do modelo da rede neural, ou seja, para outras regiões o modelo deveria ser treinado novamente.

O tratamento matemático dos dados de posicionamento é uma alternativa para a calibração de robôs industriais, sem incluir os erros paramétricos do modelo cinemático. Desta forma, Cai et al. [49] propuseram um método baseado em um modelo de semivariograma que permite prever o erro de posicionamento, usando um robô de 6-DOF para validar a proposta. Com ajuda de um *Laser-Tracker* foram registrados 300 pontos para obter os parâmetros do semivariograma, e posteriormente com 600 posições adicionais foram compensados os erros de posicionamento calculados diretamente nas coordenadas finais do controlador do robô. O erro de posicionamento máximo passou de 1,2906 mm para 0,2484 mm, validando o desempenho do método proposto. Para projetar o semivariograma foi usada a função gaussiana, mas uma comparação com outro tipo de função poderia fornecer uma análise melhor do procedimento descrito, considerando também a comparação com o modelo analítico do robô, por exemplo.

Com a construção de um instrumento customizado para medir a posição e orientação de um robô de 6-DOF, Luo et al. [9] conseguiram treinar uma rede neural profunda (em inglês: *Deep Neural Network*) para compensar o erro de posicionamento do manipulador. Foram feitas duas medições para completar o procedimento: i) definida como *rough calibration*, permitia procurar a localização do instrumento desenvolvido; ii) definida como calibração precisa, foram usadas 3 câmeras para obter a postura do instrumento

desenvolvido. Para o treinamento e validação da rede tipo ReLu (em inglês: *Rectified Linear Unit*) foram utilizados 960 pontos, permitindo gerar um modelo de compensação, sem necessidade de usar métodos de otimização para identificação dos parâmetros. Em comparação com posturas obtidas pela cinemática do robô, para erros menores de 0,1 mm, o modelo treinado tem uma precisão de 99,82%. Não foi possível comparar nem validar a solução apresentada com outras técnica de IA, ou com métodos analíticos de identificação de parâmetros.

Para avaliar o procedimento de calibração de robôs industriais é importante conhecer o desempenho do manipulador antes de implementar o método de calibração, o que vai permitir validar a efetividade da proposta como é o caso do trabalho apresentado por Nicolescu e Cristoiu [121], no qual por falta de informação do desempenho de um robô industrial de 6-DOF foi necessário implementar um procedimento para validação. A calibração foi feita com um kit específico da ABB que garante a sincronização da leitura dos sensores de cada junta, posteriormente com medições feitas por um *Laser-Tracker*. O desempenho do robô foi avaliado para validar a calibração feita com o kit da ABB. Esse tipo de procedimentos com kit proprietários aumentam o custo da calibração de um manipulador, o que torna viável o uso de métodos alternativos de calibração sem depender de instrumentos complexos e de alto custo.

No trabalho proposto por Niu [46] se descreve um método que permite melhorar a precisão das juntas com procedimentos de calibração para identificar erros geométricos do manipulador. No método de calibração por juntas proposto, são utilizados métodos econômicos, por exemplo, o que consiste em alinhar os pinos de referência da estrutura de robô para cada junta, ou integrar sensores de posição nas juntas como referência. Nessa proposta foi utilizado um robô de 6-DOF e um *Laser-Tracker* para medir a orientação do efetuador, devido a que a posição permanecia constante. Com 50 medições e mediante a otimização por mínimos quadrados usando as equações da cinemática direta, foram identificados os erros das 6 juntas do manipulador. O erro máximo de posicionamento foi de 0,28 mm, permitindo obter um desempenho adequado em relação a métodos de calibração com maior número de parâmetros de erro que registrou um erro de 0,27 mm, mas que não foi detalhado no documento. É uma alternativa válida e simples para diminuir o tempo de processamento, assim como o número de pontos de medição.

Um sistema para a correção dinâmica da postura de robôs industriais usando um C-Track (sensor de visão binocular) para a medição contínua do posicionamento do efetuador foi desenvolvido por Gharaaty et al. [41]. Nesse trabalho foram propostos procedimentos para validar a correção da postura de dois manipuladores de 6-DOF. Para o primeiro robô (carga máxima 5 kg) foi utilizado o TriCal [104] para a correção de uma única postura. No segundo robô (carga máxima 20 kg) o procedimento consistiu em introduzir um objeto cilíndrico (efetuador) em um furo de precisão de uma peça de referência. A modelagem cinemática do sistema não foi necessária, no entanto foram necessários os sistemas de coordenadas do efetuador, o sistema de medição e a peça de referência para calcular o erro da postura. O algoritmo recebe as medições do C-Track e comparando com a postura desejada, gera uma correção simultânea na postura do manipulador, obtendo como resultado um erro máximo de 0,05 mm, ao passo que a calibração convencional (modelagem cinemática) do mesmo robô foi obtido um erro máximo de 0,240 mm. O tempo requerido para a correção de uma postura é menor do que 4 segundos, fornecendo uma alternativa para a calibração de robôs de forma simultânea, mas limitando seu uso na área de visão do instrumento de medição e a aplicação final dentro da indústria.

Um método de avaliação da repetibilidade para um manipulador de 4-DOF foi proposto por Zhang et al. [56], onde uma placa quadrada de calibração chamada de “plataforma XY-theta” é montada no efetuador do robô para obter diferentes imagens mediante uma câmera localizada no eixo vertical, apontando para a plataforma mencionada. Implementando o método de correlação de fase que permite obter a diferença entre duas imagens no domínio da frequência, foi possível medir o erro de posicionamento máximo ($\leq 2\mu m$) quando o efetuador se movimenta ao longo dos eixos X e Y. O método mencionado é de baixo custo e de fácil implementação, mas está limitado pela resolução da câmera, além de desconsiderar o erro associado com o eixo Z.

Um método probabilístico para a calibração de robôs industriais foi proposto por Shammass e Najjar [27] como alternativa aos métodos determinísticos comumente utilizados. Nesse trabalho destaca-se que os parâmetros cinemáticos são atualizados para cada medição, ou para um determinado grupo de medições. Os testes são feitos com um robô de 3 DOF desenvolvido pelos autores e uma placa com seis furos onde o efetuador deve ser posicionado, usando a função Bayesiana para atualizar o valor dos parâmetros e assumindo que esses parâmetros são variáveis aleatórias caracterizadas por distribuições de probabilidade. É necessário mencionar que a maior contribuição de Shammass e Najjar [27] é controlar os limites de confiança para as medições feitas, garantindo um comportamento uniforme dos dados. Mesmo sendo uma proposta nova, não teve maior discussão da diminuição do erro de posicionamento antes e depois da calibração, nem a comparação com as soluções convencionais.

Como alternativa à calibração com modelos paramétricos foi proposto por Lan et al. [122] um dispositivo laser para a medição da rotação das duas juntas de um robô tipo SCARA. Esse protótipo baseado em projeção laser conseguiu melhorar a precisão da posição da junta 1 de 0,007 para 0,002 graus, enquanto a junta 2 teve uma melhora de 0,002 para 0,0006 graus. Mesmo sendo uma proposta nova para medir a rotação e corrigir o erro, para um robô de 6 graus de liberdade o arranjo do dispositivo tem que mudar, condicionando sua aplicação em robôs de grande porte.

Em algumas aplicações a precisão da trajetória é importante, o que torna necessário o controle de movimento em tempo real do robô. O principal problema é que o controlador dos robôs industriais e os parâmetros dinâmicos são desconhecidos pelos usuários. Por isso, a proposta feita por Khaled et al. [123] tenta resolver os desafios mencionados, assim contornando as fontes de erro que impactam no erro de posicionamento. O controlador utilizado na proposta é o Controle Ativo de Rejeição de Perturbação (em inglês: *Active Disturbance Rejection Control -ADRC*), usando um sistema tipo *ballbar* como sensor de posicionamento de um robô de pequeno porte de 6-DOF. A informação necessária pelo controlador não é derivada de um conhecimento prévio do modelo matemático do robô, mas sim da informação de erro do efetuador medido pelo sensor tipo *ballbar* para estimar os vetores de posição e velocidade da trajetória. O erro radial depois de implementar o controle mencionado passou de 0,421 mm para 0,024 mm, tornando a proposta viável para ser implementada em robôs industriais e ser avaliada em aplicações reais que requeiram precisão da trajetória.

Um dispositivo integrado por três sensores de deslocamento laser foi projetado e testado na medição da precisão de um manipulador [124]. O dispositivo permite a medição de pelo menos três posições distintas na superfície de uma esfera fixada ao efetuador do robô, possibilitando calcular o centro da esfera a partir do ponto de intersecção de três linhas ortogonais. Posteriormente o erro de posicionamento entre

as posições calculadas e desejadas do centro da esfera permitiu comparar a repetibilidade resultante com o dispositivo proposto e a informação fornecida pelo fabricante do robô HSR-JR605 de 6-DOF em 120 posturas diferentes, resultando em uma repetibilidade 0,06 mm, em comparação com 0,04 mm informada pelo fabricante. Com os resultados alcançados é possível destacar o aumento da faixa de medição e maior precisão quando é utilizado um único sensor de deslocamento [31], que pode servir para calibrar os erros cinemáticos de manipuladores, segundo os autores.

3.4.6 Modelos de calibração híbridos

Os modelos de calibração híbridos descritos a seguir podem-se definir como a integração das vantagens dos modelos paramétricos e não-paramétricos para diminuir o erro de posicionamento dos robôs, como é o caso de robôs com estrutura mecânica pesada onde devem ser considerados os erros não-geométricos, como deflexão das juntas, por exemplo. Por tal motivo a proposta feita por Wang et al. [10] contempla a divisão do espaço de trabalho dos ângulos das juntas, visando diminuir o erro de posicionamento do efetuador. No caso, foi feita uma análise da distribuição de massa para um robô de 8-DOF e 5500 Kg de peso, observando que a junta 6 tinha alto impacto na deflexão geral do sistema. A modelagem do robô foi feita com transformações homogêneas, usando 35 parâmetros de erro identificados através da medição de 400 pontos divididos em quatro grupos, relativos à divisão do espaço de trabalho da variação da junta 6. Depois da calibração foi treinada uma rede neural com o intuito de prever erros não-geométricos ausentes no modelo. O erro médio de posicionamento foi reduzido de 9 cm para 4,5 cm, validando a proposta de um método híbrido de calibração.

Mesmo que os procedimentos de calibração só usem a cinemática direta para compensar os erros, existem aplicações que usam a cinemática inversa para enviar a posição corrigida ao controlador do robô, como o caso da solução apresentada por Alamdar et al. [125], propondo um método híbrido, onde o modelo de erro de um robô cirúrgico “Sina” de 5-DOF foi calibrado através medições feitas por um rastreador infravermelho, implementando métodos de mínimos quadrados para a identificação dos parâmetros, enquanto a cinemática inversa foi obtida através de uma rede neural MLP. A validação foi feita mediante trajetórias circulares, frequentemente usadas nas aplicações desse tipo de robôs, onde o modelo IA diminuiu o erro de posicionamento de 5,94 mm para 0,54 mm, enquanto o modelo calibrado baseado em transformações homogêneas teve um erro final de 2,42 mm. Pode ser destacado que o modelo IA foi treinado com dados sintéticos baseados no modelo de erro corrigido, o que permite demonstrar a aplicabilidade de métodos híbridos de calibração.

Usando o método FIS para a modelagem de robôs, foi proposto por Sun et al. [126] um procedimento para a compensação dos parâmetros de erros identificados com um algoritmo genético híbrido, o qual permite obter valores ótimos levando em conta as características dos algoritmos de busca global e local. Um robô UR3 de 6-DOF foi utilizado nos testes, assim como a medição de 100 e 200 posturas que permitiram a identificação, validando o modelo calibrado com 20 posturas adicionais. O erro médio de posicionamento diminuiu de 7,7084 mm para 0,4916 mm, o que torna o método válido para várias aplicações industriais com tolerâncias de precisão inferiores a 0,5 mm. Cabe ressaltar o uso de um algoritmo de busca heurística como alternativa para lidar com os mínimos locais.

Comumente os algoritmos de mínimos quadrados caem no dilema da estagnação em soluções locais,

enquanto algoritmos baseados em IA permitem contornar essa característica na identificação de parâmetros em problemas não lineares. A proposta feita por Luo et al. [127] permite integrar as vantagens do algoritmo L-M para a identificação dos erros paramétricos de um modelo baseado em transformações homogêneas, para depois gerar populações dentro de faixas empíricas segundo os valores calculados, usando o algoritmo de Evolução Diferencial (em inglês: *Differential Evolution* - DE). Uma das contribuições relevantes do trabalho mencionado é a compensação feita em trajetórias usadas em aplicações de polimento, depois de calibrar um robô FANUC M710 de 6-DOF e um *Laser-Tracker*, diminuindo o erro de posicionamento de 0,994 mm para 0,262 mm, usando o método híbrido (L-M e DE) na identificação dos parâmetros de erro.

3.4.7 Calibração simultânea de múltiplos robôs

A calibração de robôs industriais também pode ser aplicada em ambientes cooperativos com vários robôs. Por exemplo, numa estação de trabalho para o esmerilhamento de peças foi proposto um método de calibração para a estrutura da base dos robôs envolvidos nesse procedimento [128]. Usando visão binocular (duas câmeras fixas) e a teoria de transformação de coordenadas foi obtida a matriz que relaciona dois robôs industriais, diminuindo o erro de posicionamento da trajetória programada nos controladores dos robôs e garantindo a sincronia do processo. O método tem bastante semelhança com a calibração *hand-eye*, onde as transformações entre sistemas de coordenadas do robô e dos instrumentos de medição tem grande relevância no processo. Uma das dependências desse tipo de métodos é a resolução do pixel da câmera, restringindo a precisão ao custo do instrumento de medição.

Wang et al. [129] propuseram um método para a calibração do sistema de coordenadas da base do robô e o sistema de coordenadas do espaço de trabalho. Usando a álgebra baseada em *dual quaternion* foi modelada a cinemática direta de um manipulador de 7-DOF, e junto com um laser tracker (sistema de referência) foi possível obter a transformação do sistema de coordenadas da base do robô e o sistema de coordenadas do espaço de trabalho, usando 24 posturas para a medição. A proposta é uma contribuição significativa na calibração tipo *hand-eye* ou em aplicações com multi-robôs, em especial onde a rotação e posição são indispensáveis para a calibração, ou mesmo para gerar a programação *off-line* de robôs em relação a sistemas de coordenadas diferentes da base do manipulador.

Um método semelhante para a calibração de um robô industrial dedicado a processos de usinagem foi proposto por Al Khawli et al. [1], identificando a transformação de coordenadas entre um *Laser-Tracker* e a ferramenta de um robô de 6-DOF. Nesse trabalho foram utilizados dois métodos para identificar os valores de orientação e posição da matriz que relaciona os sistemas de coordenadas do instrumento de medição e a ferramenta, com o intuito de comparar o desempenho entre um método de otimização para sistemas não lineares e algoritmos de inteligência artificial. De forma semelhante a proposta descrita anteriormente, nesse método não existem valores para quantificar a diminuição do erro de posicionamento, deduzindo que esse tipo de método pode ser apropriado para sincronizar os sistemas de coordenadas próprios dos elementos de um sistema robótico, mas não para sua calibração, devido ao fato de não compensar os erros de posicionamento.

3.4.8 Calibração tipo *Hand-Eye*

A tendência crescente de sistemas de processamento de imagens também aumentou as alternativas nas aplicações em robôs industriais, principalmente na montagem, posicionamento de peças e inspeção não destrutiva. Os robôs equipados com dispositivos de processamento de imagens não só podem detectar a posição, como também podem assumir as tarefas de forma ativa nas aplicações com métodos de inteligência artificial [130]. Para que o robô obtenha uma estimativa precisa da posição e orientação de um objeto relativo à sua própria base dentro do espaço de trabalho é necessário conhecer a posição e orientação relativa entre o efetuador e a base do robô, entre a câmera e o efetuador, e finalmente, entre o objeto e a câmera. Essas três relações requerem a calibração do robô, da câmera, e do efetuador com a câmera, cuja última relação se conhece como *Hand-Eye*. Portanto, a calibração *Hand-Eye* garante que as medições feitas pela câmera sejam convertidas à referência usada pelo robô [131].

Na proposta de Miseikis et al. [132] foram usadas três câmeras Kinect (640×480 pixels) no desenvolvimento de um sistema flexível que permite usar outro tipo de câmeras para sensoriamento 3D, assim como qualquer posturas de robô serial. A calibração *Hand-Eye* foi usada para correção de posicionamento automático, onde o efetuador tem um tabuleiro de xadrez adaptado, o qual é detectado pelos sensores Kinect. O ROS foi utilizado para controlar o robô UR5 de 6-DOF, no entanto a integração com outros controladores de robôs industriais é limitada pela compatibilidade com o ROS. Foi uma proposta simples e focada no ambiente robótico colaborativo, mas o erro absoluto inicial e depois da calibração não está disponível para comparação com trabalhos relacionados.

Uma solução alternativa para a calibração tipo *hand-eye* foi proposta por Deniz e Cakir [130], onde a equação característica $AX = BX$ foi resolvida como problema de orientação absoluta. Para isso, foi necessário o uso de quaternions para modelar um robô de 6-DOF, assim como a medição de 30 posturas em relação a um *checkerboard*. Métricas de diminuição do erro após a calibração não foram apresentadas, pois não era o objetivo do artigo, e sim propor uma perspectiva diferente para esse tipo de calibração de robôs industriais, mas não foram apresentados dados reais para avaliar o sucesso dos resultados.

Foi proposto um método *Hand-Eye* por Zhang et al. [133] que usa um ambiente de simulação aberto para a geração da trajetória de um robô real UR5 de 6-DOF. Os resultados relataram o erro mínimo obtido de 1,5 mm, usando o método local POE na modelagem. Dessa forma, sistemas de câmeras como dispositivos de medição para procedimentos de calibração de robôs são uma solução de custo-benefício, em comparação com dispositivos mais custosos, por exemplo, o *Laser-Tracker* ou CMM, como alternativa para construir uma solução acessível para aplicações industriais e acadêmicas.

O “objeto padrão para calibração” (em inglês: *calibration object*) tem um papel relevante na calibração *Hand-Eye*, permitindo obter a transformação de coordenadas que relaciona o efetuador e a câmera. No entanto, existem aplicações que não precisam do objeto de calibração para calcular essa relação, como o caso de Li et al. [134] que propuseram um método que calcula de forma simultânea as transformações de coordenadas associadas ao efetuador com a câmera e a base do robô, com relação ao espaço de trabalho, sem precisar de um objeto de calibração. O método foi comparado com três propostas que usaram um objeto de calibração para obter a transformação relativa ao efetuador e a câmera. O trabalho mencionado conseguiu obter melhores resultados, mesmo sem usar um objeto de referência para a calibração dos parâmetros intrínsecos da câmera. Com o método mencionado é possível diminuir o tempo de calibração

Hand-Eye, além dos elementos necessários para o procedimento.

Em procedimentos tipo RMIS a calibração *Hand-Eye* tem bastantes desafios devido à necessidade da precisão na faixa de milímetros, portanto existem vários trabalhos desenvolvidos para obter a relação do instrumento utilizado para as cirurgias e o efetuador do robô, como a proposta feita por Pachtrachai et al. [135] onde foram usadas restrições associadas com a teoria *screw* para definir as transformações da calibração *Hand-Eye* ($AX = BX$), junto com a informação obtida por uma câmera estereoscópica (usada em RMIS), estimando a translação e a rotação de forma simulada e real com um robô de 6-DOF. Cabe destacar que na simulação do procedimento de calibração foi incluído ruído no sistema, obtendo resultados satisfatórios na parte experimental, comparativamente a propostas semelhantes.

Estimar a transformação de coordenadas que relaciona a câmera com o efetuador do robô evitando a influência da falta de exatidão da calibração dos parâmetros da câmera, junto com a movimentação do robô é o objetivo da proposta feita por Zhang et al. [136]. Para isso, foi estabelecida uma função objetivo que permitisse estimar os parâmetros das transformações definidas, considerando varias posturas do robô. Os parâmetros estão associados com as transformações do objeto padrão de calibração e a base do manipulador, a base do manipulador e o efetuador, o efetuador com a câmera, e finalmente a câmera com o plano da imagem. Dessa forma, a re-projeção estimada e as coordenadas da imagem na câmera permitem minimizar a função objetivo como um problema de mínimos quadrados, resolvido com o algoritmo L-M. Na parte prática foram feitas 12 medições e os resultados foram comparados com o trabalho desenvolvido por Tsai e Lenz [137], diminuindo o erro da re-projeção estimada. Cabe mencionar, que o método descrito foi utilizado para a reconstrução de imagens 3D com um erro RMS de correspondência próximo de 0,1 mm, como possível aplicação da calibração *Hand-Eye* em robôs seriais.

Um procedimento para usar visão monocular (em inglês: *monocular vision* - MV) consistiu em estimar os parâmetros DH sem precisar de um modelo paramétrico [138], através do conceito Vetor Axial de Junta (em inglês: *Joint Axis Vecto* - JAV) e da SVD, movimentando todas as juntas de um manipulador. Inicialmente o procedimento foi simulado com níveis de erro associados ao ruído da medição, e os resultados se comparam com um *Laser-Tracker* e um *Total Station* (TS). Nos resultados práticos se usou um padrão de calibração 3D para sistemas tipo MV chamado de *Market Maps*. Destaca-se na proposta a desconsideração da informação a priori dos valores DH nominais estimando-os com o procedimento proposto e integrando o conceito com a técnica CPA para analisar os dados na movimentação de cada junta e validar o conceito JAV, inclusive foram usadas métricas para comparar a viabilidade da proposta feita com dois sensores adicionais. No entanto, o procedimento em ambientes industriais não foi considerado, mesmo que os resultados permitissem comparar o valor RMS entre o posicionamento do efetuador usando os parâmetros DH identificados e as medições feitas com o *Laser-Tracker* como referência, ou seja, 2,76 mm. No entanto, foram obtidos melhores resultados do que com o TS, considerando o *Laser-Tracker* como referência. O RMS entre os valores DH nominais e o *Laser-Tracker* foi de 3,45 mm.

Estimar a transformação homogênea da base do robô e o sistema de coordenadas de referência se conhece como calibração *Robot-World-Hand-Eye*, como uma alternativa à calibração *Hand-Eye*. Com isso, a proposta feita por Ali et al. [139] permitiu detalhar várias funções de custo para as duas formulações mencionadas adotando a minimização do erro de posicionamento e de reprojeção. A construção de 6 *datasets* combinando tipos de câmeras, lentes, padrões de calibração e posturas de robôs seriais foi uma

das contribuições importantes desse trabalho, pois 3 *datasets* consideram dados reais com um robô KUKA KR16L6-2 de 6-DOF e duas lentes diferentes em duas câmeras. Quanto aos restantes 3 *datasets* foram construídos de forma sintética, implementando um modelo de incertezas em termos de erros de pixel e posturas para induzir ruído “real” nos dados simulados. Usando métricas como o erro de rotação, erro de translação, erro de reprojeção etc., foram comparados os resultados obtidos com seis trabalhos presentes na literatura, com os 6 *datasets* propostos. A maior contribuição foi a otimização não linear das funções de custo nas duas formulações mencionadas, com resultados aceitáveis quanto ao erro de reprojeção, em especial com o ruído característico dos dados reais. É importante a comparação das formulações baseadas em controle servo visual segundo as diferentes aplicações, permitindo especificar os requisitos de precisão a partir do método de calibração utilizado.

Enquanto os métodos existentes para a calibração *Hand-Eye* consideram a precisão necessária para aplicações reais em várias áreas, isso não acontece no contexto do RMIS. Devido ao fato dos robôs terem restrição mecânica para se movimentar ao redor do centro remoto de movimento (em inglês: *remote center of motion - RCM*), o qual é estabelecido na ponta do instrumento para minimizar a chance de danificar os tecidos circundantes. Para aumentar a precisão e implementação da calibração *Hand-Eye* em aplicações RMIS, uma nova abordagem foi proposta por Pachtrachai et al. [140] para evitar soluções mal-condicionadas incorporando as restrições de movimento RCM na formulação tradicional *Hand-Eye*. Os resultados foram comparados com cinco algoritmos existentes na literatura, com dados simulados e reais. No caso dos experimentos reais foi utilizado o robô KUKA R820 de 6-DOF e uma sonda customizada integrada com uma câmera estéreo, incluindo a restrição de movimento RCM e permitindo de movimentação dos 6-DOF. O erro de rotação, os resíduos da equação *Hand-Eye* e o erro na re-projeção foram consideradas como métricas para avaliar o desempenho dos algoritmos mencionados, onde o método proposto teve melhores resultados tanto na restrição de movimentação RCM e sem a restrição. É necessário ressaltar que sendo uma proposta nova para a calibração *Hand-Eye* e a inclusão de RCM, ainda o erro é alto para aplicações RMIS, se tornando uma solução admissível dentro do contexto RMIS.

A maioria de propostas que permitem a calibração tipo *Hand-Eye* em robôs industriais estimam a transformação de coordenadas entre o efetuador e o sistema de referência associado com a lente da câmera fixada no efetuador. Essa estimativa é feita mediante a obtenção de imagens de padrões capturadas pela câmera, porém Koide e Menegatti [141] propuseram um método que considera as observações da postura da “mão”, onde a câmera montada no efetuador do robô não tenha influência na calibração *Hand-Eye*. Com simulações e experimentos com dois tipos de câmeras diferentes foi demonstrado que o método proposto por Koide e Menegatti [141] tem melhor desempenho na estimativa da postura, comparado com os métodos existentes. A calibração tipo *Hand-Eye* é essencial para processos de inspeção de produtos [142] e montagem [143], o que torna interessante não depender do sensor montado no manipulador.

Existem fatores que influenciam a precisão dos resultados da calibração *Hand-Eye*, como a precisão da movimentação do robô, a existência de propagação de erros de rotação e translação, assim como a calibração dos parâmetros extrínsecos da câmera [136]. O ruído é o maior problema na calibração *Hand-Eye*, caracterizado pelas perturbações na montagem do robô e da câmera, gerando certo grau de incerteza nos resultados da calibração. O ruído pode ser classificado de duas formas: devido à movimentação do robô e por conta da movimentação da câmera, o ruído associado com a movimentação do robô se associa aos sensores presentes no robô (enconders, resolvers etc.) e dependem de fatores como a modelagem do

robô, características mecânicas da estrutura, componentes do robô e erros relativos aos sensores presentes em cada junta do robô [131]. O ruído gerado pela movimentação da câmera está relacionado com sua própria calibração, como resultado da baixa qualidade da câmera, estimativa deficiente dos parâmetros, baixa qualidade do padrão de calibração etc. Esses erros, mesmo sendo pequenos no que diz respeito à câmera em si, podem se propagar e diminuir o desempenho da calibração *Hand-Eye* [144].

Os robôs cooperativos conseguem oferecer soluções viáveis para tarefas relacionadas com várias aplicações, devido às vantagens em termos de flexibilidade e colaboração, como a soldagem e/ou montagem, onde um robô assegura a peça e o outro robô executa a trajetória da tarefa, sob a orientação de um sensor de visão. Portanto, para esse tipo de aplicações com dois robôs se estendeu o problema clássico da calibração *Hand-Eye* ($AX = XB$) para o problema da calibração *dual-robot*, sendo a sua formulação $AXB = YCZ$ (*Eye-Hand*). Para contornar a identificação separada dos parâmetros de rotação e translação, assim como a influencia do ruído na medição desse tipo de calibração foi proposta uma abordagem para usar *dual-quaternions* e unificar a matriz rotacional e translacional na solução do problema mencionado, diminuindo a sensibilidade ao ruído das medições. Inicialmente os resultados foram apresentados através de simulação definindo níveis de ruído, assim como o uso de várias medições que permitiram validar a solução baseada em *dual-quaternions*. Posteriormente, usando dois robôs de 6-DOF, uma câmera 2D e um padrão de calibração tipo *chessboard* foram identificadas as matrizes X , Y e Z e comparados os resultados com dois métodos semelhantes através das métricas de erro rotacional e translacional. O método proposto por Fu et al. [145] teve melhor desempenho comparado com os outros métodos, em relação às métricas escolhidas e considerando a calibração simultânea das incógnitas associadas (X , Y e Z).

As etapas de pré-processamento na medição, como filtragem de ruídos, reduzem a incerteza da postura final, mas a estimativa adequada do erro sistemático da postura apresenta maior dificuldade, devido ao fato de precisar comparações das posturas (6-DOF) medidas em dois sistemas de coordenadas diferentes. Portanto, métricas para medir o desempenho da calibração baseada no método restauração da condição corporal rígida (em inglês: *Restoration of Rigid Body Condition - RRBC*), consideram dois sistemas de coordenadas diferentes. O método proposto por Franaszek et al. [146] consiste na estimativa dos erros de orientação e posição a partir da interpolação linear da postura medida pelo sistema de medição e do modelo cinemático do robô, utilizando a formulação $AX = YB$ (*Hand-Eye*). Para os testes foi utilizado um manipulador KUKA LWR4 de 7-DOF, no entanto a terceira junta foi bloqueada para garantir um modelo 6-DOF, aliás um sistema de captura de movimento com três câmeras e um *Laser-Tracker* foram utilizados para a avaliação e comparação das métricas propostas. A abordagem requer que as distâncias entre quaisquer dos pontos 3D medidos sejam fixas, no caso o *Laser-Tracker* gerou medições com menor incerteza e maior precisão comparado com o sistema de captura de movimento. Os dados coletados afetam mais a redução do erro de orientação, do que do erro de posição, o que é principalmente porque o componente de posição das posturas (6-DOF) fornecida pelo sensor é definido como o centroide de três pontos 3D.

A formulação mais usada para a calibração *Hand-Eye* visa determinar a matriz de transformação que relaciona os sistemas de coordenadas do robô e da câmera, do tipo $AX = BX$. No entanto, existem métodos alternativos baseados em soluções não determinísticas e probabilísticas, como técnicas de minimização do erro de re-projeção (em inglês: *reprojection error minimization*) e em redes neurais artificiais [131]. No contexto da robótica cirúrgica, a calibração *Hand-Eye* se caracteriza por ser um problema com alto grau de complexidade, devido à precisão exigida, além do grande deslocamento próprio das câmeras

endoscópicas e o efetuador do robô [135]. A seguir são analisados alguns trabalhos associados com a calibração *Hand-Eye*, permitindo apresentar os procedimentos que são adotados nos métodos de calibração com sistemas de medição externos e suas aplicações.

Existem aplicações com robôs que requerem informação 3D e de profundidade para reconstruir modelos 3D dos objetos alvo para posterior manipulação, o que torna as câmeras estéreo uma alternativa para solucionar o problema da calibração *Hand-Eye*. Desse modo, a técnica de correspondência de conjunto de pontos (em inglês: *Point Set Matching*) foi usada para formular e solucionar a calibração *Hand-Eye* com câmeras estéreo [147]. O procedimento consistiu em usar pontos 3D definidos em dois sistemas de coordenadas diferentes, através de dois algoritmos para estimar os parâmetros de rotação e translação da matriz X no problema $AX = XB$ de forma independente e simultânea. Foi utilizado um robô KUKA LWR de 6-DOF e um dispositivo que integrava um parafuso para o contacto dos pontos definidos no padrão de calibração e a câmera estéreo. O desempenho dos dois algoritmos propostos baseados em *Point Set Matching* foi comparado com outros métodos da literatura através de duas métricas: erro de precisão de reconstrução (em inglês: *Reconstruction Accuracy Error - RAE*) e Erro de Rotação e Translação Combinada (em inglês: *Combined Rotation and Translation Error - RMCE*). Adicionalmente, os métodos de calibração foram aplicados para a reconstrução de uma nuvem de pontos do objeto alvo. Os métodos com menor valor RAE obtiveram os melhores resultados na reconstrução, sendo estes os que consideraram a técnica *Point Set Matching*. Uma das limitações da proposta é a necessidade de contacto físico da ferramenta do robô com o padrão de calibração, além da falta de especificidade de processos ou aplicações industriais que poderiam se beneficiar com a proposta descrita.

Para o monitoramento da soldagem automática com robôs industriais existe um método conhecido como sistema de visão laser (em inglês: *laser vision system*), o qual usa uma câmera para coletar as imagens das listras do laser que contêm informações da posição do cordão da solda. Esse tipo de método integra os procedimentos da calibração *Hand-Eye* e as características da calibração de luz estruturada, desse modo, Zou et al. [148] propuseram um método para a calibração de um sistema de visão laser para soldagem com robôs usando uma rede adversária geradora (em inglês: *Generative Adversarial Network - GAN*) que consegue otimizar os parâmetros de calibração através da aprendizagem semi-supervisionada. Para isso, um robô YASKAWA MA1440 de 6-DOF e o sistema de visão laser permitiu coletar 10 grupos de dados, permitindo treinar e validar o modelo através de dois experimentos. No primeiro, foi avaliada a posição de um ponto de referência, enquanto no segundo experimento foi avaliada a trajetória de solda, resultando em um erro de posicionamento menor de 0,4 mm nos dois casos. Esse tipo de métodos mesmo que sejam pouco explorados na calibração *Hand-Eye* consideram aplicações reais com soldagem, ressaltando a integração de métodos de calibração em operações industriais.

A calibração *Hand-Eye* também tem sido aplicada na manufatura aditiva por fio e arco (em inglês: *Wire and Arc Additive Manufacturing - WAAM*) especificamente no reparo de peças devido às características intrínsecas da operação automatizada, alta eficiência e baixa perda de material. No trabalho feito por Wu et al. [149] foi proposto um método de baixo custo para calibração baseado em visão estéreo e análise de imagens no processo de reparação tipo WAAM com robôs industriais. Os testes permitiram validar que o erro de posicionamento estivesse dentro dos requisitos, possibilitando a implementação em linhas de produção. Além disso, o método é especialmente adequado para situações onde os ambientes não são acessíveis por humanos. Artefatos adicionais são desnecessários, como blocos de calibração, podendo

reduzir o custo e a complexidade da calibração em comparação com outros métodos.

Outra proposta baseada na calibração *Hand-Eye* permite a identificação cinemática de um robô industrial utilizando uma única câmera montada no efetuador [150], onde imagens 2D são obtidas para diminuir as etapas do processo de calibração em relação à aquisição de imagens 3D. Uma característica importante dessa proposta foi a integração da técnica CPA junto com técnicas paramétricas de identificação, possibilitando a utilização de uma estratégia experimental conjunta. Os erros de posicionamento após a estimativa foram verificados, primeiro por meio de simulação, onde foram analisadas e escolhidas as regiões de medição em relação ao condicionamento do Jacobiano, e posteriormente a validação foi feita com um robô KUKA KR5 de 6-DOF para soldagem de arco. Mesmo que tenha obtido o valor de erro de posicionamento inferior a 1 mm, existem limitações devido às restrições do campo de visão da câmera, além de estar fora dos requisitos de precisão em indústrias específicas.

A calibração *Hand-Eye* é um campo ativo tanto na robótica quanto na visão computacional, devido à importância da precisão em indústrias automotivas e aeroespaciais. Por exemplo, para operações de soldagem na indústria automotiva um nível de precisão de 1 mm pode ser necessário, enquanto a precisão de pelo menos dez a vinte vezes menor seria necessária na indústria aeroespacial. Níveis de precisão semelhantes também podem ser encontrados em aplicações robóticas no setor da saúde, onde a segurança é vital [131]. Atingir esses níveis de precisão se torna um desafio na integração das vantagens da calibração baseada em sub-regiões e *Hand-Eye*, visando disponibilizar soluções flexíveis e de baixo custo que garantam os requisitos de precisão de indústrias específicas.

Na Tabela 3.6 se apresenta um sumário dos trabalhos associados à calibração *Hand-Eye*, mas a diferença das tabelas apresentadas neste capítulo, não se indicam as técnicas usadas na identificação, porque as técnicas escolhidas pelos autores não estão implícitas em todos os trabalhos analisados.

Tabela 3.6: Breve sumário dos trabalhos analisados na Subseção 3.4.8

Autores	Tipo de modelagem	Instrumentos de Medição	Tipo de Compensação	Principal Contribuição
Miseikis et al. [132]	-	Três câmeras Kinect	calibração simultânea	Correção de posicionamento automático usando ROS.
Deniz e Cakir [130]	Quatérnions e $AX = BX$	Câmera e <i>checkerboard</i>	<i>off-line</i>	Solução através de problema de orientação absoluta.
Zhang et al. [133]	Fórmula POE e $AX = BX$	Simulação	<i>off-line</i>	Erro mínimo obtido de 1,5 mm.
Li et al. [134]	$AX = BX$	Câmera	Calibração simultânea	Calibração <i>Hand-Eye</i> sem precisar de um objeto padrão de calibração.
Pachtrachai et al. [135]	<i>Screw theory</i> e $AX = BX$	Câmera estereoscópica	<i>off-lie</i>	Aplicação da calibração <i>Hand-Eye</i> em procedimentos tipo RMIS.
Zhang et al. [136]	$AX = BX$	Câmera e objeto padrão	<i>off-lie</i>	Função objetivo baseada na re-projeção estimada e as coordenadas da imagem para identificação dos parâmetros, integrando o L-M.
Hayat [138]	$AX = BX$ e JAV	Câmera e MV	<i>off-line</i>	Estimar os parâmetros DH sem precisar de um modelo paramétrico, comparando os resultados com TS e <i>Laser-Tracker</i> .

Ali et al. [139]	<i>Robot-World-Hand-Eye</i>	Câmeras, lentes e objetos padrões	<i>off-line</i>	Funções de custo para a formulação proposta adotando a minimização do erro de posicionamento e de reprojeção.
Pachtrachai et al. [140]	$AX = BX$	Sonda customizada integrada com uma câmara estéreo e RCM	<i>off-line</i>	RCM para aplicações RMIS na calibração <i>Hand-Eye</i> .
Koide e Menegatti [141]	$AX = BX$	Dois tipos de câmeras	<i>off-line</i>	Método que considera as observações da postura da “mão”, onde a câmera montada no efetuador não tem influência na calibração <i>Hand-Eye</i> .
Fu et al. [145]	<i>dual-quaternions</i> e $AXB = YCZ$	Uma câmera 2D e um padrão de calibração tipo <i>chessboard</i>	Calibração simultânea	Foi estendida a formulação <i>Hand-Eye</i> para aplicações de robôs cooperativos (<i>dual-robot</i>).
Franaszek et al. [146]	$AX = YB$	Três câmeras e um <i>Laser-Tracker</i>	Calibração simultânea	Calibração baseada no método RRBC com dois sistemas de coordenadas diferentes.
Qiu et al. [147]	$AX = YB$	Dispositivo de contato e câmera estéreo	Calibração simultânea	Uso da técnica <i>Point Set Matching</i> para solucionar o problema <i>Hand-Eye</i> .
Zou et al. [148]	$AX = YB$	Sistema de visão laser	<i>off-line</i>	Integração de de técnicas para aprendizagem semi-supervisionada na calibração <i>Hand-Eye</i> para soldagem.
Wu et al. [149]	$AX = YB$	Sistema de visão estéreo	<i>off-line</i>	Aplicação de <i>Hand-Eye</i> para o processo de reparação tipo WAAM.
Boby [150]	$AX = YB$ e CPA	Câmera	<i>off-line</i>	Identificação cinemática com <i>Hand-Eye</i> e CPA em aplicações de soldagem com arco, com erro de posicionamento inferior a 1 mm.

3.5 Calibração de robôs paralelos

Junto com os robôs manipuladores ou robôs seriais se destacam os mecanismos paralelos sobre-restritos (em inglês: *Over-constrained parallel mechanism*), os quais tem atraído muita atenção tanto na academia quanto da indústria porque têm alta rigidez, suportam altas cargas e boa resposta dinâmica. Sun et al.[40] desenvolveram um protótipo com essa características, considerando um projeto mecânico otimizado e com o intuito de melhorar sua exatidão no posicionamento. Os autores decidiram usar o modelo da cinemática inversa do mecanismo paralelo para fazer a calibração, dessa forma introduziram os erros no modelo para modificar os valores dos motores e garantir a compensação do erro. Foi utilizado um *Laser-Tracker* para medir os pontos estabelecidos dentro da plataforma móvel do mecanismo paralelo. Para a identificação dos erros geométricos foi utilizado um algoritmo genético híbrido (em inglês: *hybrid genetic algorithm* - HGA), depois de comparar com outros quatro algoritmos de otimização não-linear. Foi simulado o procedimento de calibração, introduzindo erros de medição uniformes com média nula e desvio padrão de 0,01 mm. Cabe ressaltar que no método proposto os erros geométricos foram adicionados considerando a análise da cinemática inversa, enquanto nos métodos tradicionais as equações cinemáticas são derivadas para obter o modelo de erro.

Dois modelos de calibração baseados em erros de natureza geométrica para um protótipo de robô delta foram desenvolvidos por Bai et al. [151]. A diferença entre os modelos foi o número das fontes de erros, considerando a precisão e a orientação da plataforma móvel do robô. Com o procedimento proposto da seleção de postura ótima, foram identificados valores de erro para os dois modelos e o processo de calibração foi validado com um *Laser-Tracker*. O modelo proposto com menor número de fontes de erros foi recomendado porque o outro modelo teve pouca relevância com os resultados do trabalho. Portanto, é possível afirmar que o um modelo com maior número de fontes de erros modelados não necessariamente é melhor.

Como alternativa à identificação de parâmetros num único modelo de erro, Hu et al. [36] propõe um método para a calibração de um robô paralelo de 6-DOF, onde a técnica Separação de Parâmetros Identificáveis (em inglês: *Identifiable Parameters Separation - IPS*) é usada para reduzir o efeito de acoplamento e a incerteza no modelo de erro. Junto com a modelagem de todos os parâmetros, destaca-se o 15% de redução no tempo das iterações necessárias para obter os valores de 60 parâmetros do robô com a técnica IPS, em comparação com métodos tradicionais. Além do tempo de processamento, a diminuição do erro de posicionamento foi maior usando a técnica IPS, passando de um erro máximo de posicionamento de 8 mm para 0,4 mm de erro. De outra forma, usando um método tradicional, o erro final esteve em torno de 1 mm. No caso de um robô com um número de parâmetros alto, em comparação com outras configurações de robôs, o IPS é uma alternativa válida que permite uma calibração mais rápida e com maior correção do erro de posicionamento.

Os robôs paralelos atuados por cabos (em inglês: *cable-driven parallel robots*) se caracterizam por ter o efetuador suspenso por vários cabos flexíveis no lugar dos elos rígidos dos tradicionais robôs paralelos [152]. Dessa forma, uma proposta para a calibração de um robô paralelo atuado por cabos foi apresentado por Qian et al. [74], onde a partir da cinemática direta foi deduzida a fórmula que deveria ser otimizada com o método de mínimos quadrados para identificar 12 parâmetros associados com o modelo de erro. Com 60 posturas candidatas foram selecionadas apenas quatro, mediante as métricas do índice de observabilidade, podendo implementar o método proposto em ambiente simulado e experimental. Na simulação foram inseridos erros randômicos nos parâmetros, mas não foi detalhado se o comportamento gaussiano foi observado. Na parte experimental, foi utilizado um sistema de captura de movimento composto de quatro câmeras que conseguem obter a posição de marcadores fixados em diferentes partes da estrutura do robô. O erro volumétrico foi reduzido de 23,4805 mm para 0,6157 mm. É necessário comparar esse tipo de resultados com um maior número de medições, ou justificar os efeitos do reduzido número de medições para a calibração.

Simplificar a modelagem para a identificação dos parâmetros cinemáticos na calibração de um manipulador paralelo tipo 3-PRS é a premissa fundamental do trabalho desenvolvido por Chen et al. [25]. Foi definida uma abordagem de duas etapas para simplificar o processo de identificação: na primeira foram descritos geometricamente os parâmetros associados com as juntas esféricas e os planos formados pelos braços; enquanto na segunda etapa foram descritas as equações para identificar os parâmetros dos braços do robô. Finalmente, uma função objetivo foi definida em cada etapa, usadas para encontrar os valores dos parâmetros, implementando o algoritmo Newton-Euler. Utilizando um *Laser-Tracker* foi medida a posição da base do robô em 216 posturas diferentes, deixando a metade para identificar os parâmetros com o método proposto por Chen et al. [25] e o restante para validar o desempenho da calibração. O erro de

posicionamento foi reduzido de 1,64 mm para 0,0156 mm, validando o método descrito com uma definição adequada das características geométricas.

Analisar a precisão no posicionamento de um mecanismo paralelo para otimizar o projeto da estrutura foi a proposta de Ding et al. [153]. Usando a teoria *Screw* e a álgebra de Lie foi possível definir a matriz de rigidez dos braços do mecanismo, além de modelar restrições baseadas em variáveis dinâmicas da estrutura. O robô estudado foi uma plataforma tipo *Stewart*, validando o modelo de erro proposto com a cinemática inversa própria desse mecanismo. Dois índices associados com as forças resultantes no momento de simular o modelo foram definidos, obtendo valores pequenos que permitem corroborar o modelo. Finalmente, foram obtidos dois parâmetros de projeto otimizados da estrutura, usando o modelo de erro proposto e 200 posturas foram geradas uniformemente para a simulação de desempenho. A proposta é uma abordagem diferente da calibração de robôs, analisando o modelo de erro de uma estrutura genérica e otimizando os parâmetros de projeto. A nível de protótipo poderia funcionar, ainda mais em aplicações com antenas de rádio com mecanismos paralelos [154], mas para robôs industriais a ideia de modificar a estrutura seria uma proposta a ser avaliada.

A característica principal dos mecanismos paralelos sobre-restritos radica em ter menor número de graus de liberdade que os atuadores independentes, o que torna ao mecanismo como uma estrutura indeterminada dando lugar à proposta feita por Li et al. [15] para calibrar um robô dessas características. De acordo com o “método das forças”, esse tipo de estrutura paralela poder ser transformado em um mecanismo não-sobre-restrito se forem trocadas as restrições redundantes por forças de restrição. Portanto, a posição do efetuador em um mecanismo sobrerrestrito é a soma da posição do efetuador de um mecanismo não-sobrerrestrito e a deformação resultante pelas forças de restrição. Um robô paralelo translacional de 3-DOF (em inglês: *Tri-pyramid robot*) foi utilizado como exemplo de mecanismo sobrerrestrito para a calibração proposta. O modelo cinemático do mecanismo não-sobrerrestrito foi obtido, assim como o modelo mecânico e aplicando o “método da energia” foram obtidas as deformações associadas com o efetuador do robô. Usando um sistema tipo *ballbar* e um posicionador linear de 3 eixos foram medidas 19 posturas do robô, permitindo identificar com o método de mínimos quadrados 25 parâmetros associados com a estrutura paralela. Considerando também as forças dentro do mecanismo, o erro de posicionamento passou de 1,635 mm para 0,155 mm, e sem considerar as forças internas o erro foi de 0,986 mm. Em consequência, o efeito da deformação causada pelas forças que agem na estrutura é alto no posicionamento final para esse tipo de mecanismo, além de conseguir modelar um mecanismo complexo com abordagens diferentes das tradicionais.

A maioria dos estudos associados com a exatidão cinemática de robôs paralelos consideram os efeitos dos erros estáticos, como os erros de fabricação ou montagem, mas a influência dos erros dinâmicos nem sempre são considerados [39]. Por tal motivo, Shan et al. [39] propuseram a construção de um modelo de erro incluindo as folgas das juntas esféricas e os erros estáticos de um robô paralelo integrado por duas plataformas, cada uma com 3-DOF. O modelo consistiu em 29 parâmetros de cada plataforma, além de 15 parâmetros de erros comuns entre as plataformas. Para a identificação dos parâmetros foram usadas 15 posturas sem justificativa da quantidade, enquanto o método *Newton-Raphson* permitiu resolver o modelo de otimização proposto. O erro máximo dos ângulos Euler que definem a postura das plataformas passou de $0,5^\circ$ para $0,09^\circ$. Para uma trajetória definida os erros de posicionamento estão associados com os parâmetros da estrutura, o que torna interessante a validação dos métodos de calibração com trajetórias e a

compensação automática dos erros identificados.

Uma estrutura reduzida com baixa inércia e deformável são características básicas dos robôs paralelos contínuos (em inglês: *Parallel Continuum Robot* - PCR). Melhorar o desempenho desse tipo de robôs é o objetivo do método de calibração feito por Wu e Shi [155] para um protótipo de 3-DOF. O modelo cinemático do robô é um grupo de equações diferenciais ordinárias com condições de valor limitadas, gerando 72 parâmetros a ser avaliados pela cinemática direta. Devido à estrutura paralela, as matrizes jacobianas são mal-condicionadas, por isso foram utilizados os métodos L-M e o ponto interior para limitar os parâmetros em um conjunto razoável. Com 27 posições medidas por um sistema de rastreamento ativo (Optotrak Certus 3020) foram identificados os parâmetros, obtendo um erro máximo de posicionamento de 1,8% em relação ao comprimento nominal. O trabalho descrito permite validar alternativas de calibração quando os métodos tradicionais não podem ser utilizados em configurações de robôs específicos.

Cabe mencionar que através dos trabalhos apresentados até o momento em relação à modelagem de robôs paralelos as propagações de erros ainda são uma questão a ser investigada de forma abrangente e genérica. Além disso, a identificação dos parâmetros de erro dos robôs paralelos geralmente têm que lidar com o problema de mal-condicionamento causado pela identificação singular da matriz Jacobiana, que afeta a precisão da calibração [115]. Mesmo que o foco desse trabalho sejam os robôs seriais, é importante ressaltar os atuais desafios associados com a calibração de mecanismos paralelos.

Na Tabela 3.7 se apresenta um sumário dos trabalhos analisados associados à calibração de robôs paralelos. No entanto, na primeira coluna se menciona o tipo de robô paralelo que foi usado para a calibração, pois a modelagem depende do tipo de robô e as abordagens utilizadas pelos autores dos trabalhos analisados.

Tabela 3.7: Breve sumário dos trabalhos analisados na Seção 3.5

Autores	Tipo de robô	Instrumentos de Medição	Método de Identificação	Tipo de Compensação	Principal Contribuição
Sun et al. [40]	Mecanismo paralelo sobre-restrito	<i>Laser-Tracker</i>	HGA	<i>off-line</i>	Desenvolvimento de um protótipo de mecanismo paralelo sobre-restrito através de um projeto mecânico otimizado para melhorar o erro de posicionamento. Comparação da calibração com dois modelos baseados em fontes de erros geométricas para robô tipo Delta.
Bai et al. [151]	Robô tipo Delta	<i>Laser-Tracker</i>	-	<i>off-line</i>	Calibração de um robô paralelo de 6-DOF com a técnica IPS.
Hu et al. [36]	Robô paralelo 6-DOF	-	IPS	-	O erro volumétrico foi reduzido de 23,4805 mm para 0,6157 mm.
Qian et al. [74]	<i>Cable-driven parallel robot</i>	Quatro câmeras	Mínimos quadrados	-	Análise da precisão no posicionamento de um mecanismo paralelo para otimizar o projeto da estrutura.
Chen et al. [25]	Plataforma tipo <i>Stewart</i>	Simulação	-	-	Avaliar a precisão de um mecanismo paralelo para otimizar o projeto da estrutura.
Ding et al. [153]	Plataforma <i>Stewart</i>	-	-	-	Aplicação do “método das forças” para modelar a estrutura sobre-restrita.
Li et al. [15]	<i>Tri-pyramid robot</i>	Sistema tipo <i>ballbar</i>	Mínimos quadrados	<i>off-line</i>	

Shan et al. [39]	Robô paralelo de duas plataformas (3-DOF + 3-DOF)	-	<i>Newton-Raphson</i>	<i>off-line</i>	O erro máximo dos ângulos Euler da postura das plataformas passou de 0,5° para 0,09°.
Wu e Shi [155]	PCR de 3-DOF	Sistema de rastreamento ativo	L-M	<i>off-line</i>	Erro máximo de posicionamento de 1,8% em relação ao comprimento nominal do robô.

3.6 Comentários finais

Através dos vários trabalhos analisados na área de calibração de robôs industriais foi apresentada, neste capítulo, a tendência na implementação das técnicas e procedimentos tanto na modelagem quanto na identificação, destacando-se a preferência e os resultados satisfatórios com o uso da notação MDH e do algoritmo L-M nos trabalhos analisados. Foram descritos os métodos, técnicas e procedimentos adotados pelos autores nas quatro etapas da calibração de robôs, agrupando calibração de robôs seriais e de robôs paralelos dentro do capítulo. Considerando o escopo desta pesquisa, pôde-se observar que os modelos de calibração utilizando transformações homogêneas estão contidos na maioria de trabalhos associados a robôs seriais. No entanto, outros trabalhos baseados em outros tipos de modelagem foram apresentados. Pode-se constatar, também, que nos procedimentos de calibração ainda existe larga margem para contribuição científica e metodológica, com proposições de diferentes abordagens, especialmente na etapa de medição.

Capítulo 4

CONCEITO DE SUB-REGIÃO

4.1 Considerações teóricas

Na etapa de medição da calibração de robôs industriais ainda existem várias questões a serem desenvolvidas na literatura, no entanto, neste trabalho se propõe e valida a análise do erro de posicionamento através de medição em sub-regiões. Segundo Nguyen et al. [6] um robô pode se aproximar de um ponto de coordenadas Cartesianas através de várias posturas, mas cada postura vai produzir um erro de posicionamento diferente. Portanto, é necessário deduzir na região de medição do robô a característica do erro de posicionamento em função dos parâmetros cinemáticos do modelo de erro.

Devido à dependência das fontes de erro com a exatidão dos robôs, os erros de posicionamento não são distribuídos uniformemente no espaço de trabalho, por exemplo, dependendo da postura do manipulador as deflexões das juntas têm algum tipo de variação, contribuindo com a variação do erro de posicionamento [51]. Portanto, um dos desafios para os métodos de calibração existentes é diminuir o erro de posicionamento e obter melhor exatidão em várias regiões do espaço de trabalho, especialmente quando os robôs se caracterizam por terem estruturas pesadas, por exemplo, robôs de 5500 kg [10].

Por outro lado, devido às características da estrutura mecânica de um robô serial, os erros geométricos e não-geométricos presentes em cada junta podem se acumular, ou seja, os erros associados a cada junta de um robô de configuração serial têm a capacidade de influenciar o erro de posicionamento final de forma diferente [103]. Esta discussão tem relação com as áreas de medição, devido ao fato que existem regiões com erros “dominantes”, por consequência das deflexões da estrutura do robô e das folgas presentes nas juntas [156].

No entanto, nos casos práticos, várias condições de medição podem influenciar os resultados da calibração, como limitação da resolução e precisão dos dispositivos de medição, erro acumulado na solução sequencial das matrizes de rotação e translação, erro de movimento do robô etc. [136]. Considerando que no contexto da precisão, os critérios de repetibilidade e precisão são de alta relevância, foi observado que a repetibilidade não é a mesma dentro do espaço de trabalho do robô [56]. Adicionalmente, a distribuição da incerteza de medição do efetuador pode ser afetada de forma considerável em função de sua posição no espaço de trabalho [37].

Em consequência, a escolha de configurações adequadas para a medição da postura do robô é uma alternativa para garantir um mapeamento adequado dos erros de posicionamento, sendo um fator importante a ser considerado para melhorar o desempenho dos métodos de calibração. Dessa forma, é necessário encontrar um conjunto de posturas adequadas, reduzindo os efeitos negativos de erros não modelados e aumentando a precisão dos parâmetros cinemáticos [7].

4.2 Similaridade de erro entre posturas adjacentes

Como resultado do exposto é adequado identificar duas características importantes que até agora não foram exploradas em profundidade na literatura:

- i) a distribuição do erro de posicionamento em função das posições medidas não é uniforme, ou seja, para cada postura existe um erro de posicionamento diferente;
- ii) a dependência de erros em estruturas de robôs seriais afeta o posicionamento final do efetuador.

Portanto, nesta pesquisa será apresentada uma metodologia de calibração de robôs utilizando pequenos volumes de medição, para que o erro de posicionamento seja atenuado reduzindo a complexidade do sistema de medição comparado com os métodos tradicionais e, ainda assim, garantindo os requisitos de precisão em processos associados às indústrias automotiva e aeronáutica.

Um dos trabalhos considerados relevantes na concepção do conceito de sub-regiões foi o desenvolvido por Wang et al. [103] no qual foram avaliadas e identificadas as regiões adequadas na execução de uma determinada tarefa, através da caracterização da variação da precisão de uma trajetória específica em diferentes posturas. Portanto, pode ser observado um comportamento característico do erro de posicionamento, tornando possível a análise de erro do efetuador em áreas específicas. A Figura 4.1 apresenta o mapeamento da avaliação da precisão da trajetória de um robô serial.

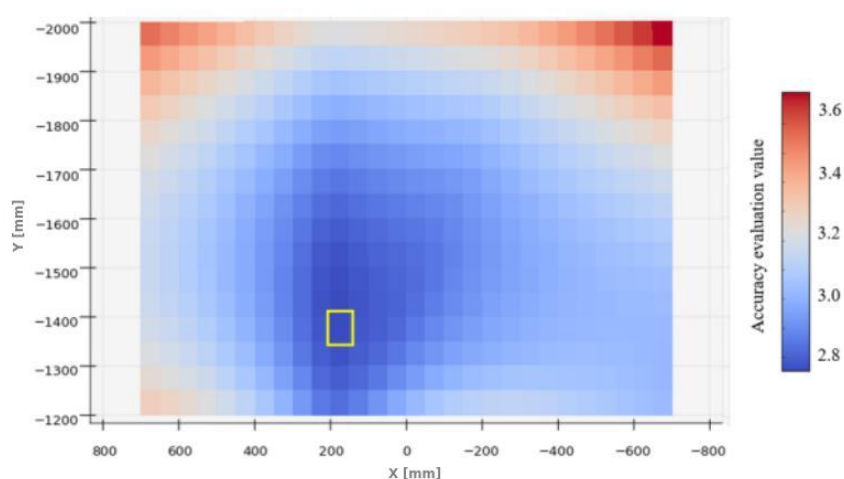


Figura 4.1: Mapeamento da precisão segundo a trajetória e postura

Fonte: Wang et al. [103]

Para analisar a dependência de erros é importante considerar que a relação do vetor de posição (p_x, p_y, p_z) do efetuador está em função dos erros paramétricos, portanto, existe um grau de similaridade entre os erros

da postura quando as configurações das juntas estão próximas. [37].

A similaridade está relacionada ao desvio de cada ângulo de junta entre as configurações.

Para cada postura de um robô existe um erro de posicionamento associado, que pode ser tratado como um vetor em relação ao sistema de coordenadas da base. O conceito de similaridade de erro foi proposto por Zhou et al. [157], para os vetores de erro associados a duas posturas próximas do manipulador, definido como:

$$\omega = \begin{cases} \infty & , \text{ para } e_1 = e_2 \\ 1/|e_1 - e_2| & , \text{ para } e_1 \neq e_2 \end{cases} \quad (4.1)$$

onde ω é definido como o erro de similaridade, e_1 e e_2 são os vetores de posição de duas posturas próximas. A definição de erro de similaridade tem sido usada no espaço de calibração de robôs para definir modelos de compensação de erros, atribuindo áreas específicas de medição e compensando o erro de posicionamento sem usar o modelo paramétrico do robô. Atualmente, têm-se identificado na literatura três tipos de modelos de compensação baseados no conceito de similaridade de erros. O primeiro foi proposto por Tian et al. [158] para analisar a postura do robô em relação aos vértices de uma região cúbica definida, como se apresenta na Figura 4.2:

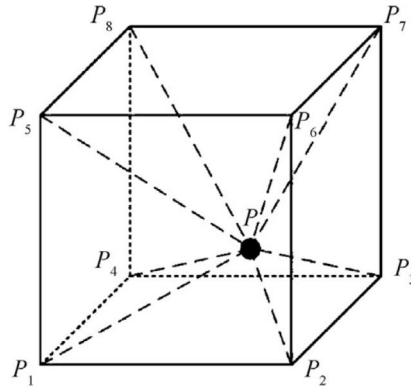


Figura 4.2: Modelo de erro de posicionamento por interpolação

Fonte: Tian et al. [158]

O modelo de compensação de erro proposto por Tian et al. [158] usa o método de interpolação ponderado inverso, onde o erro de similaridade entre um ponto arbitrário P e os vértices P_i é negativamente correlacionado à distância. A expressão do peso correlacionado se define como:

$$q_i = \frac{(1/s_i)}{\sum_{j=1}^8 (1/s_j)} \quad , \quad (4.2)$$

onde q_i se define como o peso do ponto P associado com o vértice P_i , e s_i é a distância entre a posição P e o vértice P_i . Portanto, é possível prever o vetor de erro da coordenada P como:

$$e = \sum_{j=1}^8 (q_j \cdot e_j) \quad , \quad (4.3)$$

sendo e a predição do vetor de erro da posição na coordenada P , e e_i o vetor da posição de erro do vértice P_i . Em consequência, o modelo de compensação baseado no erro de similaridade proposto por Tian et al. se define como [158]:

$$P' = P + e \quad , \quad (4.4)$$

em que P' é a posição teórica do ponto P depois da correção.

O segundo modelo de compensação baseado no conceito de similaridade de erro foi proposto por Zeng et al. [159], definindo uma relação linear entre os erros de amostras medidas e as posições que devem ser compensadas:

$$\hat{e}_x(P_0) = \sum_{i=1}^n w_x^{(i)} e_x(P_i) ; \quad (4.5a)$$

$$\hat{e}_y(P_0) = \sum_{i=1}^n w_y^{(i)} e_y(P_i) ; \quad (4.5b)$$

$$\hat{e}_z(P_0) = \sum_{i=1}^n w_z^{(i)} e_z(P_i) \quad , \quad (4.5c)$$

onde $\hat{e}_x(P_0)$, $\hat{e}_y(P_0)$ e $\hat{e}_z(P_0)$ são definidos como os erros de posicionamento da postura P_0 ao longo dos eixos X, Y e Z, respetivamente, enquanto $w_x^{(i)}$, $w_y^{(i)}$ e $w_z^{(i)}$ são os pesos de interpolação, com $e_x(P_i)$, $e_y(P_i)$ e $e_z(P_i)$ sendo as posições de erro das amostras $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ através dos eixos X, Y e Z, respetivamente. Portanto, o objetivo do modelo de erro desenvolvido por Zeng et al. [159] consiste em estimar os pesos de interpolação entre as amostras das posturas com erro de posicionamento e as posturas corrigidas.

O terceiro modelo de compensação proposto na literatura [160] associado ao conceito de similaridade de erros considera a variação dos parâmetros de junta (θ_i), permitindo definir uma relação linear entre as posturas com erro de posicionamento e as posturas a serem corrigidas como:

$$\hat{e}_l(\theta) = w^T e \quad , \quad (4.6)$$

sendo $\hat{e}_l(\theta)$ o erro de posicionamento estimado da postura desejada no eixo $l(x, y, z)$, enquanto w são os pesos associados aos erros de posicionamento das posturas com erro. De forma equivalente ao segundo modelo de compensação [159], o objetivo é estimar os pesos (w^T), considerando a variação dos parâmetros de junta.

Portanto, é possível concluir que os três modelos apresentados anteriormente conseguem estimar o erro

de posicionamento de uma postura a partir de várias medições obtidas com um instrumento de medição, através de problemas de otimização do tipo $Ax = B$, sendo x os pesos que relacionam as posturas medidas para construir o modelo de compensação e as posturas a serem corrigidas, considerando o conceito de similaridade de erro entre diferentes posturas adjacentes.

Em consequência, é possível afirmar que os erros de posicionamento de um robô serial têm similaridade espacial, deduzindo-se que essa característica está associada à dependência entre as posturas do efetuador, portanto, os erros posicionais podem ser estimados com métodos de interpolação espacial. A função considerada para quantificar a similaridade dos erros de posição do robô é a função semivariograma, usada por Zeng et al. [159, 160], sendo definida como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [e(P_i) - e(P_i + h)]^2 \quad , \quad (4.7)$$

onde $N(h)$ é o número de pares de medições cuja distância é h , e $e(P_i)$ representa o erro de posição da postura P_i . Assim como foi definida a função de semivariograma para diferentes posturas, é possível analisar o comportamento dos parâmetros cinemáticos do modelo de erro ($\delta\theta$, δd , δa , $\delta\alpha$, $\delta\beta$) em pequenos volumes de medição, os quais não foram considerados nas três propostas baseadas no conceito de similaridade de erro.

4.3 Sub-Regiões no Espaço de Trabalho do Robô

Considerando que os erros de posicionamento não apresentam uma distribuição uniforme dentro do espaço de trabalho do robô, mas que existe correlação espacial entre os erros de posicionamento de posturas adjacentes, é possível definir o conceito de “medição em sub-regiões”. Portanto, as sub-regiões foram definidas por Toquica e Motta [161] como regiões volumétricas dentro do espaço de trabalho do robô que permitem a obtenção de medições do efetuador em uma quantidade adequada para calcular o erro de posicionamento do manipulador em regiões maiores. No presente trabalho se denomina como “calibração tradicional” os métodos que efetuam a calibração em um determinado conjunto de pontos, a partir de um mesmo local de medição, facilitando a comparação da calibração feita usando o conceito de sub-regiões.

Nas sub-regiões, os parâmetros de erro podem ser estimados com um número mínimo de posturas evitando uma matriz Jacobiana mal-condicionada, ou seja, garantir pelo menos 25 pontos medidos por cada sub-região [75, 162, 163], permitindo obter um vetor com os parâmetros de erro em cada sub-região. Na Figura 4.3 se apresenta como a medição em sub-regiões pode ser uma alternativa em relação à calibração tradicional, onde a medição é feita em grandes volumes dentro do espaço de trabalho do robô.

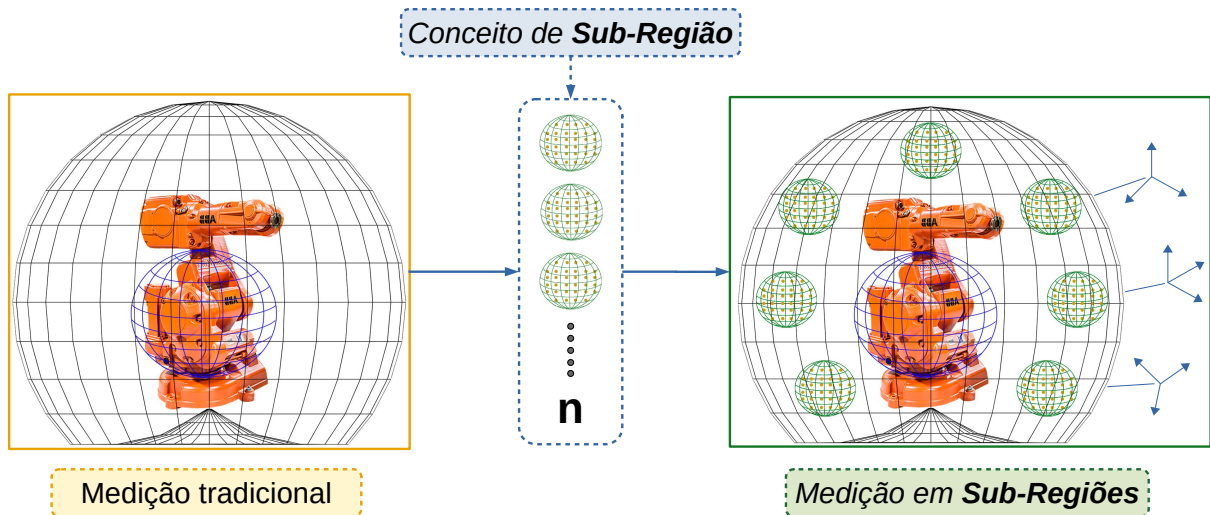


Figura 4.3: Medição e análise por sub-regiões para a calibração *on-line*

Segundo Zeng et al. [160] o desvio dos erros de posição depende da distância existente entre duas posturas, isto é, se a distância é maior a similaridade dos erros de posicionamento diminui. Portanto, é necessário demonstrar que a variação do erro no espaço de trabalho tem um comportamento característico que pode ser modelado e caracterizado. Apresenta-se na Figura 4.4 como as sub-regiões podem ser estabelecidas ao longo dos vetores de direção (\vec{f} , \vec{g} , \vec{h}), associando-as com os valores dos parâmetros de erro identificados em cada uma das sub-regiões.

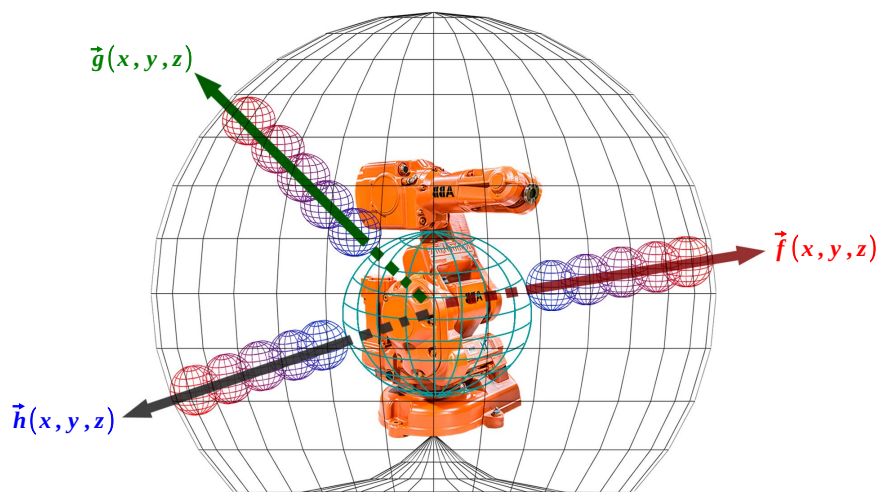


Figura 4.4: Vetor de erro em função do conceito de sub-regiões

Cada vetor direcional (\vec{f} , \vec{g} , \vec{h}) e as sub-regiões podem ser definidos e posicionados considerando um sistema de coordenadas esférico, como se descreve na Equação 4.8:

$$\begin{aligned} x_i &= r_{vg} \cdot \cos(\phi_{vg}) \cdot \sin(\theta_{vg}); \\ y_i &= r_{vg} \cdot \sin(\phi_{vg}) \cdot \sin(\theta_{vg}); \end{aligned} \tag{4.8}$$

$$z_i = r_{vg} \cdot \cos(\theta_{vg}) \quad ,$$

onde x_i, y_i, z_i são as coordenadas cartesianas do vetor direcional em relação ao sistema de coordenadas da base do manipulador, em função das variáveis no sistema de coordenadas esférico ($r_{vg}, \phi_{vg}, \theta_{vg}$), como se apresenta na Figura 4.5.

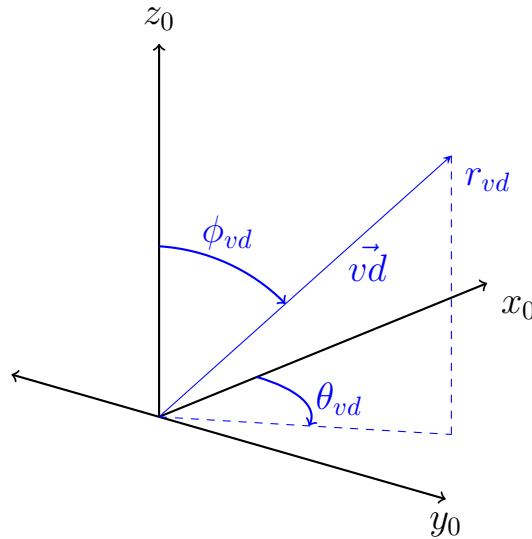


Figura 4.5: Definição do Sistema de Coordenadas do Vetor Direcional (\vec{v}_d)

Considera-se que o comprimento máximo do Vetor Direcional (\vec{v}_d), a distância radial (r_{vd}) alcança a borda do espaço de trabalho do manipulador, e θ_{vd} é a rotação ao redor do eixo x_0 que pode ser num intervalo entre -45° e 45° , por exemplo. A Figura 4.5 apresenta os detalhes das variáveis propostas para definir o conceito de vetor direcional.

O número de vetores direcionais pode ser estabelecido conforme o espaço de trabalho do manipulador, assim como o tamanho das sub-regiões. Quatro vetores direcionais se apresentam na Figura 4.6, com cinco possíveis sub-regiões em cada \vec{v}_g :

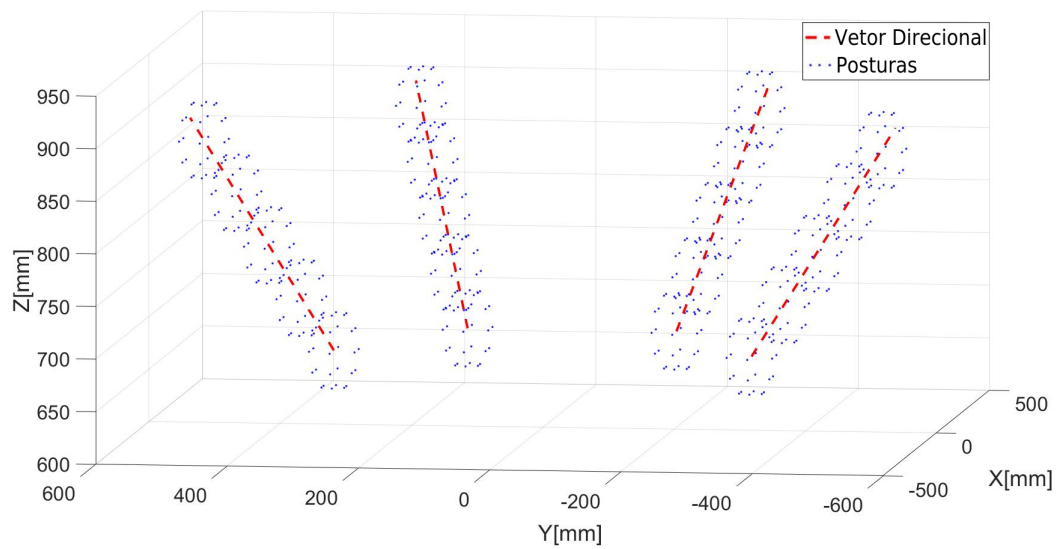


Figura 4.6: Nuvem de pontos de medição ao redor dos $v\vec{g}_i$

Para garantir a varredura de dois quadrantes do hemisfério superior do espaço de trabalho de um robô, θ_{vg} deve variar atendendo à faixa de deslocamento angular/linear fornecida pelos fabricantes dos manipuladores. Nesse trabalho, o ângulo θ_{vg} é atribuído como o ângulo de rotação do vetor direcional coincidente com o eixo X do sistema de coordenadas da base do robô, enquanto o ângulo ϕ_{vg} é estabelecido como a inclinação do vetor direcional em relação ao eixo Z da base do robô. Portanto, o vetor direcional depende de dois ângulos (θ_{vg} e ϕ_{vg}) e do raio (r_{vg}), possibilitando fazer a varredura dos quatro quadrantes do espaço de trabalho de um robô industrial.

Capítulo 5

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta e descreve as atividades necessárias para aplicar a metodologia na calibração de robôs industriais baseada no conceito de medição por sub-regiões dentro do espaço de trabalho do robô, com o intuito de diminuir o erro de posicionamento a níveis comparáveis aos métodos existentes, assim como reduzir o volume necessário para a etapa de medição comparativamente a uma calibração tradicional. Dessa forma, será possível cumprir com os requisitos de processos produtivos que demandem alta precisão como a indústria aeroespacial ou automotiva [1]. A metodologia proposta visa contribuir com os procedimentos de calibração de robôs na indústria, viabilizando uma alternativa para o uso de sistemas de medição capazes de determinar a posição e orientação do efetuador do robô em grandes volumes do espaço de trabalho.

5.1 Metodologia para a calibração de robôs baseada em Sub-Regiões

A metodologia proposta para a calibração de robôs está fundamentada no conceito de sub-regiões, possibilitando a medição de posições do efetuador a partir de qualquer local, sendo uma alternativa à calibração tradicional na qual a medição é feita a partir de um mesmo local e numa região de medição ampla, mas ainda assim mantendo os requisitos de precisão. Os procedimentos considerados na metodologia foram inicialmente simulados para validar a análise numérica e posteriormente implementados experimentalmente. Na Figura 5.1 se apresenta a metodologia por meio de um diagrama de blocos, através dos quatro procedimentos básicos da calibração de robôs industriais, assim como a etapa que contém a maior contribuição derivada do conceito de sub-regiões.

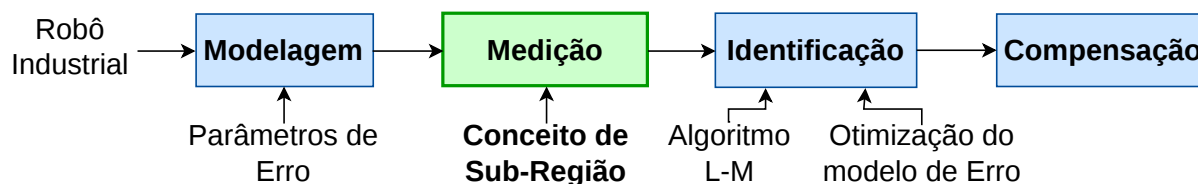


Figura 5.1: Metodologia baseada no conceito de sub-regiões para a calibração de robôs

Para facilitar a descrição das quatro etapas básicas para a calibração de robôs industriais da proposta

apresentada, foram descritos os procedimentos considerando a modelagem IDEF0 (em inglês: *Icam DE-Finition for Function Modeling*). Dessa forma, é possível detalhar as atividades específicas que serão abordadas neste trabalho, assim como a contribuição aos trabalhos desenvolvidos até o momento.

O IDEF0 fornece um meio para modelar as funções (atividades, ações, processos, operações) necessárias por um sistema ou empresa, assim como a relação funcional e os dados (informações ou objetos) que suportam a integração dessas funções. O uso do IDEF0 é amplamente aplicado na comunidade de pesquisa e processos industriais na padronização da modelagem funcional, devido à flexibilidade e simplicidade para modelar atividades e o fluxo de informação entre elas [164].

As atividades associadas à calibração de robôs têm o mesmo fundamento teórico e prático das quatro etapas tradicionais descritas no Capítulo 2, mas a metodologia IDEF0 além de representar as entradas, saídas, mecanismos, controles e funcionalidades dos procedimentos de calibração, permite descrever as atividades que serão adaptadas para atingir os objetivos propostos neste trabalho. As atividades principais da metodologia para a calibração de robôs industriais são apresentadas na 5.2.

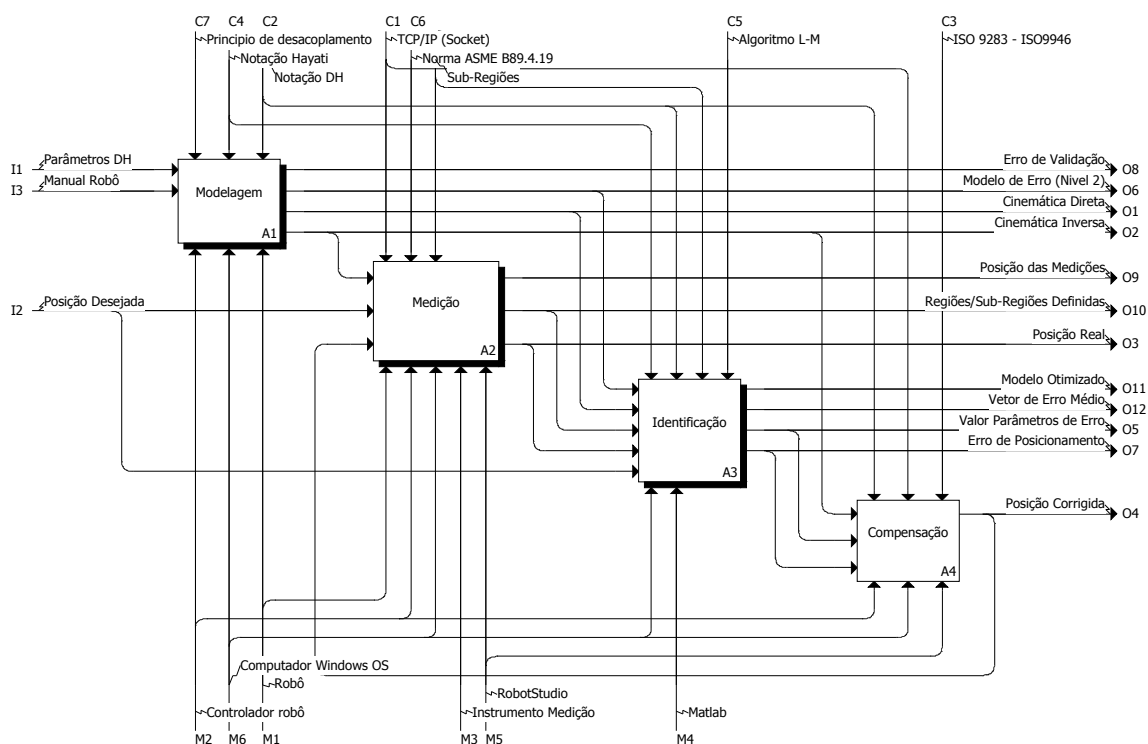


Figura 5.2: Modelo IDEF0 da Metodologia de Calibração de Robôs Industriais

A descrição das etapas para a calibração de robôs industriais segundo a modelagem IDEF inicia-se pela elaboração do modelo do manipulador (A1), no nível 2 de calibração (parâmetros cinemáticos), usando as notações DH e Hayati. Nessa parte são construídos o modelo cinemático e o modelo de erro do manipulador usando técnicas analíticas que permitam solucionar as equações da cinemática inversa, por exemplo.

Na sequência, a atividade de medição permite a definição das posições que devem ser medidas e efetuar a medição com o instrumento disponível para essa etapa, ou como alternativa, podem ser simulados os erros de posicionamento caso não exista disponibilidade de um sistema de medição.

Como uma terceira atividade indica-se a identificação dos parâmetros de erro, aproveitando o modelo definido na atividade anterior, usando técnicas de otimização para calcular os valores de erro em relação às medições efetuadas e os valores nominais resultantes do modelo do robô. Essa atividade permite avaliar o modelo ajustado com os parâmetros de erro identificados, e validar a eficiência do procedimento de calibração. Finalmente, uma quarta atividade é definida para compensar o posicionamento do robô depois da calibração, no entanto essa etapa ainda está em processo de desenvolvimento, devido ao fato de estar limitada pelas arquiteturas de controle fechadas dos fornecedores de robôs, dificultando a modificação do modelo nominal no controlador.

Com o intuito de detalhar os procedimentos da calibração de robôs industriais usando a metodologia proposta, foram definidas atividades para cada uma das etapas fundamentais de calibração que serão apresentadas a seguir, com adaptação ao conceito de sub-regiões.

5.1.1 Modelagem

Na Figura 5.3 se descreve através de quatro atividades a etapa de modelagem usada no presente trabalho.

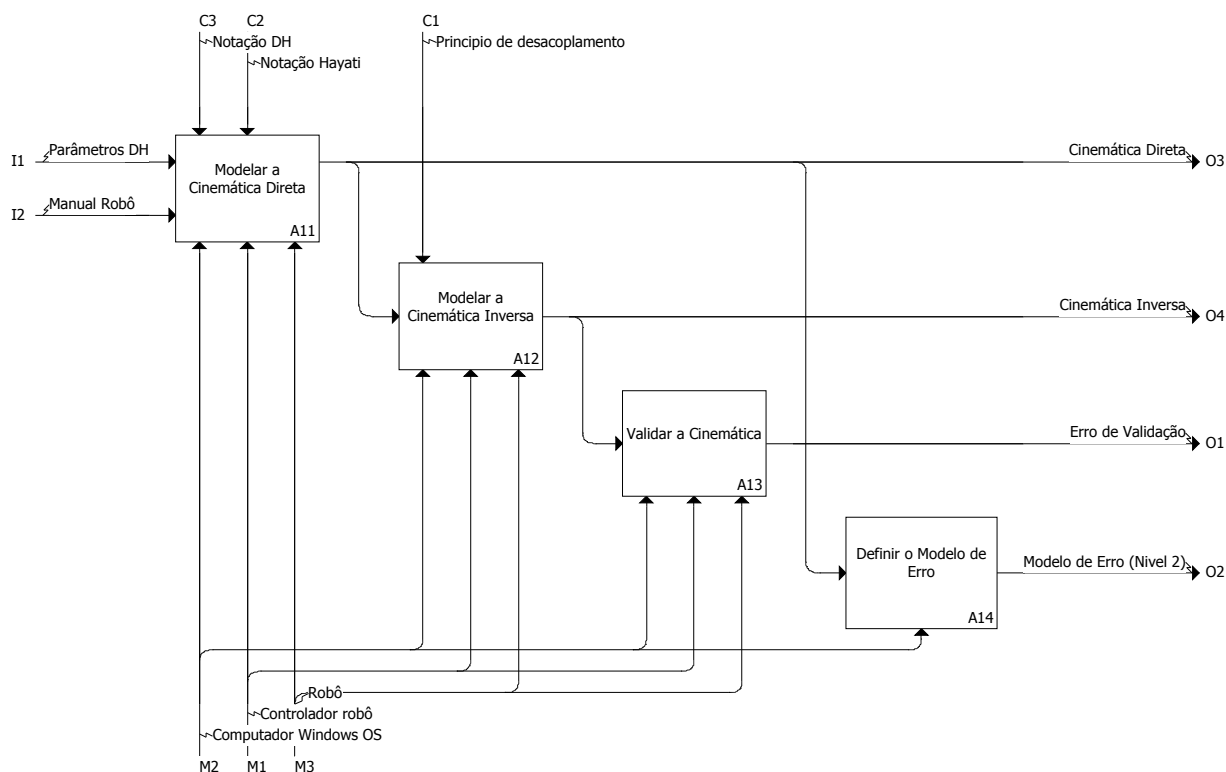


Figura 5.3: Modelo IDEF0 da Etapa de Modelagem

A atividade associada com a modelagem (A1) usada na metodologia proposta permite atribuir sistemas de coordenadas ortogonais para cada eixo do robô, assim como a construção das equações para a cinemática inversa que permitem validar a compatibilidade do modelo analítico com pelo menos uma solução da cinemática inversa do modelo nominal presente no controlador do robô. Através da definição da cinemática direta é possível elaborar o modelo de erro que vai ser utilizado nas próximas etapas da calibração,

definindo os parâmetros cinemáticos de erro associados ao nível 2 de calibração de robôs industriais.

5.1.2 Medição

Foram definidas para a metodologia proposta cinco atividades dentro da etapa de medição (A2). Na Figura 5.4 se detalham através da modelagem IDEF0 as atividades propostas na adaptação dos procedimentos de calibração ao conceito de sub-regiões.

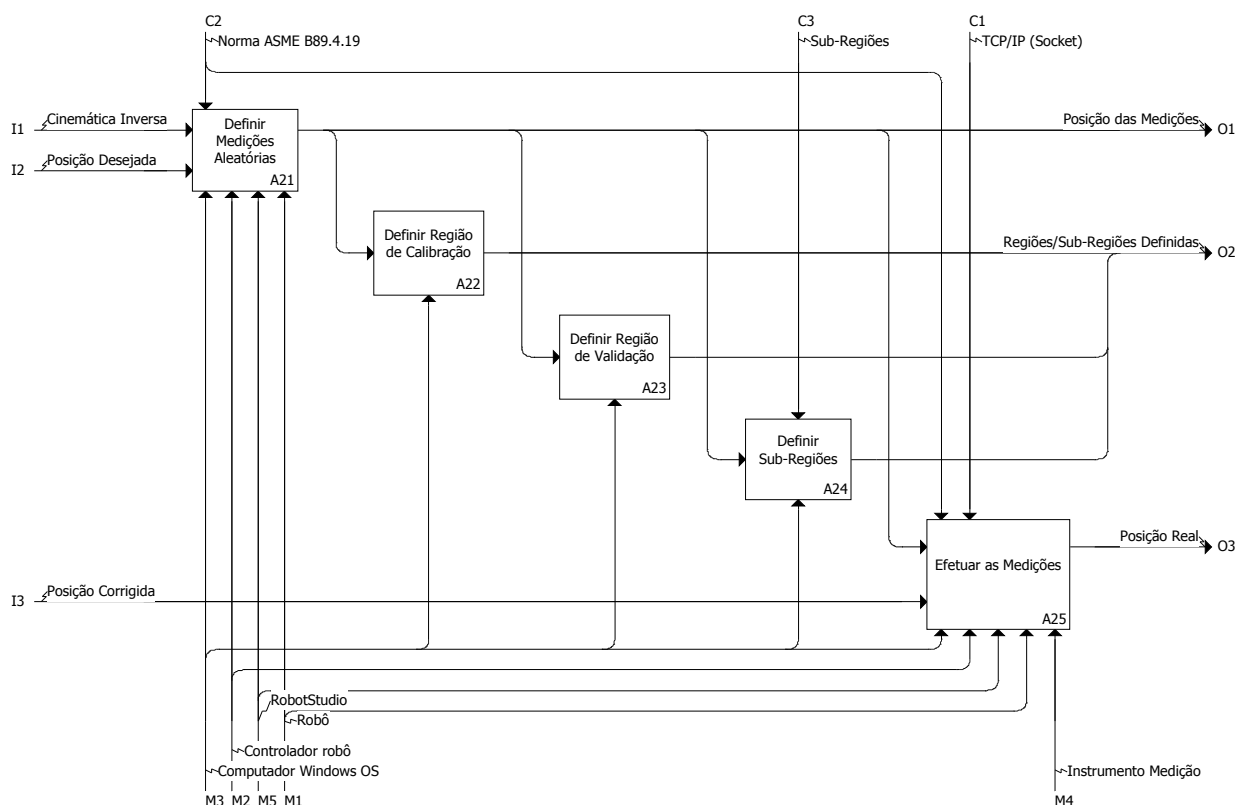


Figura 5.4: Modelo IDEF0 da Etapa de Medição por Sub-Regiões

A atividade associada com a medição permite obter a posição real do efetuador no espaço de trabalho, onde a contribuição às propostas desenvolvidas até o momento se fundamenta na aquisição e análise das posições do efetuador dentro das sub-regiões. Além da definição das sub-regiões no espaço de trabalho, é possível definir medições aleatórias com o instrumento de medição, assim como definir regiões de calibração e validação com essas medições, permitindo comparar os resultados do erro de posicionamento no método tradicional e a calibração em sub-regiões. A contribuição na atividade de Medição é explicada em maior detalhe no Capítulo 4.

5.1.3 Identificação e Compensação

No caso da etapa de identificação (A3) foram propostas quatro atividades segundo a modelagem IDEF0, as quais se detalham na Figura 5.5, como adaptação dos procedimentos dessa etapa da calibração ao conceito de sub-regiões proposto no presente trabalho.

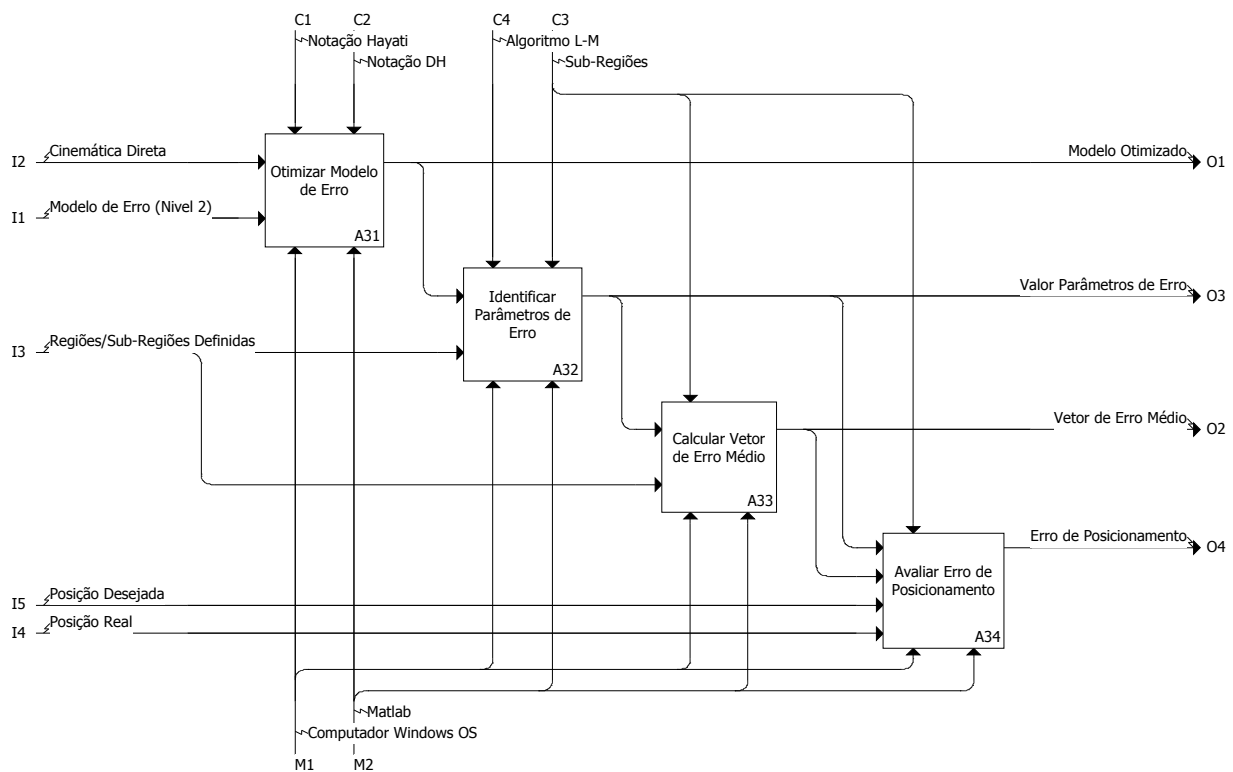


Figura 5.5: Modelo IDEF0 da Etapa de Identificação dos Parâmetros de Erro

Antes de efetuar a identificação dos valores associados aos parâmetros do modelo de erro, é necessário otimizar o modelo para diminuir os parâmetros utilizados, mantendo os requisitos da modelagem para a calibração de robôs industriais: mínimo, completo e contínuo. Em seguida, são identificados os valores dos parâmetros de erro do modelo otimizado em cada uma das sub-regiões definidas na etapa de medição, usando o algoritmo L-M. Com os modelos de erro otimizados é possível calcular um único modelo que possibilite a calibração em regiões não medidas no espaço de trabalho, o que vai ser explicado em maior detalhe no seguinte capítulo.

Finalmente, pode-se efetuar a avaliação do erro de posicionamento e validar os procedimentos descritos ao longo do presente capítulo. Uma das vantagens do conceito de sub-regiões é a possibilidade de adaptar a etapa de compensação (A4) a um processo de correção simultânea, ou seja, a compensação automática do erro de posicionamento junto com processos industriais em execução. Os trabalhos correlatos apresentados até o momento usam a etapa de compensação para quantificar o erro de forma *off-line* depois de implementar o método de calibração. Uma futura contribuição relacionada ao presente trabalho poderia focar na correção automática dos erros de posicionamento em cada sub-região analisada e regiões não medidas.

5.1.4 Modelo de erros ajustado

O modelo de erros do robô ajustado para um espaço de trabalho de grandes dimensões pode ser obtido a partir dos modelos de erro calculados em cada uma das sub-regiões definidas. O processo proposto nesta pesquisa tem fundamento teórico nas definições de funções de agregação, que serão aplicadas sobre os parâmetros de erro associados a cada dimensão geométrica parametrizada nos modelos obtidos de cada

sub-região.

Funções de agregação são utilizadas em processos em que é necessário combinar vários valores em um único valor, e podem ser compostas por funções de diversas classes que incluem normas e conormas, cópulas, médias, e outras baseadas em integrais não aditivas [165]. Estudos sobre problemas de agregação já mostraram que geralmente a escolha da função de agregação a ser utilizada está longe de ser arbitrária e deve ser baseada em propriedades ditadas pela estrutura em que a agregação é realizada. Entre as funções de agregação mais utilizadas e com uso em grande quantidade de áreas de aplicação são os diversos tipos de média, como a média aritmética, quadrática, harmônica, geométrica, exponencial, raiz quadrática, etc., junto com suas propriedades [166].

Propõe-se nesta pesquisa o uso da função de agregação média, sem prejuízo da aplicação outros tipos de funções, sendo ela uma função homogênea, invariante à mudança, simétrica e estritamente monótona, minimizando a soma das distâncias quadráticas entre a saída e as entradas [167], definida por Chisini [168] como:

Seja $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ uma função de n variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_n . Uma média de x_1, x_2, \dots, x_n com respeito à função F é um número M tal que, se cada x_1, x_2, \dots, x_n for substituído por M , o valor da função não se altera, ou seja, $F(M, M, \dots, M) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Quando F é considerado como uma soma, tem-se a média aritmética:

$$F = f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

Desta forma, na metodologia proposta, utiliza-se a média aritmética como função de agregação para obter um modelo ajustado a partir da agregação dos valores de cada parâmetro dos vetores de erro dos modelos otimizados nas sub-regiões definidas no espaço de trabalho. Este processo induz à geração de um modelo que tem resposta ajustada quanto ao erro de posicionamento quando o robô é utilizado em um extenso volume de trabalho. Este processo possibilita medições em volumes de trabalho menores, cujas medições não gerariam um modelo adequado para ser utilizado em todo o espaço de trabalho.

5.2 Implementação computacional da metodologia proposta

O Diagrama de Atividades é uma importante ferramenta de modelagem aplicada em UML (em inglês: *Unified Modeling Language*) usada para modelar a sequência de ações como parte de um fluxo de processo. É utilizado para capturar as ações do fluxo do processos e seus resultados [169]. Tendo como foco o trabalho realizado na implementação de um método de calibração, foi possível modelar o fluxo de informações da metodologia proposta através de vários algoritmos implementados em ambientes como Matlab e RAPID. Em consequência, a implementação computacional e validação do método proposto, baseado no conceito de sub-regiões, se apresenta na Figura 5.6 o diagrama de atividades utilizado no presente trabalho.

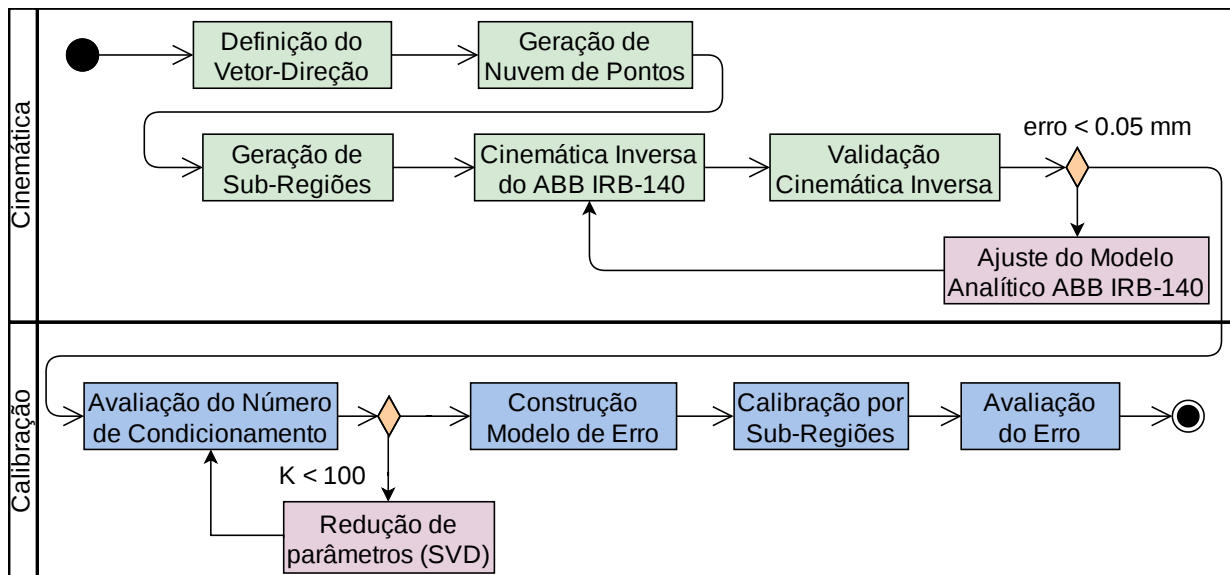


Figura 5.6: Implementação computacional do método proposto para a calibração de robôs

A implementação computacional proposta foi dividida em duas etapas:

- i) cinemática;
- ii) calibração.

A primeira etapa está relacionada à geração das sub-regiões no espaço de trabalho, bem como a geração de pontos de medição aleatórios para as posições do efetuador do robô distribuídos dentro do espaço de trabalho. Na etapa de calibração, o modelo de erro é gerado e otimizado com vários parâmetros cinemáticos especialmente selecionados a partir da avaliação do número de condicionamento da matriz Jacobiana do sistema, garantindo que não existam redundâncias dos parâmetros. Finalmente, a calibração do robô e a compensação de coordenadas (avaliação da precisão) podem ser realizadas em regiões no espaço de trabalho do robô que não foram utilizadas para a etapa de medição e identificação dos parâmetros de erro.

Capítulo 6

ESTUDO DE CASO 1: ABB IRB-140

No presente capítulo se descreve o estudo de caso com um robô industrial ABB IRB-140 num ambiente de simulação, usando o conceito de sub-regiões. Portanto, são detalhadas a cinemática direta e inversa do robô, assim como a definição do modelo de erro e a identificação dos valores associados aos parâmetros de erro. Finalmente, analisa-se a avaliação do erro de posicionamento antes e depois do procedimento de calibração em dois cenários:

- i) mediante a calibração tradicional;
- ii) com o conceito de sub-regiões.

O sistema robótico utilizado para análise cinemática é o robô ABB IRB-140 fabricado pela ABB, um manipulador industrial de seis eixos multitarefa que oferece alta aceleração, um espaço de trabalho amplo, e de fácil integração com grande variedade de aplicações.

6.1 Modelo cinemático ABB IRB-140

Para controlar a postura do manipulador ABB IRB-140 nos processos industriais é necessário elaborar o modelo cinemático da estrutura mecânica. O modelo cinemático do robô se obtém através de equações associadas à cinemática direta e inversa [170]. Dessa forma, se estabelece um modelo matemático adequado para identificar a posição das juntas do manipulador ABB IRB-140 em relação a um sistema de coordenadas fixo. A seguir serão detalhadas as equações relacionadas com a cinemática direta e inversa do manipulador, assim como a descrição do método para validar o modelo nominal e analítico.

6.1.1 Cinemática Direta

Para a modelagem cinemática do robô foi usada a notação DH, atribuindo sistemas de coordenadas para cada junta [171, 172], tal como se apresenta na Figura 6.1. Portanto, é possível estabelecer os valores para os parâmetros DH do robô ABB IRB-140.

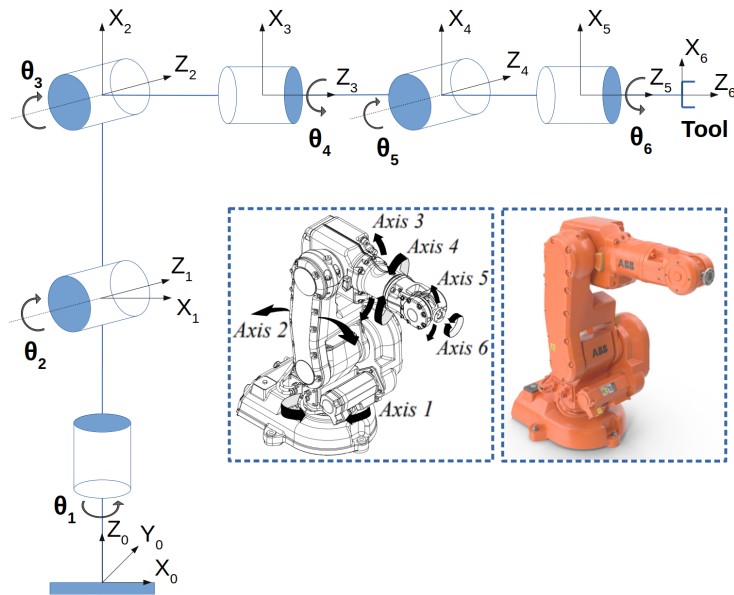


Figura 6.1: Definição sistemas de coordenadas segundo a notação DH: robô ABB IRB-140

Cada matriz associada com as juntas do manipulador (T_i) é representada como o resultado de quatro transformações fundamentais, tal como se descreve na Equação 6.1 [61].

$$T_i = Rot_{(z_i, \theta_i)} Trans_{(z_i, d_i)} Trans_{(x_{i+1}, a_i)} Rot_{(x_{i+1}, \alpha_i)} \quad (6.1)$$

No caso do manipulador ABB IRB-140 existem eixos paralelos e perpendiculares na estrutura mecânica, portanto a notação DH usada previamente não deve ser utilizada no modelo de erro para a calibração dos parâmetros cinemáticos, devido às singularidades apresentadas na matriz Jacobiana na modelagem de juntas paralelas [64]. Dessa forma, a notação Hayati (MDH) é usada para descrever a transformação das duas juntas paralelas através de quatro parâmetros, como se apresenta na Equação 6.2 [86]:

$$T_i = Rot_{(z_i, \theta_i)} Trans_{(x_{i+1}, a_i)} Rot_{(x_{i+1}, \alpha_i)} Rot_{(y_i, \beta_i)} \quad (6.2)$$

Com a definição dos sistemas de coordenadas associados aos seis graus de liberdade do robô, segundo a notação DH, e utilizando a notação Hayati para juntas paralelas, é possível determinar os valores dos parâmetros geométricos para o manipulador ABB IRB-140. É necessário esclarecer que os valores dos parâmetros associados às distâncias entre os sistemas de coordenadas das juntas são comumente fornecidos pelo fabricante do manipulador [173].

Os valores dos parâmetros geométricos do robô ABB IRB-140 são apresentados na Tabela 6.1. As variáveis de posição das seis juntas estão identificadas como θ_i e representam os valores angulares e as faixas de trabalho dos valores angulares de cada uma das juntas. Cabe mencionar que o controlador IRC5 mantém essa faixa de trabalho para proteger a estrutura e mecanismos do robô em aplicações reais.

Tabela 6.1: Parâmetros geométricos do robô ABB IRB-140

Junta	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [mm]$	$d_i [mm]$	$\theta_i [^\circ]$	$\beta_i [^\circ]$	Limites $[^\circ]$
1	-90	70	352	θ_1	-	± 180
2	0	360	-	$\theta_2 - 90$	0	-90 to +110
3	-90	0	0	θ_3	-	-230 to +50
4	90	0	380	θ_4	-	± 200
5	-90	0	0	θ_5	-	± 120
6	0	0	65	θ_6	-	± 400

Após a dedução dos valores dos parâmetros geométricos, foram definidas as equações presentes nas matrizes de transformação homogênea que determinam a posição e orientação do efetuador em relação ao sistema de coordenadas da base do manipulador [174]. A matriz que relaciona o sistema de coordenadas da base com o efetuador do manipulador é resultado das multiplicações entre as matrizes que relacionam o elo i e o elo $i - 1$. A Equação 6.3 apresenta a matriz de transformação geral do ABB IRB-140:

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (6.3)$$

Para simplificar as notações matemáticas usadas nas matrizes de transformação homogênea de cada uma das juntas do manipulador foi usada a designação apresentada:

$$\begin{aligned} \text{Sen}(\theta_i) &= S_i, \\ \text{Cos}(\theta_i) &= C_i \end{aligned}$$

São apresentadas na Equação 6.5 as matrizes de transformação homogênea associadas aos valores DH para cada uma das seis juntas do manipulador ABB IRB140.

$$\begin{aligned} T_1^0 &= \begin{bmatrix} -C_1 & 0 & S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 & a_1 S_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_2^1 &= \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_3^2 &= \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_4^3 &= \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_5^4 &= \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_6^5 &= \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.5)$$

A matriz de transformação homogênea apresentada na Equação 6.6 é a matriz de transformação geral, que deve ser igual à matriz de transformação geral do robô (Equação 6.3), se o modelo foi construído

corretamente.

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.6)$$

onde as componentes de \mathbf{n} , \mathbf{o} , \mathbf{a} estão associadas à orientação do efetuador, enquanto as componentes \mathbf{P} (posição) são associadas à posição, em relação ao sistema de referencia da base do manipulador. Existem vários trabalhos que apresentam modelos cinemáticos do robô ABB IRB-140 [175, 176, 177, 178], mas a definição dos sistemas de coordenadas não é a mesma, fazendo com que os valores dos parâmetros geométricos sejam também diferentes. Em consequência, na construção da cinemática de um robô é conveniente que os valores gerados pela equações do modelo analítico sejam equivalentes ao modelo nominal embarcado no controlador do robô.

6.1.2 Cinemática Inversa

Com a cinemática direta definida é possível determinar as equações das variáveis de junta (q_i) em função da posição e a orientação do efetuador, o que se conhece comumente como cinemática inversa [174], a qual precisa ser desenvolvida para o caso do manipulador ABB IRB-140, permitindo a validação com o modelo nominal embarcado no controlador IRC5.

Não existe um método normalizado para solucionar o problema da cinemática inversa, mas existem duas abordagens comumente usadas no método analítico: geométrica e algébrica. A primeira abordagem se aplica na estrutura do robô, através de projeções dos sistemas de coordenadas dos elos no plano XY associado com a base do manipulador. A limitação dessa abordagem é que a solução de forma fechada para as três primeiras juntas do manipulador deve existir geometricamente [179]. A abordagem algébrica consiste em solucionar N sistemas de equações de N incógnitas, onde N é o número de graus de liberdade do robô, mas essa abordagem não garante uma solução de forma fechada para um manipulador [180].

Para o caso do ABB IRB-140 foram usadas as vantagens das duas abordagens, além da técnica de desacoplamento cinemático descrito por Jazar [174] onde é possível dividir o problema da cinemática inversa em dois subproblemas. O resultado da cinemática direta do robô IRB140 é uma matriz de transformação de 4x4, na qual existem doze elementos que são funções trigonométricas de seis variáveis de junta.

Segundo o princípio do desacoplamento pode-se derivar a cinemática inversa da posição e a cinemática inversa da orientação, considerando que a maioria de robôs de 6 DOF têm o punho composto por três juntas de revolução, com interseção e eixos ortogonais no punho. Portanto, é possível representar a matriz de transformação homogênea resultante da cinemática direta na Equação 6.7:

$$T_6^0 = T_3^0 T_6^3, \quad (6.7)$$

onde a matriz de orientação do punho é:

$$R_6^3 = (R_3^0)^{-1} R_6^0 = (R_3^0)^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}, \quad (6.8)$$

e o vetor de posição do punho seria:

$$d_6^0 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

O vetor de posição do punho inclui só variáveis de junta do manipulador sendo que os componentes do vetor (Equação 6.9) provêm três equações para seis incógnitas. Solucionando as três primeiras variáveis de junta, basta calcular as três variáveis restantes associadas com a matriz de torção do punho (Equação 6.8) [174]. Dependendo da configuração do robô é possível que a solução das equações da cinemática inversa seja complexa, o que possibilita o uso de técnicas matemáticas auxiliares para facilitar os procedimentos mencionados [179].

A seguir são descritos os procedimentos que foram considerados para obter a cinemática inversa do robô ABB IRB-140, incluindo as abordagens matemáticas descritas anteriormente e outras técnicas apresentadas em trabalhos correlatos. Para descrever matematicamente a variável θ_1 em função da posição e orientação do efetuador foi utilizado o princípio de desacoplamento, levando em conta a proposta de Khatamian [181] para um robô de 6-DOF.

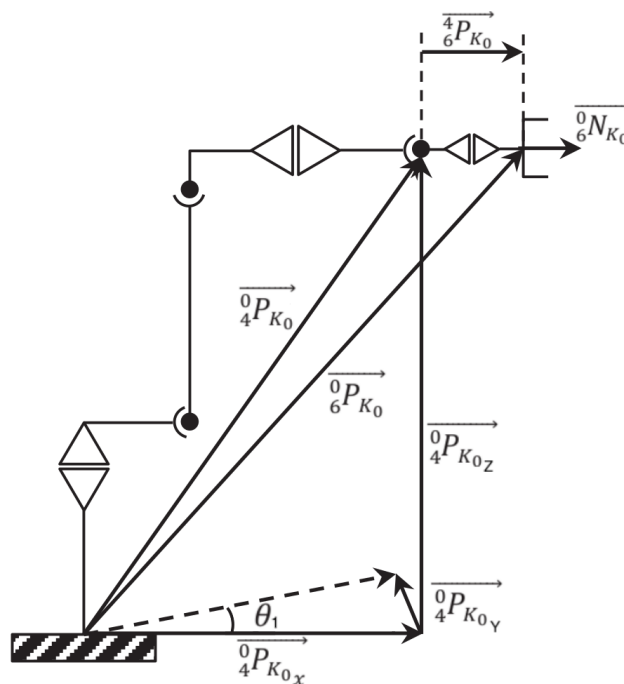


Figura 6.2: Representação geométrica para o cálculo da primeira variável de junta (θ_1)

Fonte: Khatamian [181]

Tendo como referência a Figura 6.2 é possível descrever na Equação 6.10 a relação dos sistemas de

coordenadas do robô ABB IRB-140 segundo Khatamian [181], visando achar a equação que descreve θ_1 :

$${}^0_4\vec{P}_{K_0} = {}^0_6\vec{P}_{K_0} - {}^4_6\vec{P}_{K_0} = \begin{bmatrix} p_x - d_6 a_x \\ p_y - d_6 a_y \\ p_z - d_6 a_z \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Portanto,

$$\theta_1 = \text{atan2} \left(\frac{p_y - d_6 a_y}{p_x - d_6 a_x} \right) \quad (6.11)$$

Posteriormente foi deduzida a equação que define θ_3 , usando dessa vez uma abordagem algébrica em função de elementos já conhecidos. Para isso, foi usada a transformada inversa e a definição de matriz identidade (I) [182]:

$$A \times A^{-1} = I, \quad (6.12)$$

onde A é uma matriz quadrada. No caso do robô ABB IRB-140 é possível afirmar que θ_3 é definida usando os elementos da Equação 6.13:

$$T_2^1 \ T_3^2 \ T_4^3 \ T_5^4 = (T_1^0)^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (T_6^5)^{-1} \quad (6.13)$$

Os elementos da parte esquerda da Equação 6.13 podem ser utilizados para obter relações trigonométricas [182] tal como se apresenta na Equação 6.14.

$$\begin{aligned} A &= 360 \cdot C_2 - 380 \cdot C_2 \cdot S_3 - 380 \cdot C_3 \cdot S_2; \\ B &= 360 \cdot S_2 + 380 \cdot C_2 \cdot C_3 - 380 \cdot S_2 \cdot S_3; \\ C &= A^2 + B^2 = 274000 - 273600 \cdot S_3 \end{aligned} \quad (6.14)$$

A Equação 6.14 pode ser igualada com um valor constante (C_2) da parte esquerda na Equação 6.13 para obter a relação matemática para θ_3 :

$$\theta_3 = \arcsin \left(\left(\frac{C_2}{273600} \right) - 1,0015 \right) \quad (6.15)$$

No caso de θ_2 , a mesma técnica proposta por [182] foi usada, gerando a relação algébrica na Equação 6.16

$$T_3^2 T_4^3 T_5^4 = (T_2^1)^{-1} (T_1^0)^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (T_6^5)^{-1} \quad (6.16)$$

Usando ambas as partes da Equação 6.16, pode ser obtida θ_2 de:

$$\begin{aligned} D &= 380 \cdot C_3; \quad E = k_1 \cdot C_2 - k_2 \cdot S_2 - 360; \\ S &= \sqrt{k_1^2 + k_2^2}; \quad \text{gama} = \arctan(k_2/k_1); \\ \theta_2 &= \text{gama} + \arccos(D/S) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Com as primeiras três variáveis articulares solucionadas, θ_5 pode ser identificada com a técnica algébrica apresentada, considerando θ_1 , θ_2 , e θ_3 , na Equação 6.18 e na Equação 6.19:

$$T_4^3 T_5^4 T_6^5 = (T_1^0 T_2^1 T_3^2)^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

$$\begin{aligned} \theta_5 &= \arccos [az \cdot (S_2 \cdot S_3 - C_2 \cdot C_3) \\ &\quad - ax \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot S_3 - C_1 \cdot C_3 \cdot S_2) \\ &\quad - ay \cdot (C_2 \cdot S_1 \cdot S_3 - C_3 \cdot S_1 \cdot S_2)] \end{aligned} \quad (6.19)$$

Para obter a quarta variável de junta, é necessário usar a Equação 6.18 para definir as seguintes relações algébricas:

$$\begin{aligned} L1 &= ax \cdot S_1 - ay \cdot C_1; \\ L2 &= ax \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \\ &\quad + ay \cdot (C_2 \cdot C_3 \cdot S_1 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \\ &\quad - az \cdot (C_3 \cdot S_2 - C_2 \cdot S_3); \end{aligned}$$

Com a relação algébrica descrita acima, é possível definir θ_4 :

$$\theta_4 = \arctan(L1/L2) \quad (6.20)$$

A última variável de junta do robô é calculada uma vez que as outras cinco variáveis de junta são solucionadas. Portanto, a equação matemática para obter θ_6 é apresentada na Equação 6.21 e na Equação 6.22.

$$T_6^5 = (T_1^0 \ T_2^1 \ T_3^2 \ T_4^3 \ T_5^4)^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

$$\begin{aligned} P &= o_z \cdot (S_2 \cdot S_3 - C_2 \cdot C_3) \\ &\quad - o_x \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot S_3 + C_1 \cdot C_3 \cdot S_2) \\ &\quad - o_y \cdot (C_2 \cdot S_1 \cdot S_3 + C_3 \cdot S_1 \cdot S_2); \\ \theta_6 &= \arcsin(P/-S_5) \end{aligned} \quad (6.22)$$

6.1.3 Método para a validação da cinemática inversa

Para reduzir a discrepância entre o modelo nominal embarcado no controlador do robô e a geometria da estrutura mecânica, um novo modelo de robô calibrado deve substituir o modelo nominal. Portanto, é necessário seguir alguns procedimentos para comparar e validar o modelo analítico a partir do qual um modelo parametrizado é construído como uma referência para ajustar o novo modelo calibrado à estrutura do robô e compensar o erro de posicionamento. Por isso, é importante que o modelo analítico parametrizado tenha similaridade geométrica com o modelo nominal embarcado no controlador (IRC5).

Desta forma, os valores da posição angular da junta na posição inicial do robô no controlador devem ser os mesmos do modelo analítico. A orientação inicial do efetuador definida pelo fabricante do robô afeta os resultados da cinemática inversa se não for equivalente ao modelo analítico. Assim, os ângulos de Euler (orientação) foram obtidos no software RobotStudio disponibilizado pelo fabricante como entrada do modelo analítico para garantir a compatibilidade entre os modelos. A Figura 6.3 mostra as coordenadas iniciais nominais do efetuador do robô.

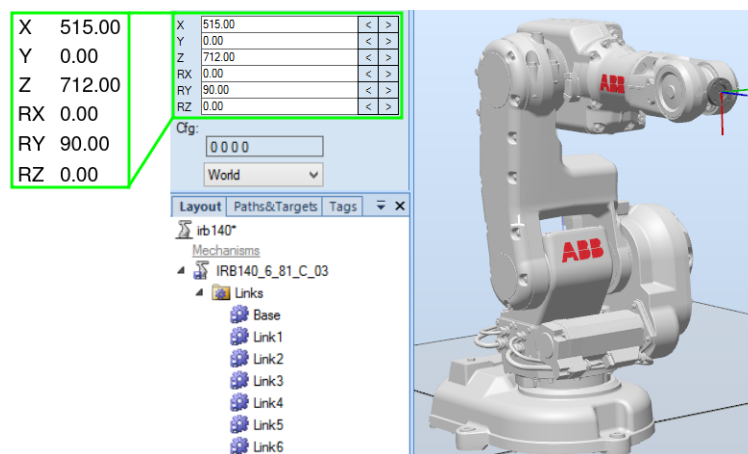


Figura 6.3: Variáveis da posição inicial do robô ABB IRB-140 no controlador IRC5

Com as coordenadas da postura inicial definidas pelo fabricante do robô e repetidas nas equações cinemáticas, o modelo analítico pode ser compatível geometricamente com o modelo nominal, com os

mesmos valores de entrada e saída da cinemática inversa embarcada no controlador do robô.

Para validar o modelo analítico, apenas os parâmetros do modelo de erro diferentes de zero, associados aos comprimentos de elo, foram incluídos no modelo de calibração. Na sequência, foi executada uma rotina de identificação de parâmetros conforme será explicado nas próximas seções. Um *dataset* com várias posições ($X_0Y_0Z_0$) foi construído usando o controlador do robô, incluindo os respectivos valores de junta (θ_i) que em seguida foram inseridos no modelo analítico com comprimentos de elo corrigidos após a identificação do parâmetro e um novo conjunto de dados de posição foi calculado ($X_nY_nZ_n$). O erro entre as posições ($X_0Y_0Z_0$) e ($X_nY_nZ_n$) foi calculado através da distância euclidiana entre elas. O valor médio da distância euclidiana de todas as posições foi calculado como 0,047 mm, que é equivalente à resolução de posição do sistema publicada pelo fabricante (0,05 mm) [183].

Os passos seguidos para garantir a compatibilidade do modelo analítico com o modelo nominal são apresentados na Figura 6.4, utilizando dois softwares comerciais: Robotstudio, utilizado para a programação *off-line* de robôs, simulação das trajetórias dos programas etc. Foi também utilizado o Matlab, o qual permite a simulação da cinemática analítica, direta e inversa, a construção dos *dataset* mencionados e a implementação do método de validação proposto. A comunicação entre Robotstudio (*Server*) e Matlab (*Client*) foi feita usando o método Socket [80].

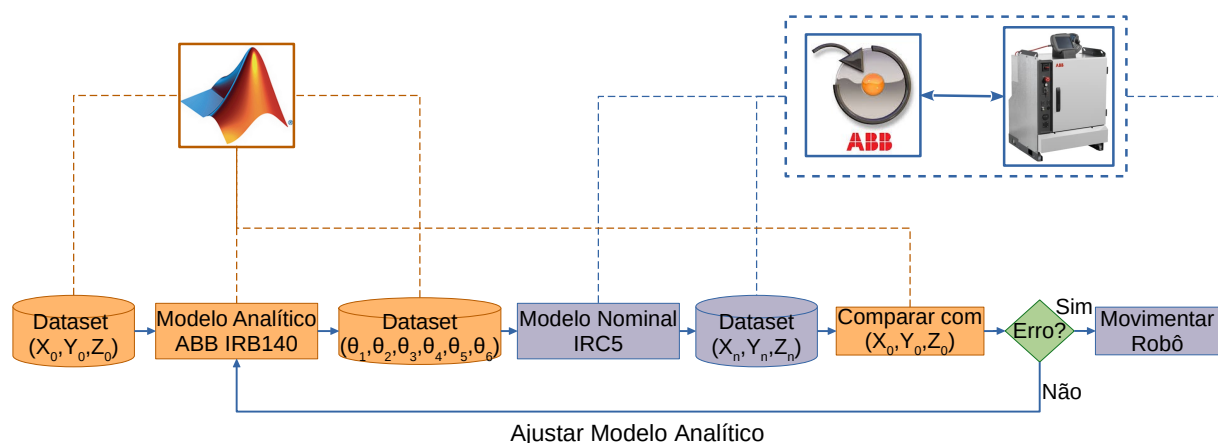


Figura 6.4: Validação do modelo cinemático analítico e o nominal(IRC5)

A Figura 6.5 apresenta a distribuição das coordenadas de posição que foram geradas para a avaliação do modelo analítico.

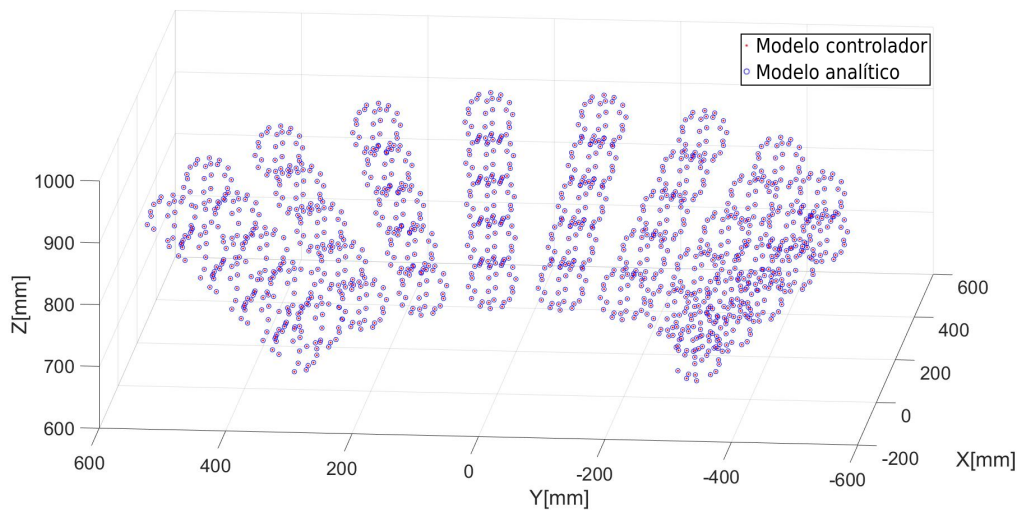


Figura 6.5: Posturas geradas em Matlab

A Figura 6.6 apresenta a distância Euclidiana de todas as posições usadas no método de validação do modelo cinemático:

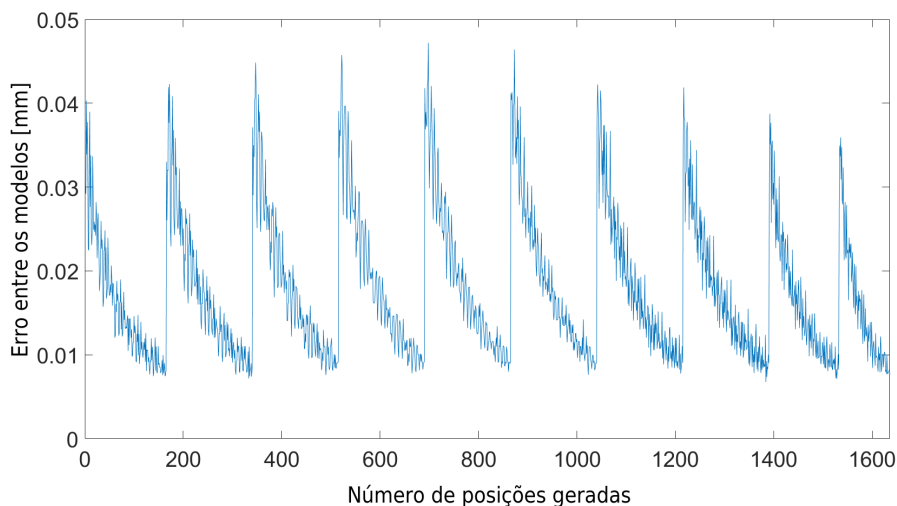


Figura 6.6: Erro Volumétrico entre o Modelo Analítico e o Nominal

Pode-se discutir com os resultados apresentados que a discrepância calculada (distância Euclidiana) entre os resultados das cinemáticas inversas é tão pequena quanto a resolução do sistema, sendo o modelo analítico construído compatível com pelo menos uma das soluções da cinemática inversa embarcadas no controlador.

Em consequência, foi possível gerar nuvens de pontos aleatórios através da programação *off-line* em Matlab, dispondo de uma solução cinemática inversa compatível com o modelo nominal no controlador IRC5 do robô ABB IRB-140 e usá-los nos procedimentos de calibração simulada baseada em sub-regiões. Este processo foi necessário por causa da limitação do RobotStudio de só permitir programação *off-line* de forma manual, o que dificulta testes simulados nos procedimentos de calibração de robôs industriais com grande quantidade de pontos de medição.

6.2 Modelo de erro ABB IRB-140

O modelo de erro para a identificação dos parâmetros cinemáticos se fundamenta na definição da cinemática direta do robô [45]. Portanto, esta seção vai descrever como foi obtido o modelo de erro baseado nas equações que descrevem a cinemática direta, assim como os procedimentos necessários para a identificação dos parâmetros de erro com o algoritmo L-M.

Como foi mencionado no Capítulo 2, é possível construir o modelo de erro do manipulador considerando que o nível 2 de calibração leva em conta só o impacto dos erros geométricos no posicionamento do robô ou também conhecidos por erros cinemáticos. A afirmativa anterior é fundamentada no fato de que vários autores consideram que os erros não geométricos (nível 3 de calibração) são responsáveis só por $\approx 5 - 10\%$ do erro de posicionamento de um manipulador industrial [33, 34]. Em consequência, o modelo de erro para o robô ABB IRB140 considera só os erros geométricos da estrutura mecânica do manipulador.

Usando a modelagem da cinemática direta como uma função dos parâmetros geométricos do robô, é possível estabelecer que:

$$P = T_1 T_2 T_3 \dots T_m , \quad (6.23)$$

onde P é a matriz de transformação do manipulador e T_i é cada uma das transformações das m juntas do robô, definidas na Equação 6.1 e na Equação 6.2, considerando o tipo de junta (prismática ou linear) [172]. Portanto, a equação dos erros cinemáticos, segundo a notação DH pode se expressar em relação à Equação 6.24 como [2]:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial P}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial P}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial P}{\partial \beta} \Delta \beta , \quad (6.24)$$

onde ΔP representa o erro de posicionamento que pode ser fisicamente medido, enquanto $\Delta \theta$, Δd , Δa , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$ são os erros associados com os parâmetros cinemáticos. Escrevendo novamente a Equação 6.24 em forma matricial, para considerar várias medições do efetuador do robô com um instrumento externo é possível formular a Equação 6.25 como a matriz Jacobiana (\mathbf{J}), contendo as derivadas parciais de \mathbf{P} e o vetor de erros do modelo Δx [86].

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P_1 / \partial \theta & \partial P_1 / \partial d & \partial P_1 / \partial a & \partial P_1 / \partial \alpha & \partial P_1 / \partial \beta \\ \partial P_2 / \partial \theta & \partial P_2 / \partial d & \partial P_2 / \partial a & \partial P_2 / \partial \alpha & \partial P_2 / \partial \beta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial P_n / \partial \theta & \partial P_n / \partial d & \partial P_n / \partial a & \partial P_n / \partial \alpha & \partial P_n / \partial \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta d \\ \Delta a \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \Delta x \quad (6.25)$$

O tamanho da matriz Jacobiana (\mathbf{J}) vai depender do número de parâmetros de erro, assim como do número de posturas medidas [38]. Os parâmetros de erro a serem identificados na Equação 6.25 e associados com o vector Δx são apresentados na Tabela 6.2

Tabela 6.2: Parâmetros de erro associados o robô ABB IRB-140

Joint	$\alpha_i[^\circ]$	$a_i[mm]$	$d_i[mm]$	$\theta_i[^\circ]$	$b_i[mm]$	$beta_i[^\circ]$
Base	$\alpha_0 + \delta\alpha_0$	$a_0 + \delta a_0$	$d_0 + \delta d_0$	$\theta_0 + \delta\theta_0$	$b_0 + \delta b_0$	$\beta_0 + \delta\beta_0$
1	$-90 + \delta\alpha_1$	$70 + \delta a_1$	$352 + \delta d_1$	$\theta_1 + \delta\theta_1$	-	-
2	$0 + \delta\alpha_2$	$360 + \delta a_2$	-	$\theta_2 - 90 + \delta\theta_2$	-	$0 + \delta\beta_2$
3	$-90 + \delta\alpha_3$	$0 + \delta a_3$	$0 + \delta d_3$	$\theta_3 + \delta\theta_3$	-	-
4	$90 + \delta\alpha_4$	$0 + \delta a_4$	$380 + \delta d_4$	$\theta_4 + \delta\theta_4$	-	-
5	$-90 + \delta\alpha_5$	$0 + \delta a_5$	$0 + \delta d_5$	$\theta_5 + \delta\theta_5$	-	-
6	$0 + \delta\alpha_6$	$0 + \delta a_6$	$65 + \delta d_6$	$\theta_6 + \delta\theta_6$	-	-

O procedimento de calibração se resume na solução de um sistema não linear do tipo $Ax = B$, onde o processo de identificação é um cálculo contínuo dos erros associados com os parâmetros cinemáticos através de várias iterações, até que o desvio entre o valor calculado e o valor medido do efetuador seja menor que um valor de erro estabelecido [25]. O método escolhido para solucionar o problema não-linear é o L-M, caracterizado por ter boa e rápida convergência em sistemas não-lineares. O algoritmo tem três procedimentos básicos, onde x_k está definido como a lista de parâmetros do modelo de erro na iteração k^{th} , enquanto Δx_k representa as alterações aos valores dos parâmetros de erro a serem identificados [86].

1. Calcular a matriz Jacobiana do robô ($J(x_k)$)
2. Calcular o vetor Δx_k segundo a relação:

$$\Delta x_k = [J(x_k)^T J(x_k) + \mu_k I]^{-1} J(x_k)^T \Delta P(x_k)$$
3. Atualizar $x_{k+1} = x_k + \Delta x_k$ e $k = k + 1$,

Onde μ_k é o resultado das regras apresentadas na Equação 6.26:

$$\begin{cases} \mu_0 = 0,001 \\ \mu_{k+1} = \begin{cases} 0,001\lambda, & \text{se } \|\Delta P(x_{k+1})\| \geq \|\Delta P(x_k)\| \\ 0,001/\lambda, & \text{se } \|\Delta P(x_{k+1})\| < \|\Delta P(x_k)\| \end{cases} \\ 2,5 \leq \lambda \leq 10 \end{cases} \quad (6.26)$$

Para gerar os dados de medição de um modelo cinemático compatível com o ABB IRB-140, mas incluindo erros nos parâmetros cinemáticos, é possível gerar um modelo com as transformações descritas com as notações DH e Hayati, obtendo um modelo completo e que permite simular os dados de medição de um robô com características semelhantes ao ABB IRB-140 [184]. Na Equação 6.27 se apresentam as transformações usadas para gerar um modelo cinemático que tenha erros randômicos distribuídos entre todos os parâmetros.

$$T_i = Trans_{(x,a_i)} Trans_{(y,b_i)} Trans_{(z,d_i)} Rot_{(x,\alpha_i)} Rot_{(y,\beta_i)} Rot_{(z,\theta_i)} \quad (6.27)$$

Para gerar os dados das simulações feitas na calibração do ABB IRB-140 foram incluídos erros randômicos com comportamento Gaussiano, considerando que em vários trabalhos correlatos esses erros introduzidos tinham como característica de uma função Gaussiana dos erros tivesse com média zero e o desvio padrão oscilando entre 0,01 e 0,1 (mm, rad, graus etc.), dependendo do autor [5, 37, 68, 118, 155].

6.3 Identificação dos Parâmetros de Erro

Quando se implementa a calibração de robôs industriais o modelo de erro deve considerar os requisitos de completude, continuidade e minimalidade, assim como foi mencionado no Capítulo 2. Na metodologia do presente trabalho o número dos parâmetros de erro pode ser reduzido de forma sistemática para garantir o requisito de minimalidade. A Figura 6.7 apresenta os procedimentos para a calibração de robôs, detalhando o processo para reduzir a quantidade de parâmetros de erro em relação ao número condicionamento (K).

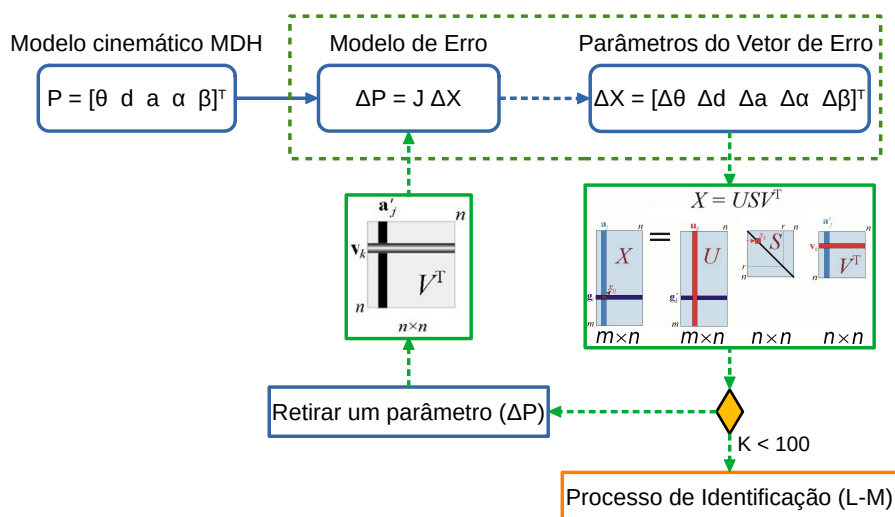


Figura 6.7: Eliminação das redundâncias nos parâmetros de erro

A otimização do modelo de erro pode ser alcançada em dois passos fundamentais [62, 75]. Inicialmente é verificado se o número de condicionamento da matriz Jacobiana (J) é maior que 100. Em seguida, identifica se qual dos parâmetros do modelo de erro gera deficiências na matriz Jacobiana com uma análise apropriada em relação à redundância entre parâmetros. Finalmente, um modelo de erro otimizado é derivado do modelo geral através da exclusão de um número pequeno de parâmetros de erro, até que o número de condicionamento da matriz Jacobiana seja menor que 100.

A Tabela 6.3 apresenta os parâmetros de erro que foram removidos do modelo geral durante o processo de otimização, mantendo 6 parâmetros para a transformação do sistema de coordenadas do mundo e a base do robô, assim como 21 parâmetros cinemáticos associados à estrutura mecânica do robô.

Tabela 6.3: Conjunto mínimo de parâmetros de erro para o robô ABB IRB140

Joint	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [mm]$	$d_i [mm]$	$\theta_i [^\circ]$	$b_i [mm]$	$beta_i [^\circ]$
Base	$\alpha_0 + \delta\alpha_0$	$\alpha_0 + \delta a_0$	$d_0 + \delta d_0$	$\theta_0 + \delta\theta_0$	$b_0 + \delta b_0$	$\beta_0 + \delta\beta_0$
1	$-90 + \delta\alpha_1$	$70 + \delta a_1$	$352 + \delta d_1$	$\theta_1 + \delta\theta_1$	-	-
2	$0 + \delta\alpha_2$	$360 + \delta a_2$	-	$\theta_2 - 90 + \delta\theta_2$	-	$0 + \delta\beta_2$
3	$-90 + \delta\alpha_3$	$0 + \delta a_3$	$0 + \delta d_3$	$\theta_3 + \delta\theta_3$	-	-
4	$90 + \delta\alpha_4$	$0 + \delta a_4$	$380 + \delta d_4$	$\theta_4 + \delta\theta_4$	-	-
5	$-90 + \delta\alpha_5$	$0 + \delta a_5$	$0 + \delta d_5$	$\theta_5 + \delta\theta_5$	-	-
6	$0 + \delta\alpha_6$	$0 + \delta a_6$	$65 + \delta d_6$	$\theta_6 + \delta\theta_6$	-	-

O procedimento de otimização é realizado para reduzir o número de parâmetros ao mínimo, no entanto o modelo de erro se mantém completo o suficiente para garantir a precisão e eficiência do processo de identificação do robô ABB IRB-140, evitando a redundância dos parâmetros de erro e incluindo o número essencial de parâmetros.

Com o modelo otimizado é possível fazer a calibração utilizando-se o conceito de sub-regiões e comparar os resultados com a calibração tradicional. Para isso, nuvens de pontos de calibração e avaliação foram definidas como subconjuntos de cerca de 650 pontos aleatórios espalhados no espaço de trabalho do manipulador, assim como se apresenta na Figura 6.8. Cabe mencionar que todos os pontos são alcançáveis e ficam dentro das fronteiras do espaço de trabalho do robô.

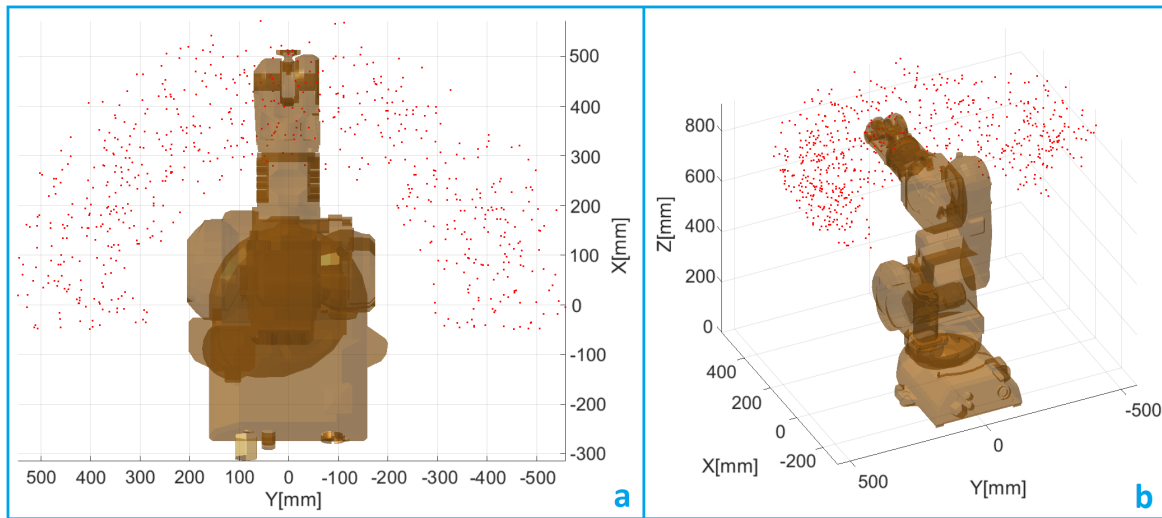


Figura 6.8: Pontos aleatórios no espaço de trabalho do robô: a) Vista superior e b) Vista em 3D

O primeiro procedimento realizado para comparar os resultados dos métodos de calibração anteriormente mencionados foi calibrar o robô numa nuvem de pontos com 250 medições (Figura 6.9), que fazem parte da nuvem de pontos aleatórios apresentada na Figura 6.8.

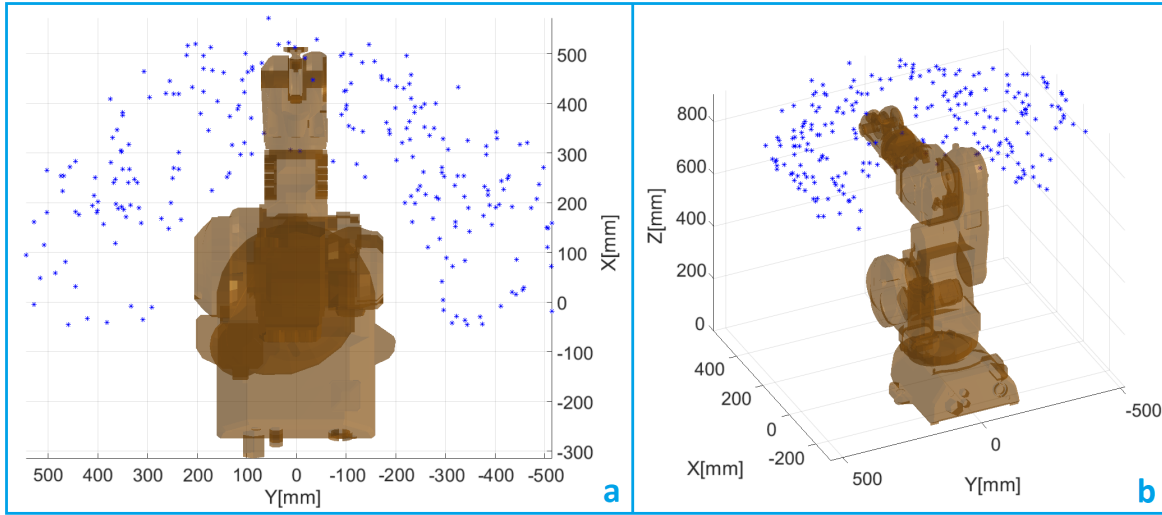


Figura 6.9: Pontos escolhidos para efetuar a calibração tradicional: a) Vista superior e b) Vista em 3D

Usando o algoritmo L-M foram identificados os parâmetros do vetor de erro usando a calibração tradicional. Estes valores são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Vetor de erro identificados com a calibração tradicional

Parâmetro	$\Delta \bar{X}_{trad}$
δ_{px1} [mm]	0,3000
δ_{alfa1} [°]	0,2201
δ_{Th2} [°]	-0,0643
δ_{px2} [mm]	0,0120
δ_{alfa2} [°]	0,2720
δ_{beta2} [°]	-0,3954
δ_{Th3} [°]	0,0172
δ_{pz3} [mm]	-0,2719
δ_{px3} [mm]	-0,3246
δ_{alfa3} [°]	0,1068
δ_{Th4} [°]	-0,0684
δ_{pz4} [mm]	-0,2595
δ_{px4} [mm]	0,0348
δ_{alfa4} [°]	-0,2946
δ_{Th5} [°]	0,1558
δ_{pz5} [mm]	0,2529
δ_{px5} [mm]	0,1631
δ_{alfa5} [°]	-0,0397
δ_{Th6} [°]	0,1092
δ_{pz6} [mm]	0,2557
δ_{px6} [mm]	0,1136
$\ SR_i\ ^*$	1,0295

*Norma Euclidiana do vetor de erro $\left(\sqrt{\sum_{k=1}^n |i|^2}\right)$

Com os valores do vetor de erro associados aos parâmetros cinemáticos foram calculados os erros de posicionamento antes e depois da calibração tradicional nos mesmos pontos. Os resultados são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Erros de posicionamento (mm) com a calibração tradicional

Erro	Desv. Padrão	Média	Erro Max.
Antes [mm]	0,6807	1,7899	3,6115
Depois [mm]	0,0948	0,2367	0,5334

Para efetuar a calibração baseada em sub-regiões foram definidos cinco vetores direcionais (\vec{v}_g) ao longo do espaço de trabalho do robô, com três sub-regiões em cada \vec{v}_g . A Tabela 6.6 descreve os valores e detalhes das variáveis propostas para estabelecer os cinco vetores direcionais ($\vec{v}_{g_{1-5}}$), assim como as sub-regiões.

Tabela 6.6: Variáveis para a definição das sub-regiões

Variável	Valor	Descrição
θ_{vg} [°]	-90:40:90	Cada vetor direcional tem um valor incremental em θ_{vg} de 40°, de -90° até 90° .
ϕ_{vg} [°]	45	Cada vetor direcional tem um valor de inclinação de $\phi_{vg} = 45^\circ$.
r_{vg} [mm]	350	Raio do vetor direcional.
r_{sr} [mm]	100	Raio das sub-regiões.

6.4 Definição das Sub-Regiões no espaço de trabalho do robô

Visando reduzir o número de pontos medidos para calibrar o robô nas sub-regiões e ainda mantê-las espalhadas dentro do espaço de trabalho, foram escolhidas quatro sub-regiões dentre o conjunto total. Em seguida, os 27 parâmetros do modelo de erro otimizado foram identificados em cada uma das quatro sub-regiões do conjunto total, e também com todas as quatro uma única vez. Cabe mencionar que cada sub-região foi medida a partir de um local diferente do sistema de medição físico (simulação). A Figura 6.10 apresenta os pontos medidos nas sub-regiões escolhidas, mantendo 25 pontos para a etapa de identificação em cada sub-região, permitindo estimar os parâmetros de erro com um número mínimo de posturas para evitar uma matriz Jacobiana mal condicionada [162, 163].

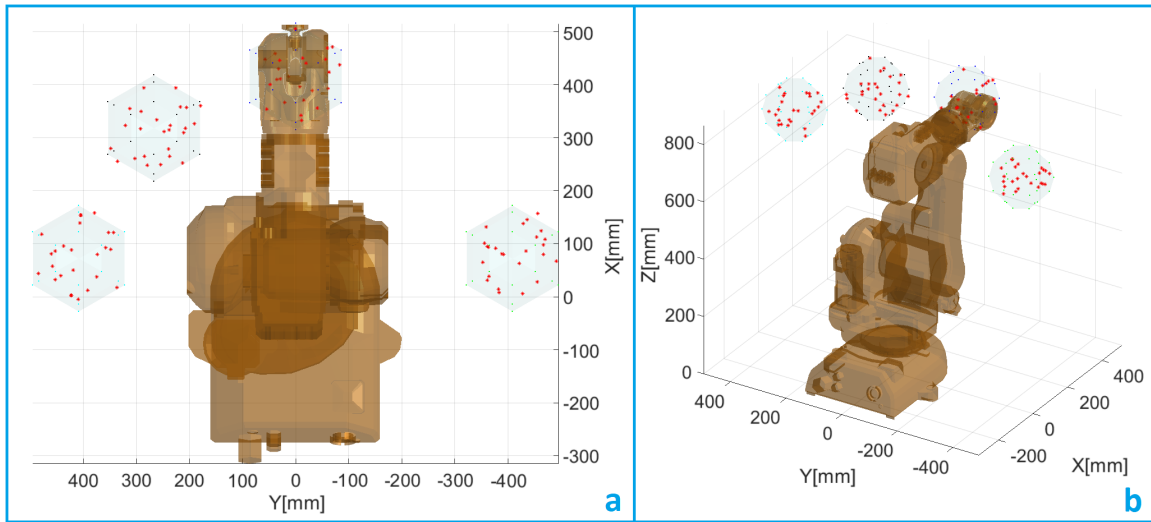


Figura 6.10: Pontos medidos nas sub-regiões escolhidas: a) Vista superior e b) Vista 3D

Os resultados da calibração nas sub-regiões são apresentados na Tabela 6.7, onde SR_{1-4} inclui todos os 100 pontos medidos a partir de um mesmo local do sistema de medição. Nas sub-regiões, os erros paramétricos podem ser estimados com um número mínimo de posturas, garantindo uma matriz Jacobiana bem condicionada (pelo menos 25 pontos medidos em uma sub-região).

Tabela 6.7: Erro médio na calibração por sub-regiões

Erro médio	SR_1	SR_2	SR_3	SR_4	SR_{1-4}
Antes [mm]	1,5812	1,5811	2,3617	2,5852	2,0080
Depois [mm]	0,1749	0,1956	0,2071	0,2131	0,2504

6.5 Identificação dos erros paramétricos em cada Sub-Região

Com os quatro vetores de erro identificados em cada uma das sub-regiões ($\Delta X_{1 \rightarrow 4}$) um vetor de erro médio ($\Delta \bar{X}_{new}$) foi calculado em relação com os quatro iniciais, ou seja, a média aritmética foi usada para calcular um novo vetor de erros paramétricos a partir dos que foram obtidos nas quatro sub-regiões escolhidas. Essa proposta assume a existência de um robô ajustado que pode cumprir com os requisitos de precisão em uma região de trabalho definida por sub-regiões. Portanto, a média aritmética foi adotada como função de agregação para obter o robô ajustado (seção 5.1.4), porque os parâmetros de erro são ótimos localmente, variam entre as sub-regiões em oscilações harmônicas que tendem a ser consistentes em medidas repetidas, com pequena amplitude [185]. A Figura 6.11 apresenta o procedimento proposto para obter o vetor de erro médio.

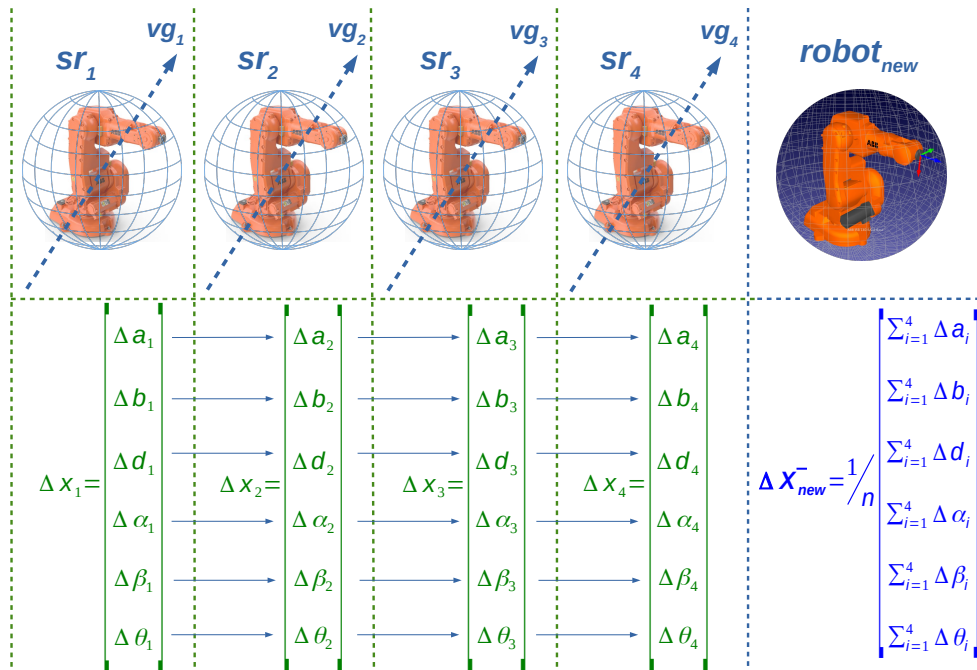


Figura 6.11: Vetor de erro médio calculado a partir dos valores identificados em cada sub-região

É importante considerar que os parâmetros de erro associados à base do robô são calculados cada vez que novas medições são feitas, ou seja, esses seis parâmetros são livres de serem alterados em qualquer momento que a medição e identificação sejam efetuadas. A Tabela 6.8 apresenta os valores dos parâmetros de erro em cada sub-região, excluindo os parâmetros da base. Essa exclusão é justificada, pois quando o robô é posicionado para se movimentar o efetivador deve ser calibrado em relação ao sistema de coordenadas do robô.

Tabela 6.8: Vetores de erro identificados em cada sub-região e o vetor de erro médio

Parameter	SR_1	SR_2	SR_3	SR_4	$\Delta \bar{X}_{new}$
δ_{px1} [mm]	-0,8921	1,3674	-1,0301	-0,0663	-0,1553
δ_{alfa1} [°]	-0,2799	0,2047	1,2181	-0,0360	0,2767
δ_{Th2} [°]	-0,0054	-0,1962	0,2511	-0,0057	0,0109
δ_{px2} [mm]	-0,3893	-0,1570	-1,0443	0,7844	-0,2016
δ_{alfa2} [°]	0,3468	0,1359	0,3657	-0,4083	0,1100
δ_{beta2} [°]	0,0298	-0,3376	-1,2244	-0,2431	-0,4438
δ_{Th3} [°]	-0,0475	-0,1611	-0,1870	0,0012	-0,0986
δ_{pz3} [mm]	-2,1923	-1,3722	4,3686	0,4956	0,3249
δ_{px3} [mm]	0,1803	0,4053	0,9348	-1,8314	-0,0778
δ_{alfa3} [°]	0,9852	-0,1777	-0,8655	-0,0603	-0,0296
δ_{Th4} [°]	0,3512	0,0097	-0,4903	1,7323	0,4007
δ_{pz4} [mm]	0,1949	-0,0923	-1,1049	-0,3802	-0,3456
δ_{px4} [mm]	0,1972	0,0365	-0,1217	-0,0922	0,0049
δ_{alfa4} [°]	-0,2235	-0,5434	-0,3645	-0,0510	-0,2956
δ_{Th5} [°]	-0,8515	0,1861	0,3399	-0,0709	-0,0991
δ_{pz5} [mm]	0,1995	1,3454	-2,1296	0,5850	0,0001
δ_{px5} [mm]	1,7798	0,3199	0,0338	0,0621	0,5489
δ_{alfa5} [°]	0,9367	1,2758	-2,3545	1,5910	0,3623
δ_{Th6} [°]	0,3441	1,3124	-2,2351	1,0554	0,1192
δ_{pz6} [mm]	-0,0401	0,1175	0,0809	0,5211	0,1699
δ_{px6} [mm]	-0,4053	-0,0372	0,0168	0,0312	-0,0986
$\ SR_i\ ^*$	3,5075	3,1352	6,5483	3,4461	1,1556

*Norma Euclidiana do vetor de erro $\left(\sqrt{\sum_{k=1}^n |i|^2}\right)$

A modelagem dos parâmetros do modelo de erro através de uma função multivariada é um processo complexo, devido à presença de convergência local onde problemas de mínimos quadrados não lineares podem ter múltiplos mínimos locais [4]. O vetor de erro médio derivado a partir das quatro sub-regiões escolhidas é apresentado na Equação 6.28 como:

$$\Delta X_{new}^- = [\Delta \bar{a} \ \Delta \bar{b} \ \Delta \bar{d} \ \Delta \bar{\alpha} \ \Delta \bar{\beta} \ \Delta \bar{\theta}] \quad (6.28)$$

Seguindo com o procedimento para comparar a calibração tradicional e através de sub-regiões foi usada a região de avaliação com o intuito de avaliar os modelos de erro obtidos nos dois tipos de calibração. A Figura 6.12 apresenta cerca de 240 pontos medidos utilizados para avaliar os dois métodos, diferentes dos pontos utilizados na calibração tradicional e por sub-regiões.

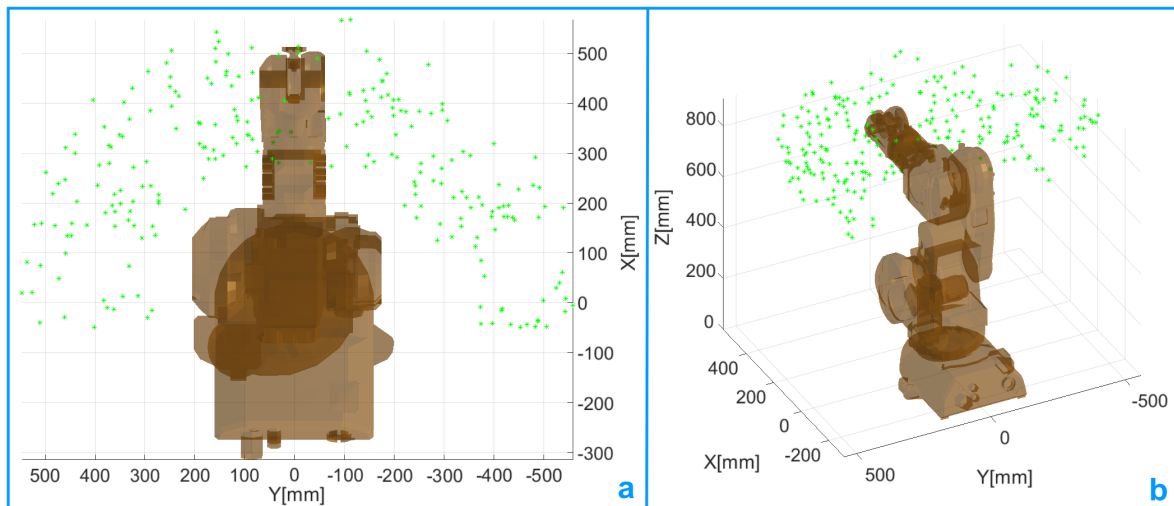


Figura 6.12: Região de avaliação para a calibração do robô: a. vista superior e b. Vista 3d

Os quatro modelos calibrados nas sub-regiões escolhidas e o modelo calibrado com as quatro sub-regiões de uma única vez foram avaliadas na região definida para esse procedimento. Os resultados do erro de posicionamento médio antes e depois da avaliação se apresentam na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Erros médios (mm) calculados na região avaliação antes e depois da calibração em cada sub-região.

Erro médio	SR_1	SR_2	SR_3	SR_4	SR_{1-4}
Antes [mm]	4,6999	2,5085	5,9607	3,3471	2,1486
Depois [mm]	0,8135	0,7043	0,8990	0,8820	0,2813

Depois de completar o procedimento de avaliação com o modelo calibrado em cada uma das sub-regiões adotadas, o erro de posicionamento médio esteve acima de 0,7 mm, longe dos requisitos de precisão em processos industriais específicos. Porém, evidenciou-se que a calibração com as quatro sub-regiões de uma única vez a partir de um local de medição comum melhorou a precisão do processo de calibração.

6.6 Comparação dos métodos de calibração

Os resultados dos erros de posicionamento calculados na região de avaliação com os dois métodos de calibração se apresentam na Figura 6.13, ou seja, o método de calibração tradicional e o método proposto com sub-regiões com um vetor de erro médio calculado a partir dos vetores de erro calculados para cada uma das sub-regiões separadamente.

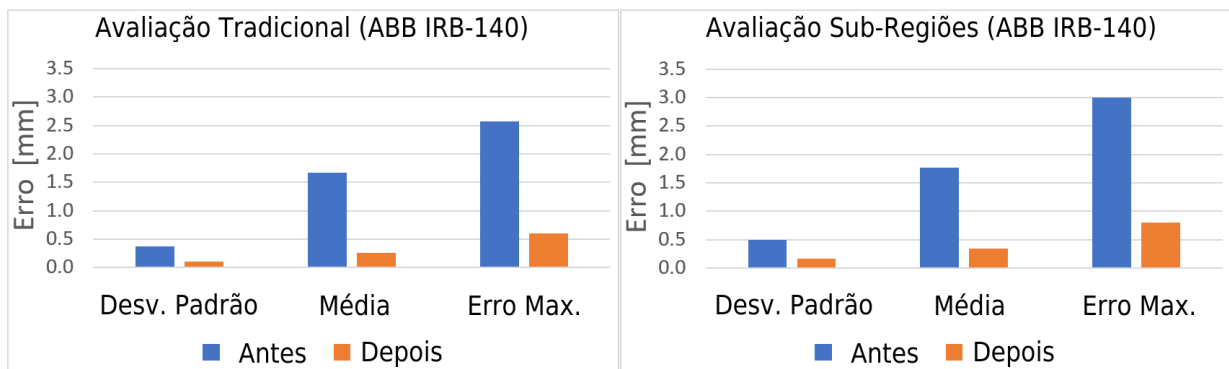


Figura 6.13: Comparação do erro médio resultante dos dois métodos de calibração

Os erros de posicionamento antes da calibração e depois da avaliação com os métodos de calibração tradicional e por sub-regiões são apresentados na Tabela 6.10:

Tabela 6.10: Comparação dos valores de erro médio resultantes dos dois métodos de calibração

Erro médio	Tradicional	Sub-Região
Antes [mm]	1,6647	1,7700
Depois [mm]	0,2617	0,3431

No procedimento de avaliação da calibração feita em sub-regiões o posicionamento de erro do robô foi reduzido de um erro médio de 0,343 mm, enquanto na calibração tradicional a redução nos mesmos pontos de avaliação foi de 0,262 mm. Portanto, o método de calibração baseado em sub-regiões é apresentado como uma alternativa viável à calibração tradicional, onde os benefícios do método baseado em sub-regiões se fundamentam em tornar fatível o uso de instrumentos de medição flexíveis com alta exatidão considerando regiões menores, reduzindo o tempo empregado para o processo de calibração com sistema complexos e ampliando o espaço de trabalho onde os pontos medidos podem ser coletados.

Capítulo 7

ESTUDO DE CASO 2: FANUC LR 200i

Neste capítulo são apresentados os resultados práticos com medições feitas com um sistema de medição do tipo Laser Tracker sobre um robô industrial Fanuc 200i do PMCLab¹, usando o conceito de medição em sub-regiões proposto ao longo desse trabalho. A modelagem do robô será descrita a seguir, junto com o modelo de erro e os procedimentos descritos na metodologia proposta. Foram calculados vários vetores de erro calibrados em sub-regiões e avaliados em pontos diferentes daqueles da calibração, denominadas volume de avaliação. Finalmente, são avaliados e comparados os resultados obtidos, assim como a validação do método proposto num ambiente real.

O robô Fanuc 200i é utilizado em uma ampla variedade de aplicações industriais e comerciais, devido à estrutura compacta de seis eixos, flexibilidade e alta velocidade, assim como as vantagens de ser projetado para evitar a entrada de pó e líquido segundo a norma IP54 [186].

7.1 Modelo Cinemático Fanuc 200i

Utilizando as notações MDH (para juntas paralelas) foi feita a modelagem cinemática do robô Fanuc 200i. Na Figura 7.1 são apresentadas as definições dos sistemas de coordenadas de cada junta do sistema.

¹Universidade de Ciência e Tecnologia do Missouri, EUA

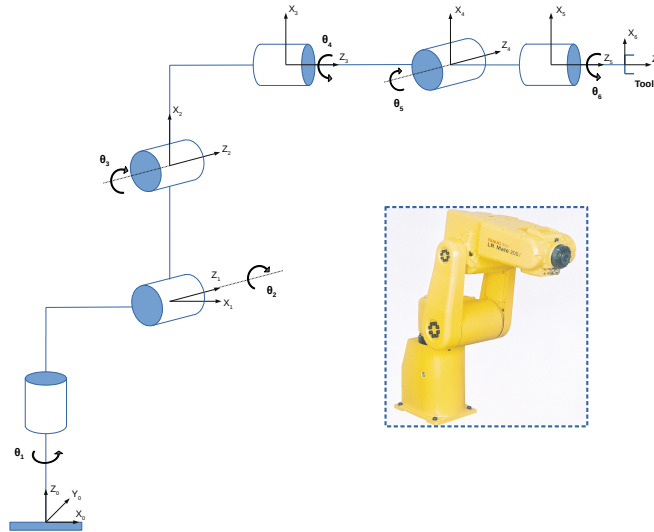


Figura 7.1: Definição sistemas de coordenadas segundo a notação MDH: robô Fanuc 200i

Após a definição dos sistemas de coordenadas associadas às seis juntas do manipulador, é possível especificar os valores dos parâmetros geométricos para o robô Fanuc 200i. Na Tabela 7.1 são indicados os valores dos parâmetros geométricos, onde as variáveis articulares das seis juntas se definem como θ_i .

Tabela 7.1: Parâmetros geométricos do robô Fanuc 200i

Junta	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [mm]$	$d_i [mm]$	$\theta_i [^\circ]$	$\beta_i [^\circ]$
1	-90	150	0	θ_1	-
2	180	250	-	$\theta_2 - 90$	0
3	-90	75	0	$\theta_2 + \theta_3$	-
4	90	0	-290	θ_4	-
5	-90	0	0	θ_5	-
6	180	0	-80	θ_6	-

Com a definição dos valores associados aos parâmetros geométricos, foram estabelecidas as equações relativas às matrizes de transformação homogênea que determinam a postura do efetuador em relação ao sistema de coordenadas da base do robô [174]. A partir do produto entre as matrizes que relacionam o elo i e o elo $i - 1$ é gerada a matriz que relaciona o sistema de coordenadas da base com elemento terminal do manipulador. A matriz de transformação geral do Fanuc 200i se descreve na Equação 7.1:

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (7.1)$$

Para simplificar as notações matemáticas usadas nas operações com as variáveis das matrizes de transformação homogênea foi usada a seguinte designação:

$$\begin{aligned} \text{Sen}(\theta_i) &= S_i, \\ \text{Cos}(\theta_i) &= C_i \end{aligned}$$

Na Equação 7.3 são apresentadas as matrizes de transformação homogênea associadas aos valores DH do robô Fanuc 200i.

$$\begin{aligned} T_1^0 &= \begin{bmatrix} -C_1 & 0 & S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 & a_1 S_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_2^1 &= \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_3^2 &= \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_4^3 &= \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_5^4 &= \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & T_6^5 &= \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7.3)$$

A matriz de transformação homogênea apresentada na Equação 7.4 é a matriz de transformação geral, que deve ser igual à matriz de transformação geral do robô (Equação 7.1), se o modelo foi construído corretamente.

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Após obter a equação da cinemática direta do Fanuc 200i é possível obter a posição e orientação a partir dos valores de junta (θ_i). Cabe mencionar que as equações obtidas calculam a postura do sistema de coordenadas da última junta em relação ao sistema de referência da base do manipulador. Como foi mencionado anteriormente, e para a validação com dados reais no presente trabalho, o robô Fanuc 200i tem um sensor tipo STS (em inglês: *Smart Track Sensor*) acoplado à última junta, permitindo as medições com o *Laser-Tracker* do PMCLab (*Precision Motion Control Laboratory*). Portanto, uma matriz de transformação homogênea adicional deve ser considerada no modelo, descrita na Equação 7.5:

$$T_6^7 = \begin{bmatrix} x_{sts} \\ y_{sts} \\ z_{sts} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

Cabe mencionar que no caso da matriz de transformação homogênea do sensor STS não são consideradas as variáveis de rotação, por estar fixado à última junta do robô. Nas seções a seguir são apresentados maiores detalhes do arranjo utilizado para os experimentos efetuados no PMCLab.

7.2 Modelo de Erro Fanuc 200i

A seguir é descrito o modelo de erro baseado nas equações da cinemática direta do robô industrial [45], assim como os procedimentos necessários para a identificação de parâmetros cinemáticos com o algoritmo L-M. A construção do modelo de erro considera o nível 2 de calibração, ou seja, pondera o impacto dos erros geométricos no posicionamento do robô, assim como foi feito com o manipulador ABB IRB140 (Capítulo 6). Os parâmetros de erro associados ao modelo de erro do robô Fanuc 200i são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Parâmetros de erro associados o robô Fanuc 200i

Junta	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [mm]$	$d_i [mm]$	$\theta_i [^\circ]$	$b_i [mm]$	$\beta_i [^\circ]$
Base	$\alpha_0 + \delta\alpha_0$	$a_0 + \delta a_0$	$d_0 + \delta d_0$	$\theta_0 + \delta\theta_0$	$b_0 + \delta b_0$	$\beta_0 + \delta\beta_0$
1	$-90 + \delta\alpha_1$	$150 + \delta a_1$	$0 + \delta d_1$	$\theta_1 + \delta\theta_1$	-	-
2	$180 + \delta\alpha_2$	$250 + \delta a_2$	-	$\theta_2 - 90 + \delta\theta_2$	-	$0 + \delta\beta_2$
3	$-90 + \delta\alpha_3$	$75 + \delta a_3$	$0 + \delta d_3$	$\theta_2 + \theta_3 + \delta\theta_3$	-	-
4	$90 + \delta\alpha_4$	$0 + \delta a_4$	$-290 + \delta d_4$	$\theta_4 + \delta\theta_4$	-	-
5	$-90 + \delta\alpha_5$	$0 + \delta a_5$	$0 + \delta d_5$	$\theta_5 + \delta\theta_5$	-	-
6	$180 + \delta\alpha_6$	$0 + \delta a_6$	$-80 + \delta d_6$	$\theta_6 + \delta\theta_6$	-	-
Sensor	-	-	$143 + \delta d_7$	-	-	-

7.3 Identificação dos Parâmetros de Erro

Seguindo com o mesmo procedimento de otimização do modelo de erro descrito no Capítulo 6, foram retirados 3 parâmetros para o caso do robô Fanuc, garantindo que o número de condicionamento (K) da matriz Jacobiana (J) seja menor que 100. Na Tabela 7.3 são apresentados os parâmetros de erro que foram removidos do modelo geral de erro durante o processo de otimização, conservando 6 parâmetros para a transformação do sistema de coordenadas do mundo e a base do manipulador, assim como 21 parâmetros cinemáticos associados à estrutura mecânica do robô, e finalmente 1 parâmetro vinculado ao sensor de referência do *Laser-Tracker*, totalizando 28 parâmetros do modelo de erro a serem identificados.

Tabela 7.3: Conjunto mínimo de parâmetros de erro para o robô Fanuc 200i

Junta	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [mm]$	$d_i [mm]$	$\theta_i [^\circ]$	$b_i [mm]$	$\beta_i [^\circ]$
Base	$\alpha_0 + \delta\alpha_0$	$a_0 + \delta a_0$	$d_0 + \delta d_0$	$\theta_0 + \delta\theta_0$	$b_0 + \delta b_0$	$\beta_0 + \delta\beta_0$
1	$-90 + \delta\alpha_1$	$150 + \delta a_1$	$0 + \delta d_1$	$\theta_1 + \delta\theta_1$	-	-
2	$180 + \delta\alpha_2$	$250 + \delta a_2$	-	$\theta_2 - 90 + \delta\theta_2$	-	$0 + \delta\beta_2$
3	$-90 + \delta\alpha_3$	$75 + \delta a_3$	$0 + \delta d_3$	$\theta_2 + \theta_3 + \delta\theta_3$	-	-
4	$90 + \delta\alpha_4$	$0 + \delta a_4$	$-290 + \delta d_4$	$\theta_4 + \delta\theta_4$	-	-
5	$-90 + \delta\alpha_5$	$0 + \delta a_5$	$0 + \delta d_5$	$\theta_5 + \delta\theta_5$	-	-
6	$180 + \delta\alpha_6$	$0 + \delta a_6$	$-80 + \delta d_6$	$\theta_6 + \delta\theta_6$	-	-
Sensor	-	-	$143 + \delta d_7$	-	-	-

Depois do procedimento de otimização do modelo de erro foi obtido um número mínimo de parâmetros de erro que conseguiriam preservar um modelo completo para a identificação dos valores com o algoritmo L-M.

7.4 Medições no espaço de trabalho do robô Fanuc 200i

Com o intuito de validar de forma experimental o conceito de Sub-Regiões (SR) foram processadas 550 medições no espaço de trabalho do robô Fanuc 200i, usando o *Laser-Tracker* do PMCLab, disponibilizadas através da cooperação com o professor Dr. Robert Landers². Na Figura 7.2 se apresenta a distribuição do instrumento de medição, o *Laser-Tracker* Radian R20, o robô Fanuc 200i, assim como o sensor STS acoplado ao efetuador do manipulador. Algumas das características do *Laser-Tracker* são: a precisão de medição de $\pm 10\mu m + 5\mu m/m$, a resolução de $0.1\mu m$ e uma faixa de medição de até $40m$.

Cabe mencionar que o STS permite a medição de 6-DOF, mas o *dataset* disponibilizado só contém informação da posição (3-DOF). O procedimento para alinhar o *Laser-Tracker* com a base do robô não foi descrito no presente trabalho, pois o alinhamento entra no sistema como parâmetros a serem identificados, ou seja, os parâmetros da base.

²Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial, Universidade de Ciência e Tecnologia do Missouri



Figura 7.2: Setup do *Laser-Tracker* e o Robô Fanuc 200i

Na Figura 7.3 se apresenta a distribuição das posições medidas pelo sensor. Os valores das variáveis do vetor direcional e das sub-regiões, conforme a Figura 4.5, foram: raio da sub-regiões = 100 mm, $\theta_{vg} = 45^\circ$, $\phi_{vg} = 45^\circ$

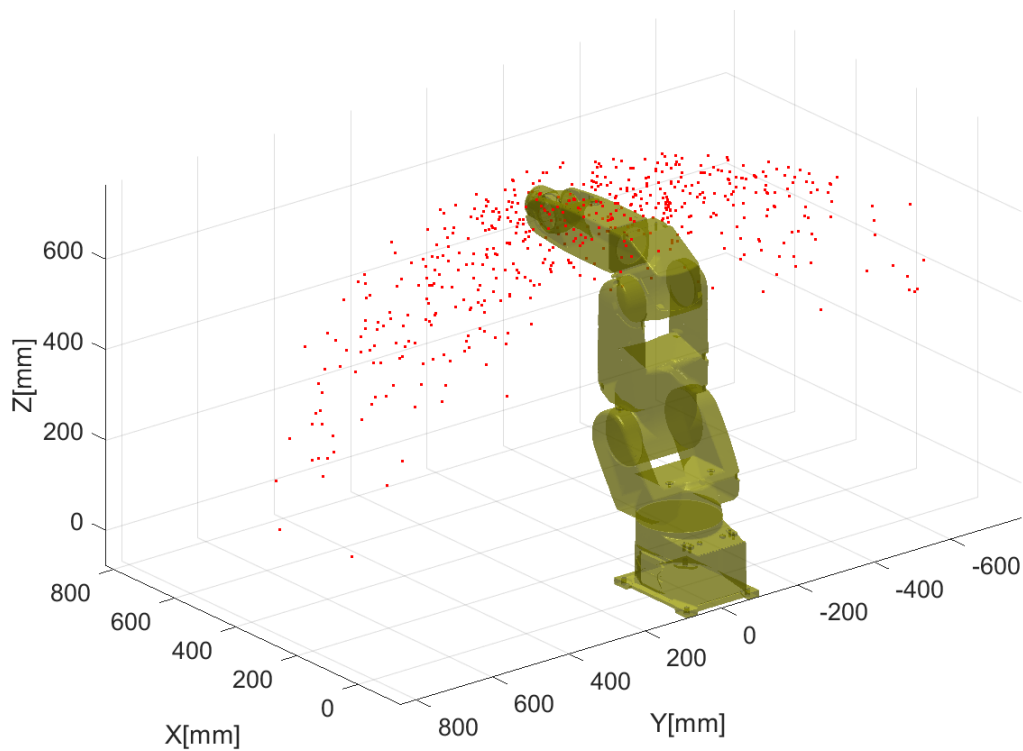


Figura 7.3: Medições tomadas pelo *Laser-Tracker* do PMCLab

Cabe mencionar que as sub-regiões são definidas para aproveitar as medições feitas no PMCLab e disponibilizadas através de um *dataset*, adaptando o conceito de sub-regiões em pontos gerados de forma aleatória para os procedimentos da calibração tradicional com o robô Fanuc 200i.

7.5 Definição de Sub-Regiões no espaço de trabalho

Foram definidos 5 vetores direcionais, incluindo 3 sub-regiões em cada vetor. Na Figura 7.4 se apresentam a vista lateral, superior e a perspectiva do robô Fanuc 200i, assim como a distribuição das sub-regiões ao longo do espaço de trabalho. A distribuição das sub-regiões considerou o volume que envolve os pontos medidos pelo *Laser-Tracker*, visando aproveitar a informação disponibilizada pelo PMCLab.

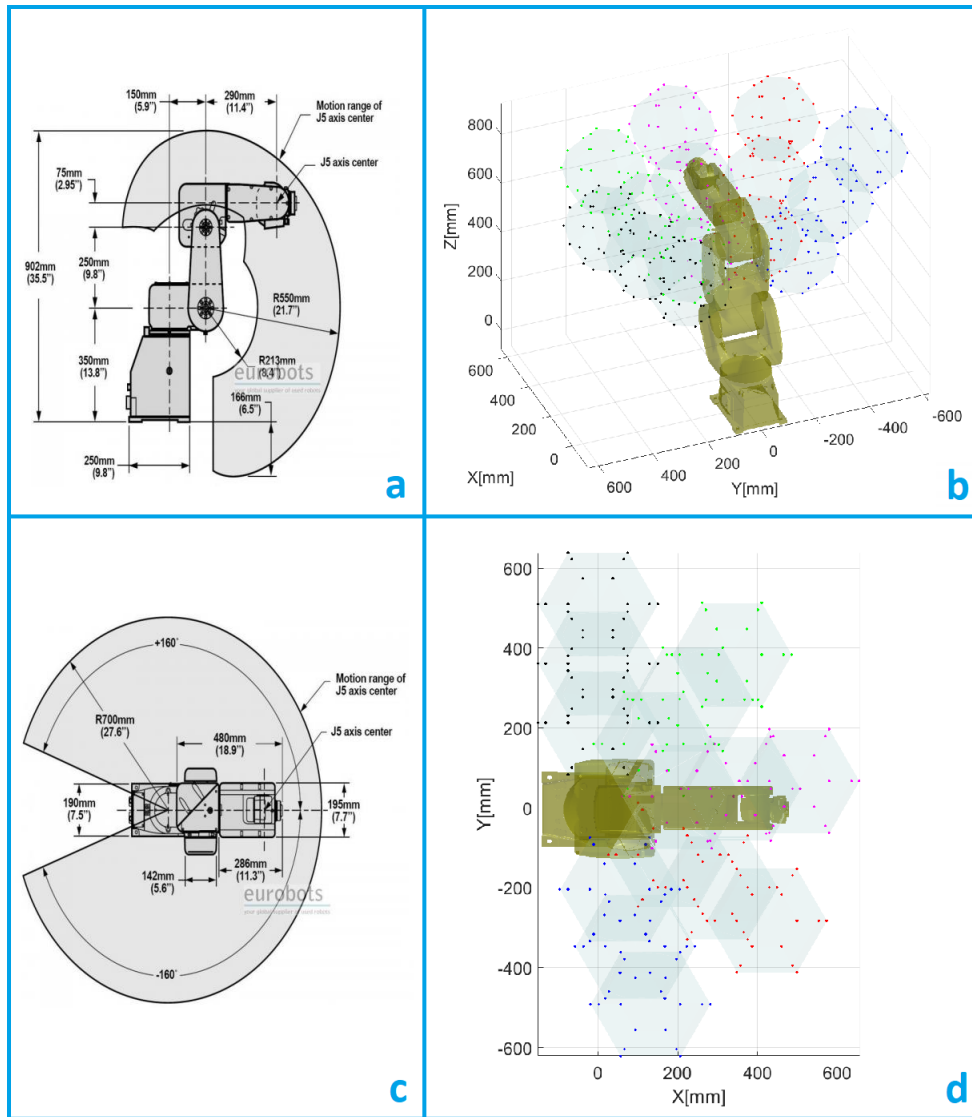


Figura 7.4: Fanuc 200i: (a) Vista lateral; (b) Vista 3D; (c) Vista superior; e (d) Vista superior com SR

Foram escolhidas 4 sub-regiões para gerar diferentes robôs calibrados. Na Figura 7.5 são apresentadas as 4 sub-regiões escolhidas, assim como as medições do LT-PMCLab dentro dessas 4 sub-regiões. Cabe mencionar que em cada SR_{1-4} a origem das coordenadas medidas foi alterada para outra posição, permitindo emular uma situação prática onde a identificação pode ser feita em com 4 posições diferentes do instrumento de medição. Nas sub-regiões definidas foram utilizados 27 pontos medidos em cada sub-região, garantindo uma matriz Jacobiana bem-condicionada [162, 163].

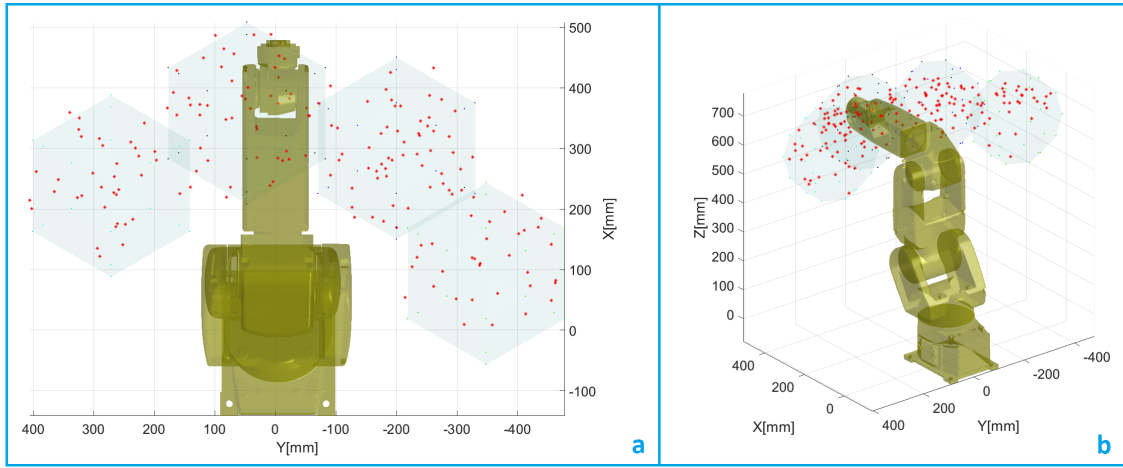


Figura 7.5: Sub-Regiões escolhidas no espaço de trabalho do Fanuc 200i: (a) Vista superior; e (b) Vista 3D

A Tabela 7.4 apresenta os valores identificados com o algoritmo L-M, assim como os valores do Vetor de Erro Médio (VEM), identificando os valores dos parâmetros de erro em 4 posições diferentes.

Tabela 7.4: Modelo de erro identificado para o robô Fanuc 200i

Parameter	SR_1	SR_2	SR_3	SR_4	VEM
δ_{px1} [mm]	-0,38064	-0,42592	0,42361	-0,41935	-0,20057
δ_{alfa1} [°]	-0,07941	-0,12599	-0,16823	0,05222	-0,08035
δ_{Th2} [°]	-0,39387	-0,38550	-0,48544	-0,37675	-0,41039
δ_{px2} [mm]	0,82058	0,77449	1,07256	0,68684	0,83862
δ_{alfa2} [°]	-0,01874	-0,01798	-0,01033	-0,00362	-0,01267
δ_{beta2} [°]	-0,04531	-0,06517	-0,07878	0,01019	-0,04477
δ_{Th3} [°]	0,53987	0,55595	0,49972	0,53477	0,53258
δ_{pz3} [mm]	0,48823	0,43952	0,84577	-0,78223	0,24782
δ_{px3} [mm]	0,24136	0,22624	0,59423	0,29408	0,33898
δ_{alfa3} [°]	0,04591	-0,00277	-0,00728	0,09432	0,03254
δ_{Th4} [°]	-0,39460	-0,38814	-0,40826	-0,41470	-0,40143
δ_{pz4} [mm]	-1,54618	-1,17849	-1,22155	-1,09039	-1,25915
δ_{px4} [mm]	0,01207	0,03254	0,00134	0,00596	0,01298
δ_{alfa4} [°]	-0,03251	0,02993	0,01085	0,00493	0,00330
δ_{Th5} [°]	-0,35775	-1,09654	0,52004	-0,49842	-0,35817
δ_{pz5} [mm]	2,51420	-0,79353	2,27770	-2,46286	0,38388
δ_{px5} [mm]	2,11511	4,93584	-1,30223	2,61990	2,09215
δ_{alfa5} [°]	0,64632	-0,25524	0,54092	-0,65838	0,06840
δ_{pz6} [°]	-1,48600	-0,55260	-0,62769	1,51209	-0,28855
δ_{px6} [mm]	0,02672	0,01815	-0,03213	0,04006	0,01320
δ_{alfa6} [mm]	0,00366	-0,00450	0,01850	0,01564	0,00833
$\delta_{pz-tool}$ [mm]	-1,46962	-0,44952	-0,42740	1,61705	-0,18237
$\ SR_i\ ^*$	4,4530	5,4601	3,5499	4,6542	2,8111

*Norma Euclidiana do vetor de erro $\left(\sqrt{\sum_{k=1}^n |i|^2}\right)$

Para usar o conceito de calibração em sub-regiões proposto nesse trabalho é necessário definir um

volume de avaliação, com o intuito de comparar os modelos calibrados em um volume comum das posições que não foram usadas para calibrar o manipulador. Na Figura 7.6 se apresentam as 53 posições que fazem parte da volume de avaliação:

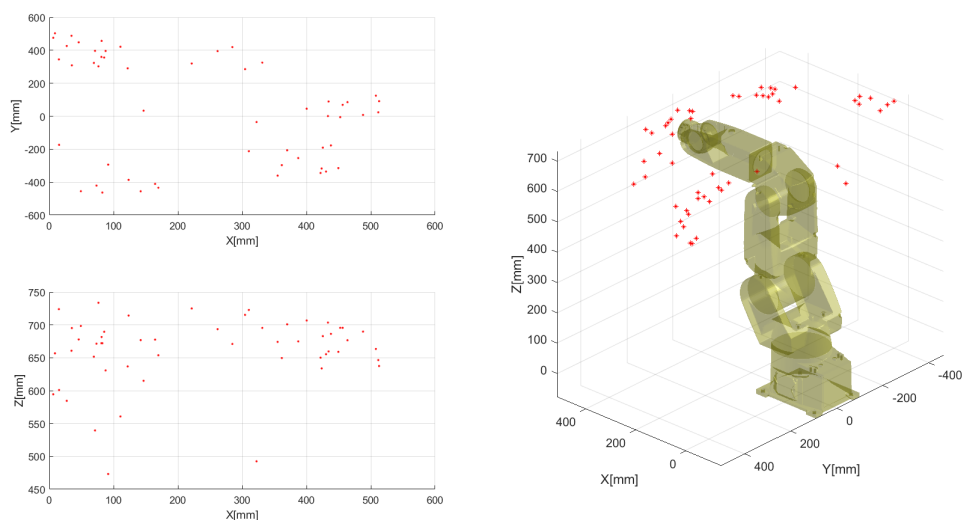


Figura 7.6: Espaço de trabalho para avaliação usando o Fanuc 200i

É importante ressaltar, que em cada uma das 4 sub-regiões escolhidas foram selecionados 27 pontos medidos pelo *Laser-Tracker* do PMCLab, garantindo um número adequado de medições para obter uma solução bem condicionada na etapa de identificação, ou seja, mais de 25 medições em cada sub-regiões como requisito para evitar uma matriz Jacobiana mal-condicionada.

7.6 Resultados no Volume de Avaliação

Para entender melhor os resultados das comparações na avaliação de vários robôs calibrados se apresenta na Tabela 7.5 a descrição proposta dos experimentos efetuados com base nas medições do robô Fanuc 200i:

Tabela 7.5: Modelo de erro identificado para o robô Fanuc 200i

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6
Descrição	Calibrado na SR1 e avaliado na Volume de Avaliação.	Calibrado na SR2 e avaliado na Volume de Avaliação.	Calibrado na SR3 e avaliado na Volume de Avaliação.	Calibrado na SR4 e avaliado na Volume de Avaliação.	Calibração e avaliação usando o VEM.	Calibrado com todos os pontos e avaliado na Volume de Avaliação.

Os primeiros quatro experimentos estão associados às sub-regiões escolhidas, calibrados com os pontos associados a cada sub-regiões e avaliados no volume de avaliação. O quinto experimento foi obtido com os valores do VEM, calibrando só os parâmetros de erro da base na avaliação do volume de avaliação. Finalmente o sexto experimento foi calibrado com todos os pontos disponibilizados pelo PMCLAB e avaliado no volume de avaliação. Seguem os resultados da calibração e avaliação dos seis experimentos descritos.

7.6.1 Avaliação do Experimento 1

A calibração do experimento 1 foi avaliada nas posições do volume de avaliação. Na Tabela 7.6 se apresentam os resultados da calibração das posições medidas dentro da sub-região 1, assim como a avaliação do experimento 1 no volume de avaliação:

Tabela 7.6: Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 1 - Fanuc 200i

Erro	Calibração			Avaliação		
	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.
Antes [mm]	1,5238	9,3887	12,0179	1,7313	9,8966	12,4400
Depois [mm]	0,0660	0,1281	0,2770	0,1298	0,6990	0,8881

O erro médio depois da calibração foi de 0,1281 mm, usando o experimento 1. No volume de avaliação o erro médio foi de 0,6990 mm.

7.6.2 Avaliação do Experimento 2

A calibração do experimento 2 foi avaliada nas posições do volume de avaliação. Na Tabela 7.7 se apresentam os resultados da calibração das posições medidas dentro da sub-região 2, assim como a avaliação do experimento 2 no volume de avaliação:

Tabela 7.7: Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 2 - Fanuc 200i

Erro	Calibração			Avaliação		
	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.
Antes [mm]	1,6198	6,2601	10,4145	0,5173	9,8780	10,3011
Depois [mm]	0,0685	0,1341	0,2820	0,1258	0,6778	0,8431

O erro médio depois da calibração foi de 0,1341 mm, usando o experimento 2. No volume de avaliação o erro médio foi de 0,6778 mm.

7.6.3 Avaliação do Experimento 3

A calibração do experimento 3 foi avaliada nas posições do volume de avaliação. Na Tabela 7.8 se apresentam os resultados da calibração das posições medidas dentro da sub-região 3, assim como a avaliação do experimento 3 no volume de avaliação:

Tabela 7.8: Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 3 - Fanuc 200i

Erro	Calibração			Avaliação		
	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.
Antes [mm]	1,3814	4,8917	8,4628	1,7313	9,8966	12,4400
Depois [mm]	0,0683	0,1563	0,2853	0,2237	1,0669	1,3310

O erro médio depois da calibração foi de 0,1563 mm. No volume de avaliação o erro médio foi de 1,0669 mm, usando o experimento 3.

7.6.4 Avaliação do Experimento 4

A calibração do experimento 4 foi avaliada nas posições do volume de avaliação. Na Tabela 7.9 são apresentados os resultados da calibração das posições medidas dentro da sub-região 4, assim como a avaliação do experimento 4 no volume de avaliação:

Tabela 7.9: Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 4 - Fanuc 200i

Erro	Calibração			Avaliação		
	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.
Antes [mm]	1,0858	7,6885	9,4478	1,7313	9,8966	12,4400
Depois [mm]	0,0777	0,1462	0,2893	0,0511	0,4836	0,5530

O erro médio depois da calibração foi de 0,1462 mm. No volume de avaliação o erro médio foi de 0,4836 mm, usando o experimento 4.

7.6.5 Avaliação do Experimento 5

A calibração do experimento 5 foi avaliada nas posições do volume de avaliação. Na Tabela 7.10 são apresentados os resultados:

Tabela 7.10: Resultados da precisão da avaliação do experimento 5 - Fanuc 200i

Erro	Avaliação		
	Desvio padrão	Erro médio	Erro máx.
Antes [mm]	1,7313	9,8966	12,4400
Depois [mm]	0,1083	0,7094	0,8591

O erro médio usando o experimento 5 foi de 0,7094 mm no volume de avaliação. Cabe enfatizar que foram feitas diversas calibrações nas sub-regiões escolhidas, ou seja, trata-se do modelo médio obtido a partir das quatro sub-regiões descritas.

7.6.6 Avaliação do Experimento 6

Finalmente, a calibração do experimento 6 foi avaliada nas posições do volume de avaliação. Na Tabela 7.11 se apresentam os resultados da calibração das posições medidas pelo *Laser-Tracker*, assim como a avaliação do experimento 6 no volume de avaliação:

Tabela 7.11: Resultados da precisão da calibração e da avaliação do experimento 6 - Fanuc 200i

Erro	Calibração			Avaliação		
	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.	Desvio Padrão	Erro médio	Erro máx.
Antes [mm]	2,5070	6,5726	13,7648	1,7313	9,8966	12,4400
Depois [mm]	0,1567	0,3254	0,8841	0,2628	0,8751	1,2671

Com o experimento 6 o erro médio foi de 0,8751mm no volume de avaliação, já na etapa de calibração o erro médio foi de 0,3254 mm. Cabe mencionar, que o erro médio do experimento 5 na avaliação foi menor do que o do experimento 6, demonstrando a viabilidade do método proposto como alternativa à calibração tradicional de robôs industriais, e possibilitando novas análises dos resultados experimentais com sub-regiões em aplicações específicas.

Capítulo 8

CONCLUSÕES

8.1 Conclusões

Foi apresentada e discutida ao longo do presente documento uma abordagem para calibrar robôs industriais utilizando medições obtidas em vários pequenos volumes dentro do espaço de trabalho do robô, de modo que o sistema de medição foi posicionado em locais diferentes e as medições foram usadas para encontrar estatisticamente um modelo cinemático calibrado que possa atender as necessidades de precisão como se o robô fosse calibrado em um volume maior, permitindo o uso de sistemas de medição com maior precisão limitados a pequenos volumes, como é o caso de sistemas de visão ou sondas de contato. Os procedimentos de calibração do robô ABB IRB-140 foram simulados para isolar os resultados das montagens experimentais de forma a mostrar apenas os efeitos numéricos da abordagem analítica.

A otimização da modelagem dos erros paramétricos dos dois robôs (ABB IRB-140 e Fanuc 200i) foi discutida, mas as técnicas podem ser aplicadas a qualquer tipo de robô. O método de validação do modelo cinemático do robô ABB IRB-140 foi descrito e implementado, garantindo a compatibilidade do modelo cinemático analítico com o modelo cinemático nominal embarcado no controlador do robô (IRC5), resultando em uma diferença máxima de 0,0472 mm, valor associado à resolução do sistema. Os resultados foram obtidos a partir de dados simulados com a inserção de erros aleatórios de medição e erros geométricos de comprimentos, assim como o desalinhamento de juntas conforme consolidado na literatura.

Utilizando a abordagem da medição em sub-regiões, pequenos volumes de medição foram selecionados ao longo de vetores direcionais e os modelos cinemáticos parametrizados (robôs) foram calibrados em cada uma dessas sub-regiões. Os resultados da calibração foram então comparados com a abordagem de calibração tradicional, em que se realizam medições em um grande volume de uma única vez.

Os erros de posicionamento do robô ABB IRB-140 foram avaliados com pontos distribuídos em um grande volume, alcançando uma precisão média do robô de aproximadamente 0,35 mm ao obter medições de apenas 4 sub-regiões diferentes, com o sistema de medição localizado em locais diferentes, e aproximadamente de 0,28 mm quando os mesmos pontos foram medidos a partir de um único local. O método tradicional para calibrar pontos de medição num grande volume a partir de um único local atingiu um erro posicionamento de 0,26 mm.

Quanto aos erros de posicionamento do robô Fanuc 200i foram descritos seis modelos de calibração: quatro associados às sub-regiões escolhidas, um vinculado ao vetor de erro médio e o modelo associado à calibração em todos os pontos. Os modelos descritos foram calibrados e avaliados em uma região de avaliação com pontos diferentes dos utilizados na calibração, com pontos de medição obtidos experimentalmente por um *Laser-Tracker*. A precisão média do robô com uso do vetor de erro médio foi de aproximadamente 0,70 mm, com medições em apenas 4 sub-regiões diferentes. Por outro lado, o método tradicional com pontos de medição num grande volume a partir de um único local teve um erro posicionamento médio de 0,87 mm.

Foram revistos cerca de 100 trabalhos associados com a calibração de robôs industriais, identificando em cada trabalho as quatro etapas básicas dos procedimentos associados à calibração, o que permitiu observar na etapa de medição a necessidade da inclusão de pequenos volumes de medição (sub-regiões).

8.2 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros a serem desenvolvidos que permitam contribuir com a metodologia de calibração baseada em sub-regiões:

- Análise da presença de vários mínimos locais nos algoritmos de mínimos quadrados comumente utilizados na calibração de robôs industriais, pois ainda é uma discussão aberta na etapa de identificação de parâmetros, fornecendo um método adequado para analisar a variação do erro ao longo dos vetores direcionais.
- Gerar um modelo cinemático analítico compatível com as soluções da cinemática inversa nominal do ABB IRB-140 embarcado no controlador IRC5. Isto permitirá gerar nuvens de pontos com compatibilidade com o modelo nominal, considerando que o RobotStudio tem a limitação de ter que se programar a postura do robô manualmente. Em outras palavras, a importação de posturas predefinidas no espaço de trabalho do robô foi possível só para visualização dos pontos, existindo a limitação de se ter de programar a movimentação com um *dataset* definido.
- Uma metodologia para solucionar a cinemática dos robôs industriais comparando as soluções possíveis num controlador industrial, visando gerar *dataset* análogos às soluções proprietárias de forma *off-line* para análise estatística em sub-regiões.
- Analisar e modelar a relação da variação do erro em todo o espaço de trabalho, incluindo o conceito de sub-região e o vetor de direção.
- Atenuar as variações dos mínimos locais nos algoritmos de identificação através sistemas híbridos com algoritmos baseados em inteligência artificial e mínimos quadrados.
- Integração da calibração *Hand-Eye* com o conceito de sub-regiões, permitindo obter soluções de baixo custo e flexíveis que possam ser consideradas em processos das indústrias automotiva e aeronáutica.

- Analisar as métricas de observabilidade que permitam escolher os pontos de medição em sub-regiões, permitindo reduzir o impacto dos erros não modelados.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Al Khawli, M. Anwar, A. Sunda-Meya, and S. Islam, “A calibration method for laser guided robotic manipulation for industrial automation,” in *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2018, pp. 2489–2495.
- [2] J. Zhang, X. Wang, K. Wen, Y. Zhou, Y. Yue, and J. Yang, “A simple and rapid calibration methodology for industrial robot based on geometric constraint and two-step error,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 45, no. 6, pp. 715–721, 2018.
- [3] P. Jha, “Inverse kinematic analysis of robot manipulators,” Ph.D. dissertation, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2015.
- [4] Z. Li, S. Li, and X. Luo, “An overview of calibration technology of industrial robots,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 8, no. 1, pp. 23–36, Jan. 2021.
- [5] Z. Xie, P. Zong, P. Yao, and P. Ren, “Calibration of 6-dof industrial robots based on line structured light,” *Optik*, vol. 183, pp. 1166–1178, 2019.
- [6] H.-N. Nguyen, P.-N. Le, and H.-J. Kang, “A new calibration method for enhancing robot position accuracy by combining a robot model-based identification approach and an artificial neural network-based error compensation technique,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 1, p. 1687814018822935, 2019.
- [7] G. Chen, L. Wang, B. Yuan, and D. Liu, “Configuration optimization for manipulator kinematic calibration based on comprehensive quality index,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50 179–50 197, 2019.
- [8] N. A. Theissen, T. Laspas, and A. Archenti, “Closed-force-loop elastostatic calibration of serial articulated robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 57, pp. 86–91, 2019.
- [9] R. C. Luo, H. Wang, and M.-H. Kuo, “Low cost solution for calibration in absolute accuracy of an industrial robot for icps applications,” in *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. IEEE, 2018, pp. 428–433.
- [10] Z. Wang, Z. Chen, Y. Wang, C. Mao, and Q. Hang, “A robot calibration method based on joint angle division and an artificial neural network,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [11] G. Du and P. Zhang, “Online serial manipulator calibration based on multisensory process via extended kalman and particle filters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 6852–6859, 2014.

- [12] G. Du, H. Shao, Y. Chen, P. Zhang, and X. Liu, "An online method for serial robot self-calibration with cmac and ukf," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 42, pp. 39–48, 2016.
- [13] C. Yu and J. Xi, "Simultaneous and on-line calibration of a robot-based inspecting system," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 49, pp. 349–360, 2018.
- [14] R.-M. A. Nzue, J. F. Brethé, E. Vasselin, and D. Lefebvre, "Comparative analysis of the repeatability performance of a serial and parallel robot," in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2010, pp. 63–68.
- [15] F. Li, Q. Zeng, K. F. Ehmann, J. Cao, and T. Li, "A calibration method for overconstrained spatial translational parallel manipulators," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 57, pp. 241–254, 2019.
- [16] S. He, L. Ma, C. Yan, C.-H. Lee, and P. Hu, "Multiple location constraints based industrial robot kinematic parameter calibration and accuracy assessment," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 5-8, pp. 1037–1050, 2019.
- [17] A. Brau-Avila, R. Acero, J. Santolaria, M. Valenzuela-Galvan, and O. Icasio-Hernández, "Kinematic parameter identification procedure of an articulated arm coordinate measuring machine based on a metrology platform," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 1-4, pp. 1027–1040, Sep. 2019.
- [18] E. Kiraci, A. Palit, M. Donnelly, A. Attridge, and M. A. Williams, "Comparison of in-line and off-line measurement systems using a calibrated industry representative artefact for automotive dimensional inspection," *Measurement*, vol. 163, p. 108027, 2020.
- [19] R. Mohanraj and S. Elangovan, "Incremental sheet metal forming of ti-6al-4v alloy for aerospace application," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 56–64, 2019.
- [20] R. Bernhardt and S. Albright, *Robot calibration*. Springer Science & Business Media, 1993.
- [21] K. Kamali and I. A. Bonev, "Optimal Experiment Design for Elasto-Geometrical Calibration of Industrial Robots," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 6, pp. 2733–2744, Dec. 2019.
- [22] R. Wang, A. Wu, X. Chen, and J. Wang, "A point and distance constraint based 6R robot calibration method through machine vision," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 65, p. 101959, Oct. 2020.
- [23] B. Mooring, Z. Roth, and D. Morris, *Fundamentals of manipulator calibration*. Wiley Interscience, 1991.
- [24] D. Zhao, C. Dong, H. Guo, and W. Tian, "Kinematic calibration based on the multicollinearity diagnosis of a 6-dof polishing hybrid robot using a laser tracker," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, 2018.

- [25] G. Chen, L. Kong, Q. Li, and H. Wang, “A simple two-step geometric approach for the kinematic calibration of the 3-prs parallel manipulator,” *Robotica*, vol. 37, no. 5, pp. 837–850, 2019.
- [26] X. Chen, Q. Zhang, and Y. Sun, “Non-kinematic calibration of industrial robots using a rigid–flexible coupling error model and a full pose measurement method,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 57, pp. 46–58, 2019.
- [27] E. Shamma and S. Najjar, “Kinematic calibration of serial manipulators using bayesian inference,” *Robotica*, vol. 36, no. 5, pp. 738–766, 2018.
- [28] L. Du, T. Zhang, and X. Dai, “Compliance error calibration for robot based on statistical properties of single joint,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, no. 4, pp. 1861–1868, 2019.
- [29] L. Araújo and K. Gomes, “Validação analítica quantitativa: Comparação entre os parâmetros de desempenho da anvisa e do inmetro,” in *8va mostra de produção científica da pós-graduação lato sensu da PUC Goiás*. PUC Goiás, 2013.
- [30] ISO 9283, “Manipulating industrial robots - performance criteria and related test methods,” 1998.
- [31] Y. Guo, B. Song, X. Tang, X. Zhou, Y. Xie, and J. Jin, “Calibration for kinematic parameters of industrial robot by a laser displacement sensor,” in *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. IEEE, 2018, pp. 1829–1833.
- [32] Z. Roth, B. Mooring, and B. Ravani, “An overview of robot calibration,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 377–385, 1987.
- [33] W. Xu, L. Dongsheng, and W. Mingming, “Complete calibration of industrial robot with limited parameters and neural network,” in *2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*. IEEE, 2016, pp. 103–108.
- [34] B. Mei, F. Xie, X.-J. Liu, and H. Li, “Calibration of a 6-dof industrial robot considering the actual mechanical structures and cnc system,” in *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. IEEE, 2017, pp. 6–10.
- [35] L. Kato, T. Pinto, H. Simas, and D. Martins, “Simulation of a serial robot calibration through screw theory,” in *International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics*. Springer, 2017, pp. 295–304.
- [36] Y. Hu, F. Gao, X. Zhao, B. Wei, D. Zhao, and Y. Zhao, “Kinematic calibration of a 6-dof parallel manipulator based on identifiable parameters separation (ips),” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 126, pp. 61–78, 2018.
- [37] X. Wen, S. He, G. Qiao, D. Wang, A. Song, C. Kang, and Z. Lv, “Uncertainty estimation of robot geometric parameters and end-effector position based on new generation gps,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [38] A. Fillion, A. Joubair, A. S. Tahan, and I. A. Bonev, “Robot calibration using a portable photogrammetry system,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 49, pp. 77–87, 2018.

- [39] X. Shan and G. Cheng, "Structural error identification and kinematic accuracy analysis of a 2 (3plus+) parallel manipulator," *Measurement*, vol. 140, pp. 22–28, 2019.
- [40] T. Sun, B. Lian, J. Zhang, and Y. Song, "Kinematic calibration of a 2-dof over-constrained parallel mechanism using real inverse kinematics," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 67 752–67 761, 2018.
- [41] S. Gharaaty, T. Shu, A. Joubair, W. F. Xie, and I. A. Bonev, "Online pose correction of an industrial robot using an optical coordinate measure machine system," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 4, p. 1729881418787915, 2018.
- [42] J. S. Toquica, S. živanović, A. J. Alvares, and R. Bonnard, "A step-nc compliant robotic machining platform for advanced manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 95, no. 9, pp. 3839–3854, Apr 2018.
- [43] J. Wollnack, "Precision increase of industrial robots," in *Second Asian Symposium Industrial Automation and Robotics*, vol. 17, no. 18.05, 2001.
- [44] S. Huang, "Kinematic calibration for da vinci surgical robot," Master's thesis, Case Western Reserve University, 2019.
- [45] G. Li, F. Zhang, Y. Fu, and S. Wang, "Kinematic calibration of serial robot using dual quaternions," *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, vol. 46, no. 2, pp. 247–258, 2019.
- [46] B. Niu, "Enhanced robot calibration by minimization of tcp drifts during reorientation," in *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. IEEE, 2018, pp. 69–74.
- [47] A. Elatta, L. P. Gen, F. L. Zhi, Y. Daoyuan, and L. Fei, "An overview of robot calibration," *Information Technology Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 74–78, 2004.
- [48] G. Zhao, P. Zhang, G. Ma, and W. Xiao, "System identification of the nonlinear residual errors of an industrial robot using massive measurements," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 59, pp. 104–114, 2019.
- [49] Y. Cai, P. Yuan, and D. Chen, "A flexible calibration method connecting the joint space and the working space of industrial robots," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 45, no. 3, pp. 407–415, 2018.
- [50] T. Cvitanic, V. Nguyen, and S. N. Melkote, "Pose optimization in robotic machining using static and dynamic stiffness models," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 66, p. 101992, Dec. 2020.
- [51] P. Xu, X. Yao, S. Liu, H. Wang, K. Liu, A. S. Kumar, W. F. Lu, and G. Bi, "Stiffness modeling of an industrial robot with a gravity compensator considering link weights," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 161, p. 104331, Jul. 2021.

- [52] J. Lin, C. Ye, J. Yang, H. Zhao, H. Ding, and M. Luo, “Contour error-based optimization of the end-effector pose of a 6 degree-of-freedom serial robot in milling operation,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 73, p. 102257, Feb. 2022.
- [53] T. Cvitanic and S. N. Melkote, “A new method for closed-loop stability prediction in industrial robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 73, p. 102218, Feb. 2022.
- [54] Y. Han, J. Wu, C. Liu, and Z. Xiong, “Static model analysis and identification for serial articulated manipulators,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 57, pp. 155–165, Jun. 2019.
- [55] V. Romano, *Robótica industrial: aplicação na indústria de manufaturatura e de processos*. Edgard Blucher, 2002.
- [56] Y. Zhang, Y. Zhao, G. Li, and Y. Bin, “Robotic manipulator arms positioning error measurement using image registration,” in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, 2018, pp. 813–817.
- [57] M. PiAczek and Ł. Piszczek, “Testing of an industrial robot’s accuracy and repeatability in off and online environment,” *Eksploatacja i Niezawodność*, vol. 20, no. 3, 2018.
- [58] M. Slamani, A. Nubiola, and I. Bonev, “Assessment of the positioning performance of an industrial robot,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 39, no. 1, pp. 57–68, 2012.
- [59] E. Filipe, O. Pellegrino, A. C. Baratto, S. P. de Oliveira, and V. M. L. Mendoza, *Vocabulário Internacional de Metrologia-Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.
- [60] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [61] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons, 2006.
- [62] K. Schröer, S. L. Albright, and M. Grethlein, “Complete, minimal and model-continuous kinematic models for robot calibration,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 73–85, 1997.
- [63] Chen-Gang, Li-Tong, Chu-Ming, J.-Q. Xuan, and S.-H. Xu, “Review on kinematics calibration technology of serial robots,” *International journal of precision engineering and manufacturing*, vol. 15, no. 8, pp. 1759–1774, 2014.
- [64] J. M. S. Motta, “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 Sciences and Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 200–204, 2005.
- [65] H. W. Stone, “Kinematic modeling, identification, and control of robotic manipulators,” Ph.D. dissertation, Carnegie Mellon University, 1986.

- [66] Y. Cho, H. M. Do, and J. Cheong, “kinematic calibration method for robot manipulators with joint compliance using circular point analysis,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 60, pp. 63–76, Dec. 2019.
- [67] R. Zhao, Z. Shi, Y. Guan, Z. Shao, Q. Zhang, and G. Wang, “Inverse kinematic solution of 6r robot manipulators based on screw theory and the paden–kahan subproblem,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 6, p. 1729881418818297, 2018.
- [68] C. Shen, Y. Chen, B. Chen, and Y. Qiao, “A novel robot kinematic calibration method based on common perpendicular line model,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 45, no. 6, pp. 766–775, 2018.
- [69] G. Li, F. Zhang, Y. Fu, and S. Wang, “Joint stiffness identification and deformation compensation of serial robots based on dual quaternion algebra,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 1, p. 65, 2019.
- [70] I.-C. Ha, “Kinematic parameter calibration method for industrial robot manipulator using the relative position,” *Journal of mechanical science and technology*, vol. 22, no. 6, p. 1084, 2008.
- [71] J. M. Hollerbach and C. W. Wampler, “The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods,” *The international journal of robotics research*, vol. 15, no. 6, pp. 573–591, 1996.
- [72] J. Santolaria, J. Conte, and M. Ginés, “Laser tracker-based kinematic parameter calibration of industrial robots by improved cpa method and active retroreflector,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, no. 9-12, pp. 2087–2106, 2013.
- [73] Y. Liu and N. Xi, “Low-cost and automated calibration method for joint offset of industrial robot using single-point constraint,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 38, no. 6, pp. 577–584, 2011.
- [74] S. Qian, K. Bao, B. Zi, and N. Wang, “Kinematic calibration of a cable-driven parallel robot for 3d printing,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2898, 2018.
- [75] J. M. S. Motta, C. H. Llanos-Quintero, and R. Coral Sampaio, “Inverse kinematics and model calibration optimization of a five-dof robot for repairing the surface profiles of hydraulic turbine blades,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 3, p. 114, 2016.
- [76] T. Huang, D. Zhao, F. Yin, W. Tian, and D. G. Chetwynd, “Kinematic calibration of a 6-dof hybrid robot by considering multicollinearity in the identification jacobian,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 131, pp. 371–384, 2019.
- [77] J. M. S. Motta and R. S. McMaster, “Modeling, optimizing and simulating robot calibration with accuracy improvement,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, vol. 21, no. 3, pp. 384–401, 1999.
- [78] Y. Gan, X. Dai, and D. Li, “Off-line programming techniques for multirobot cooperation system,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 7, p. 282, 2013.

- [79] A. J. Alvares, J. S. Toquica, E. J. Lima, and M. H. Bomfim, "Retrofitting of the irb6-s2 robotic manipulator using computer numerical control-based controllers," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 3, p. 149, 2018.
- [80] J. S. Toquica, D. Benavides, and J. M. Motta, "Web compliant open architecture for teleoperation of industrial robots," in *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE2019)*. IEEE, 2019, pp. 1408–1414.
- [81] W. Zhenhua, X. Hui, C. Guodong, S. Rongchuan, and L. Sun, "A distance error based industrial robot kinematic calibration method," *Industrial Robot: An International Journal*, 2014.
- [82] M. I. Lourakis *et al.*, "A brief description of the levenberg-marquardt algorithm implemented by levmar," *Foundation of Research and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2005.
- [83] M. Lampton, "Damping–undamping strategies for the levenberg–marquardt nonlinear least-squares method," *Computers in Physics*, vol. 11, no. 1, pp. 110–115, 1997.
- [84] Y. Chen and F. Dong, "Robot machining: recent development and future research issues," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–9, 2013.
- [85] Z. Pan and H. Zhang, "Improving robotic machining accuracy by real-time compensation," in *ICCAS-SICE, 2009*. IEEE, 2009, pp. 4289–4294.
- [86] L. S. Ginani and J. M. S. Motta, "Theoretical and practical aspects of robot calibration with experimental verification," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 15–21, 2011.
- [87] G. Du and P. Zhang, "Imu-based online kinematic calibration of robot manipulator," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, 2013.
- [88] Y. Meng and H. Zhuang, "Autonomous robot calibration using vision technology," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 23, no. 4, pp. 436–446, 2007.
- [89] C. S. Gatla, R. Lumia, J. Wood, and G. Starr, "An automated method to calibrate industrial robots using a virtual closed kinematic chain," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 6, pp. 1105–1116, 2007.
- [90] I.-W. Park, B.-J. Lee, S.-H. Cho, Y.-D. Hong, and J.-H. Kim, "Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics," *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 6, p. 1059, 2012.
- [91] G. Du and P. Zhang, "Online robot calibration based on vision measurement," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 6, pp. 484–492, 2013.
- [92] B. A. Campos and J. M. S. Motta, "Online measuring of robot positions using inertial measurement units, sensor fusion and artificial intelligence," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 5678–5689, 2021.

- [93] A. Nubiola, M. Slamani, A. Joubair, and I. A. Bonev, "Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical cmm and a laser tracker," *Robotica*, vol. 32, no. 3, pp. 447–466, 2014.
- [94] A. Nubiola and I. A. Bonev, "Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar," *Precision Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 472–480, 2014.
- [95] S. Joo, S. M. Lee, S. Kang, D. Hyun, I. Kim, K. Jeong, and J. Lee, "Kinematic calibration of robot arm testbed for decommissioning application," in *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, 2018.
- [96] T. Messay-Kebede, G. Sutton, and O. Djaneye-Boundjou, "Geometry based self kinematic calibration method for industrial robots," in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2018, pp. 1–9.
- [97] T. Messay, R. Ordóñez, and E. Marcil, "Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 37, pp. 33–48, 2016.
- [98] Y. Sun and J. M. Hollerbach, "Observability index selection for robot calibration," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2008, pp. 831–836.
- [99] A. Joubair, A. Nubiola, and I. Bonev, "Calibration efficiency analysis based on five observability indices and two calibration models for a six-axis industrial robot," *SAE International Journal of Aerospace*, vol. 6, no. 2013-01-2117, pp. 161–168, 2013.
- [100] B. Liang, Y. Cheng, X. Zhu, H. Liu, and X. Wang, "Calibration of ur5 manipulator based on kinematic models," in *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. IEEE, 2018, pp. 3552–3557.
- [101] M. A. Meggiolaro, G. Scriffignano, and S. Dubowsky, "Manipulator calibration using a single endpoint contact constraint," in *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference, Baltimore, USA*, 2000.
- [102] A. S. Gubankov and D. A. Yukhimets, "Identification method of kinematic parameters of multi-link industrial manipulator," in *2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC)*. IEEE, 2018, pp. 327–331.
- [103] Z. Wang, R. Liu, T. Sparks, X. Chen, and F. Liou, "Industrial robot trajectory accuracy evaluation maps for hybrid manufacturing process based on joint angle error analysis," *Advances in Robotics & Automation*, vol. 7, no. 1, pp. 1–12, 2018.
- [104] M. Gaudreault, A. Joubair, and I. Bonev, "Self-calibration of an industrial robot using a novel affordable 3d measuring device," *Sensors*, vol. 18, no. 10, p. 3380, 2018.
- [105] M. A. Meggiolaro, S. Dubowsky, and C. Mavroidis, "Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 4, pp. 415–427, 2005.

- [106] L. Lattanzi, C. Cristalli, D. Massa, S. Boria, P. Lépine, and M. Pellicciari, “Geometrical calibration of a 6-axis robotic arm for high accuracy manufacturing task,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 111, no. 7-8, pp. 1813–1829, Dec. 2020.
- [107] G. Du, Y. Liang, C. Li, P. X. Liu, and D. Li, “Online Robot Kinematic Calibration Using Hybrid Filter With Multiple Sensors,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 9, pp. 7092–7107, Sep. 2020.
- [108] Y. Liu, Y. Li, Z. Zhuang, and T. Song, “Improvement of Robot Accuracy with an Optical Tracking System,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6341, Nov. 2020.
- [109] P. Yang, Z. Guo, and Y. Kong, “Plane kinematic calibration method for industrial robot based on dynamic measurement of double ball bar,” *Precision Engineering*, vol. 62, pp. 265–272, Mar. 2020.
- [110] Z. Jiang, M. Huang, X. Tang, B. Song, and Y. Guo, “Elasto-geometrical calibration of six-DOF serial robots using multiple identification models,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 157, p. 104211, Mar. 2021.
- [111] Z. Jiang, M. Huang, X. Tang, and Y. Guo, “A new calibration method for joint-dependent geometric errors of industrial robot based on multiple identification spaces,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 71, p. 102175, Oct. 2021.
- [112] P. Huang, H.-Z. Huang, Y.-F. Li, and H. Li, “Positioning accuracy reliability analysis of industrial robots based on differential kinematics and saddlepoint approximation,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 162, p. 104367, Aug. 2021.
- [113] B. Gao, Y. Liu, N. Xi, and Y. Shen, “Developing an efficient calibration system for joint offset of industrial robots,” *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, 2014.
- [114] E. Boldsai Khan, “Measuring and Estimating Rotary Joint Axes of an Articulated Robot,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 10, pp. 8279–8287, Oct. 2020.
- [115] T. Sun, B. Lian, S. Yang, and Y. Song, “Kinematic Calibration of Serial and Parallel Robots Based on Finite and Instantaneous Screw Theory,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 3, pp. 816–834, Jun. 2020.
- [116] H. Chanal, J. B. Guyon, A. Koessler, Q. Dechambre, B. Boudon, B. Blaysat, and N. Bouton, “Geometrical defect identification of a SCARA robot from a vector modeling of kinematic joints invariants,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 162, p. 104339, Aug. 2021.
- [117] X. Yang, L. Wu, J. Li, and K. Chen, “A minimal kinematic model for serial robot calibration using poe formula,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 3, pp. 326–334, 2014.
- [118] N. Van Toan and P. B. Khoi, “A svd-least-square algorithm for manipulator kinematic calibration based on the product of exponentials formula,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 11, pp. 5401–5409, 2018.
- [119] M. Švaco, B. Šekoranja, F. Šuligoj, and B. Jerbić, “Calibration of an industrial robot using a stereo vision system,” *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 459–463, 2014.

- [120] G. Gao, H. Zhang, H. San, X. Wu, and W. Wang, "Modeling and error compensation of robotic articulated arm coordinate measuring machines using bp neural network," *Complexity*, vol. 2017, 2017.
- [121] A. Nicolescu and C. Cristoiu, "Status check and calibration method for robot abb irb 140," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 444, no. 5. IOP Publishing, 2018, p. 052022.
- [122] C.-K. Lan, C.-Y. Wu, C.-W. Chang, H.-W. Lee, and C.-H. Liu, "Novel joint angle measurement and calibration system for selective compliance assembly robot arm," *Sensors and Materials*, vol. 30, no. 11, pp. 2615–2626, 2018.
- [123] T. A. Khaled, O. Akhrif, and I. A. Bonev, "Dynamic Path Correction of an Industrial Robot Using a Distance Sensor and an ADRC Controller," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 3, pp. 1646–1656, Jun. 2021.
- [124] Y. Guo, B. Song, X. Tang, X. Zhou, and Z. Jiang, "A calibration method of non-contact R-test for error measurement of industrial robots," *Measurement*, vol. 173, p. 108365, Mar. 2021.
- [125] A. Alamdar, P. Samandi, S. Hanifeh, P. Kheradmand, A. Mirbagheri, F. Farahmand, and S. Sarkar, "Investigation of a Hybrid Kinematic Calibration Method for the "Sina" Surgical Robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5276–5282, Oct. 2020.
- [126] T. Sun, C. Liu, B. Lian, P. Wang, and Y. Song, "Calibration for Precision Kinematic Control of an Articulated Serial Robot," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 7, pp. 6000–6009, Jul. 2021.
- [127] G. Luo, L. Zou, Z. Wang, C. Lv, J. Ou, and Y. Huang, "A novel kinematic parameters calibration method for industrial robot based on Levenberg-Marquardt and Differential Evolution hybrid algorithm," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 71, p. 102165, Oct. 2021.
- [128] C. Ruan, X. Gu, Y. Li, G. Zhang, W. Wang, and Z. Hou, "Base frame calibration for multi-robot cooperative grinding station by binocular vision," in *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. IEEE, 2017, pp. 115–120.
- [129] G. Wang, X. Liu, and S. Han, "A method of robot base frame calibration by using dual quaternion algebra," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 74 865–74 873, 2018.
- [130] C. Deniz and M. Cakir, "A solution to the hand-eye calibration in the manner of the absolute orientation problem," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 64–77, 2017.
- [131] I. Enebuse, M. Foo, B. S. K. K. Ibrahim, H. Ahmed, F. Supmak, and O. S. Eyobu, "A comparative review of hand-eye calibration techniques for vision guided robots," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 113 143–113 155, 2021.
- [132] J. Miseikis, K. Glette, O. J. Elle, and J. Torresen, "Automatic calibration of a robot manipulator and multi 3d camera system," in *System Integration (SII), 2016 IEEE/SICE International Symposium on*. IEEE, 2016, pp. 735–741.

- [133] X. Zhang, Y. Song, Y. Yang, and H. Pan, "Stereo vision based autonomous robot calibration," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 93, pp. 43–51, 2017.
- [134] W. Li, M. Dong, N. Lu, X. Lou, and P. Sun, "Simultaneous robot–world and hand–eye calibration without a calibration object," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3949, 2018.
- [135] K. Pachtrachai, F. Vasconcelos, F. Chadebecq, M. Allan, S. Hailes, V. Pawar, and D. Stoyanov, "Adjoint transformation algorithm for hand–eye calibration with applications in robotic assisted surgery," *Annals of biomedical engineering*, vol. 46, no. 10, pp. 1606–1620, 2018.
- [136] Y. Zhang, X. Liu, H. Chen, Z. Cai, Q. Tang, X. Peng, M. Liu, and Q. Li, "An accurate hand-eye calibration algorithm with global optimization," in *Sixth International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2018)*, vol. 10827. International Society for Optics and Photonics, 2018, p. 108270Z.
- [137] R. Y. Tsai and R. K. Lenz, "A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration," *IEEE Transactions on robotics and automation*, vol. 5, no. 3, pp. 345–358, 1989.
- [138] A. A. Hayat, R. A. Bobby, and S. K. Saha, "A geometric approach for kinematic identification of an industrial robot using a monocular camera," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 57, pp. 329–346, Jun. 2019.
- [139] I. Ali, O. Suominen, A. Gotchev, and E. Ruiz Morales, "Methods for Simultaneous Robot-World-Hand-Eye Calibration: A Comparative Study," *Sensors*, vol. 19, no. 12, p. 2837, jun 2019.
- [140] K. Pachtrachai, F. Vasconcelos, G. Dwyer, S. Hailes, and D. Stoyanov, "Hand-Eye Calibration With a Remote Centre of Motion," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 3121–3128, Oct. 2019.
- [141] K. Koide and E. Menegatti, "General hand–eye calibration based on reprojection error minimization," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1021–1028, 2019.
- [142] S. Yin, Y. Ren, J. Zhu, S. Yang, and S. Ye, "A vision-based self-calibration method for robotic visual inspection systems," *Sensors*, vol. 13, no. 12, pp. 16 565–16 582, 2013.
- [143] H. Cheng, Z. Zhang, and W. Li, "Efficient hand eye calibration method for a delta robot pick-and-place system," in *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. IEEE, 2015, pp. 175–180.
- [144] S. J. Prince, *Computer vision: models, learning, and inference*. Cambridge University Press, 2012.
- [145] Z. Fu, J. Pan, E. Spyrakos-Papastavridis, X. Chen, and M. Li, "A Dual Quaternion-Based Approach for Coordinate Calibration of Dual Robots in Collaborative Motion," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4086–4093, Jul. 2020.
- [146] M. Franaszek, G. S. Cheok, and J. A. Marvel, "Comparative Study of Two Pose Measuring Systems Used to Reduce Robot Localization Error," *Sensors*, vol. 20, no. 5, p. 1305, Feb. 2020.

- [147] S. Qiu, M. Wang, and M. R. Kermani, "A Modern Solution for an Old Calibration Problem," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 28–35, May 2021.
- [148] Y. Zou, J. Chen, and X. Wei, "A Calibration Optimization Method for a Welding Robot Laser Vision System Based on Generative Adversarial Network," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–13, 2021.
- [149] Q. Wu, X. Qin, Y. Li, C. Liang, and Z. Hu, "Automatic calibration of work coordinates for robotic wire and arc additive re-manufacturing with a single camera," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, no. 9-10, pp. 2577–2589, Jun. 2021.
- [150] R. A. Boby, "Kinematic Identification of Industrial Robot using End-effector Mounted Monocular Camera bypassing Measurement of 3D Pose," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. 1–12, 2021.
- [151] P. Bai, J. Mei, T. Huang, and D. G. Chetwynd, "Kinematic calibration of delta robot using distance measurements," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 230, no. 3, pp. 414–424, 2016.
- [152] B. Zi and S. Qian, *Design, analysis and control of cable-suspended parallel robots and its applications*. Springer, 2017.
- [153] J. Ding, C. Wang, and H. Wu, "Accuracy analysis of a parallel positioning mechanism with actuation redundancy," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 403–412, 2019.
- [154] Y. Patel and P. George, "Parallel manipulators applications—a survey," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 03, p. 57, 2012.
- [155] G. Wu and G. Shi, "Experimental statics calibration of a multi-constraint parallel continuum robot," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 136, pp. 72–85, 2019.
- [156] U. Schneider, M. Drust, M. Ansaloni, C. Lehmann, M. Pellicciari, F. Leali, J. W. Gunnink, and A. Verl, "Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, no. 1, pp. 3–15, 2016.
- [157] Z. Wei, L. Wenhe, and T. Wei, "Theory and experiment of industrial robot accuracy compensation method based on spatial interpolation," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 49, no. 3, pp. 42–48, 2013.
- [158] W. Tian, D. Mei, P. Li, Y. Zeng, P. Hong, and W. Zhou, "Determination of optimal samples for robot calibration based on error similarity," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 28, no. 3, pp. 946–953, 2015.
- [159] Y. Zeng, W. Tian, and W. Liao, "Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 42, pp. 113–120, 2016.

- [160] Y. Zeng, W. Tian, D. Li, X. He, and W. Liao, “An error-similarity-based robot positional accuracy improvement method for a robotic drilling and riveting system,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, no. 9-12, pp. 2745–2755, 2017.
- [161] J. S. Toquica and J. M. S. Motta, “A methodology for industrial robot calibration based on measurement sub-regions,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 1, pp. 1199–1216, 2022.
- [162] H. Zhuang and Z. S. Roth, “Robot calibration using the cpc error model,” *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 9, no. 3, pp. 227–237, 1992.
- [163] J. M. S. Motta, G. C. De Carvalho, and R. McMaster, “Robot calibration using a 3d vision-based measurement system with a single camera,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 17, no. 6, pp. 487–497, 2001.
- [164] J. Dorador and R. I. Young, “Application of ideo, ideo3 and uml methodologies in the creation of information models,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 13, no. 5, pp. 430–445, 2000.
- [165] G. Beliakov, H. B. Sola, and T. C. Sánchez, *A practical guide to averaging functions*. Springer, 2016.
- [166] M. Grabisch, J.-L. Marichal, R. Mesiar, and E. Pap, *Aggregation functions*. Cambridge University Press, 2009, vol. 127.
- [167] G. Beliakov, T. Calvo, and S. James, “On penalty-based aggregation functions and consensus,” in *Consensual processes*. Springer, 2011, pp. 23–40.
- [168] O. Chisini, “Sul concetto di media,” *Periodico di matematiche*, vol. 4, no. 9, pp. 106–116, 1929.
- [169] A. K. Bhattacharjee and R. Shyamasundar, “Activity diagrams: A formal framework to model business processes and code generation,” *J. Object Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 189–220, 2009.
- [170] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*, ser. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London, 2008.
- [171] J. Denavit and R. S. Hartenberg, “A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 77, no. 1, pp. 215–221, 1955.
- [172] J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, ser. Addison-Wesley series in electrical and computer engineering: control engineering. Pearson/Prentice Hall, 2005.
- [173] A. Robotics, *Product specification. Articulated robot. 3HAC 9041-1*, 6th ed., ABB Corporation, Vasteras, Sweden, 2004.
- [174] R. N. Jazar, *Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control*. Springer Science & Business Media, 2010.

- [175] M. Baquero and R. Ramirez, “Kinematics, dynamics and evaluation of energy consumption for abb irb-140 serial robots in the tracking of a path,” in *International Congress of Engineering Mechatronics and Automation*. CIIMA, 2013, pp. 23–33.
- [176] T. J. Carter, “The modeling of a six degree-of-freedom industrial robot for the purpose of efficient path planning,” Master’s thesis, The Pennsylvania State University, 2009.
- [177] A. Djuric and R. Urbanic, “Utilizing the functional work space evaluation tool for assessing a system design and reconfiguration alternatives,” *Robotic Systems-Applications, Control and Programming*, pp. 361–368, 2012.
- [178] M. Almaged, “Forward and inverse kinematic analysis and validation of the abb irb 140 industrial robot,” *International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering (IJEMME)*, vol. 7, no. 2, pp. 1383–1401, 2017.
- [179] S. Kucuk and Z. Bingul, “Robot kinematics: Forward and inverse kinematics,” in *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*. IntechOpen, 2006.
- [180] S. Tejomurtula and S. Kak, “Inverse kinematics in robotics using neural networks,” *Information Sciences*, vol. 116, no. 2-4, pp. 147–164, 1999.
- [181] A. Khatamian, “Solving kinematics problems of a 6-dof robot manipulator,” in *Proceedings of the International Conference on Scientific Computing (CSC)*. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer, 2015, pp. 228–233.
- [182] M. E. Kütük, M. T. Daş, and L. C. Dülger, “Forward and inverse kinematics analysis of denso robot,” in *Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine Science*, 2017, pp. 71–78.
- [183] ABB Robotics, *Operating manual IRC5 with FlexPendant*, 9th ed., ABB Corporation, Vasteras, Sweden, 2018.
- [184] M. J. D. Hayes and P. L. O’Leary, “Kinematic calibration procedure for serial robots with six revolute axes,” in *CSME Forum*, 2001.
- [185] H. L. Rietz, *Mathematical Statistics*. Mathematical Association of America, 2013.
- [186] Fanuc America Corporation, *LR Mate 200i Datasheet*, Fanuc Robotics, Michigan, USA, 1999.

APÊNDICE

A. PUBLICAÇÕES

Tabela A.1: Artigos publicados pelo autor com relação direta ou indireta a esta pesquisa

	Titulo	Revista	Ano	JCR
1	An Analytical and a Deep Learning Model for Solving the Inverse Kinematic Problem of an Industrial Parallel Robot	CIE Journal - Elsevier	2019	7,180
2	A Methodology for Industrial Robot Calibration Based on Measurement Sub-Regions	JAMT Journal - Springer	2021	3,563
	Titulo	Conferência	Ano	Organizador
3	A Proposal to Solve the Inverse Kinematics Problem of A Parallel Robot Configuration with Neural Networks	CIE48 - Auckland, New Zealand.	2018	CIE
4	Web Compliant Open Architecture for Teleoperation of Industrial Robots	CASE2019 - Vancouver, Canada	2019	IEEE