

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

RAQUEL DE ARAÚJO NUNES

CALIBRAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE STEWART UTILIZANDO UMA  
ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA E UM SISTEMA DE MEDIÇÃO INDOOR-GPS

Joinville

2017

RAQUEL DE ARAÚJO NUNES

CALIBRAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE STEWART UTILIZANDO UMA  
ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA E UM SISTEMA DE MEDIÇÃO INDOOR-GPS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Campos  
Porath

Joinville

2017

RAQUEL DE ARAÚJO NUNES

CALIBRAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE STEWART UTILIZANDO UMA  
ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA E UM SISTEMA DE MEDIÇÃO INDOOR-GPS

Este Trabalho foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 23 de Novembro de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Maurício de Campos Porath  
Presidente/Orientador

---

Profa. Dra. Sueli Fischer Beckert  
Membro

---

Prof. Dr. Lucas Weihmann  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador, Maurício de Campos Porath, pela oportunidade, orientação, paciência, confiança e por todo o aprendizado nos dois anos de convívio no Laboratório de Geodésia Industrial.

Aos meus pais, Luiz e Maria de Fátima, que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas, e no suporte durante toda a minha vida e principalmente ao longo da graduação. Amo muito vocês.

Ao meu namorado, Leonardo, pela paciência, apoio e companheirismo, durante essa jornada, e principalmente por ser meu melhor conselheiro. Amo você.

Ao meu irmão caçula, Eudes, por nunca ter me negado ajuda. Muito obrigada pelo companheirismo.

Aos meus amigos da faculdade, que estudaram, sofreram e lutaram durante toda essa caminhada no curso. Em especial, Adriano, André, Bryan, Daniel, Evelyn, Franciele, Glauber, Lucas, Robson, Thiago, Sthefany. E claro, aos meus amigos de longa data, Arihé, Camila, Cindy, Dani, Janaina, Jessyka e Julia e Yan.

A todos os meus amigos de infância, em especial, Leticia Muraro. Obrigada por ser a amiga mais paciente e compreensiva. Adoro você.

A todos os professores e a Universidade Federal de Santa Catarina, que contribuíram na minha formação acadêmica.

Agradeço ao Universo por eu estar aqui, neste planeta, realizando minha missão, e a todas as pessoas que convivi e convivo, todas foram e são portais de evolução em minha vida.

*“Se eu fiz descobertas valiosas, foi mais por  
ter paciência do que qualquer outro talento”*

(Isaac Newton)

## RESUMO

Robôs de cinemática paralela, como a plataforma de Stewart, são mecanismos que apresentam alta rigidez e capacidade de manipular cargas pesadas, além de boa precisão de posicionamentos. O presente trabalho tem como objetivo, propor um procedimento de calibração de uma plataforma de Stewart e avaliar a exatidão de posicionamento da mesma. As medições foram realizadas no Laboratório de Geodésia Industrial, do Centro Tecnológico de Joinville - Universidade Federal de Santa Catarina, utilizando os sistemas de medição sistema Indoor-GPS e Estação Total Robotizada. O procedimento de calibração proposto não alcançou os resultados esperados, uma vez que os valores encontrados na avaliação de desempenho são muito elevados para futuras aplicações da Plataforma de Stewart. Estuda-se aumentar a exatidão de posicionamento através do refinamento do processo de calibração utilizando equipamentos que permitam menor incerteza de medição.

**Palavras-chave:** Plataforma de Stewart. Geodésia Industrial. Indoor-GPS. Estação Total Robotizada. Calibração. Avaliação de desempenho.

## **ABSTRACT**

Parallel kinematics robots, as the Stewart platform, are mechanisms that present high rigidity and ability to handle heavy loads, besides good positioning precision. The objective of this study is to propose a calibration procedure of a Stewart platform and evaluate the positioning accuracy of the same. The measurements were performed at the Industrial Geodesy Laboratory, of the Technological Center of Joinville - Federal University of Santa Catarina, using Indoor-GPS measurement systems and Total Robotized Station. The proposed calibration procedure did not achieve the expected results, since the values found in the performance evaluation are very high for future applications of the Stewart platform. The goal is to increase positioning accuracy by refining the calibration process using equipment that allows for less measurement uncertainty.

**Keywords:** Stewart Platform. Industrial Geodesy. Indoor-GPS. Total Robotized Station. Calibration. Performance evaluation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de um braço manipulador robótico.....	8
Figura 2: Componentes de um sistema robótico. ....	9
Figura 3: a) Manipulador cartesiano, b) Manipulador cilíndrico, c) Manipulador esférico, d) Manipulador SCARA, e) Manipulador antropomórfico. ....	10
Figura 4: a) Robô manipulador serial ABB IRB 4400 b) Robô manipulador paralelo ABB IRB 340 Flex Picker.....	11
Figura 5: Simulador de voo Airbus A340. ....	13
Figura 6: Representação de uma Plataforma de Stewart. ....	14
Figura 7: Aplicação do manipulador Paralelo na área médica. ....	14
Figura 8: Configurações existentes de uma Plataforma de Stewart. ....	15
Figura 9: Sistemas de referência de uma Plataforma de Stewart. ....	16
Figura 10: Etapas da calibração cinemática .....	20
Figura 11: Postura teórica e postura atingida. ....	23
Figura 12: Representação de um transmissor do sistema indoor-GPS.....	24
Figura 13: Geometria dos feixes emitidos pelo transmissor do sistema iGPS .....	25
Figura 14: Sequência de Sinais de um transmissor .....	25
Figura 15: Configuração padrão de um sistema iGPS com quatro transmissores.....	26
Figura 16: Vector Bar.....	26
Figura 17: Aquisição de pontos manualmente por meio de um Hand-Held-Vector Bar. ....	27
Figura 18: Medição com Estação Total.....	28
Figura 19: Localização de um alvo por meio de uma Estação Total.....	29
Figura 20: Plataforma de Stewart – Laboratório de Geodésia Industrial. ....	30
Figura 21: Junta universal (Junta Cardan).....	31
Figura 22: Exemplo de Atuador Linear eletromecânico. ....	32
Figura 23: Servo-Atuador – Circuito simplificado.....	32
Figura 24: Disposição dos transmissores no ambiente de trabalho (Laboratório de Geodésia Industrial). ....	33
Figura 25: Hand-Held Vector bar conectado ao PCE.....	34
Figura 26: Barra de escala .....	34
Figura 27: Tripé para transmissores .....	35
Figura 28: Transmissor junto a caixa transmissora .....	35

Figura 29: Unidades integradas de detecção fixadas na plataforma.....	36
Figura 30: Representação do sistema iGPS.....	36
Figura 31: Estação Total Robotizada utilizada nas medições. ....	37
Figura 32: <i>Spherical mounted cube-corner reflector</i> (SMR) – Alvo refletor da estação total. ....	38
Figura 33: Procedimento de medição para determinação dos centros das juntas.....	39
Figura 34: Medição dos pontos das juntas da plataforma de Stewart com a estação total. ....	40
Figura 35: Interface do Software <i>Spatial Analyzer</i> – Localização das juntas. ....	40
Figura 36: Localização do centro das junta. ....	41
Figura 37: Localização do centro da junta e erro de intersecção. ....	41
Figura 38: Procedimento para determinação da matriz de transformação homogênea. ....	42
Figura 39: Medição dos pontos da base e da plataforma com a estação total. ....	43
Figura 40: Procedimento para determinação do fator de conversão $d_i$ .....	43
Figura 41: Distância $l_i$ entre os centros das juntas. ....	45
Figura 42: Procedimento realizado na avaliação de desempenho. ....	46
Figura 43: Deslocamentos lineares limites realizados pela plataforma de Stewart.....	49
Figura 44: Deslocamentos lineares e angulares realizados pela plataforma de Stewart. ....	49
Figura 45: Matriz de transformação homogênea (XYZ). ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre manipuladores seriais e paralelos.....	12
Tabela 2: Aplicação do sistema iGPS na indústria.....	27
Tabela 3: Pulso enviados a plataforma afim de determinar os fatores $d_i$ . ....	44
Tabela 4: Valores pré-definidos de deslocamentos lineares e angulares do manipulador. ....	47
Tabela 5: Deslocamentos Nominais. ....	52
Tabela 6: Posições dos centros das juntas. ....	54
Tabela 7: Erros de intersecção dos centros das juntas.....	54
Tabela 8: Coeficientes $a_i$ , $d_i$ e deslocamentos $l_i$ .....	56
Tabela 9: Valores RMS. ....	59
Tabela 10: Média dos deslocamentos relativos entre os atuadores. ....	60
Tabela 11: Erros de posicionamento linear e angular.....	60
Tabela 12: Amplitudes entre os três ciclos de medições. ....	62
Tabela 13: Posição dos atuadores nos três ciclos de medições. ....	69
Tabela 14: Pontos utilizados nos cálculos de regressão linear. ....	71
Tabela 15: Avaliação de desempenho – Ciclo 1 de medição. ....	72
Tabela 16: Avaliação de desempenho – Ciclo 2 de medição. ....	73
Tabela 17: Avaliação de desempenho – Ciclo 3 de medição. ....	74

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Erro de Intersecção dos centros das juntas.....	55
Gráfico 2: Gráfico de regressão linear – Atuador 1.....	56
Gráfico 3: Gráfico de regressão linear – Atuador 2.....	57
Gráfico 4: Gráfico de regressão linear – Atuador 3.....	57
Gráfico 5: Gráfico de regressão linear – Atuador 4.....	58
Gráfico 6: Gráfico de regressão linear – Atuador 5.....	58
Gráfico 7: Gráfico de regressão linear – Atuador 6.....	59
Gráfico 8: Erros de Posicionamento Linear. ....	61
Gráfico 9: Erro de Posicionamento Angular .....	61
Gráfico 10: Amplitude medição linear. ....	62
Gráfico 11: Amplitude medição angular. ....	63

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1. Objetivos.....	7
1.1.1. Objetivo Geral .....	7
1.1.2. Objetivos específicos.....	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1. Robôs manipuladores .....	8
2.1.1. Manipuladores Seriais .....	10
2.1.2. Manipuladores Paralelos.....	11
2.1.3. Comparação entre manipuladores Seriais e manipuladores Paralelos.....	12
2.1.4. Manipulador do tipo Plataforma de Stewart.....	13
2.1.4. Aspectos geométricos e cinemáticos do Manipulador do tipo Plataforma de Stewart...	15
2.1.4.1. Cinemática Inversa .....	17
2.1.4.2. Cinemática Direta .....	19
2.2. Calibração Cinemática de Manipuladores.....	20
2.3. Avaliação de desempenho .....	22
2.4. Sistema indoor-GPS .....	23
2.4.1. Histórico .....	23
2.4.2 Características.....	24
2.4.3. Aplicações do sistema iGPS .....	27
2.5. Estação Total Robotizada.....	28
3. METODOLOGIA.....	30
3.1. Equipamentos .....	30
3.1.1. Plataforma de Stewart.....	30
3.1.2. Indoor-GPS (GPS).....	33
3.1.3. Estação Total Robótica.....	37
3.2. Procedimento Experimental .....	38

3.2.1. Calibração.....	38
3.2.2. Avaliação preliminar de desempenho.....	46
3.3. Processamento dos dados .....	50
3.3.1. Obtenção dos centros das juntas e da matriz de transformação homogênea.....	50
3.3.2. Obtenção do fator de conversão $d_i$ .....	51
3.3.3. Obtenção dos valores RMS .....	52
3.3.4. Avaliação de desempenho .....	52
4. RESULTADOS .....	54
4.1. Calibração.....	54
4.2. Avaliação preliminar de desempenho da Plataforma .....	60
CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS .....	66
APÊNDICE A – POSIÇÃO DOS ATUADORES NOS TRÊS CICLOS DE MEDIÇÕES NA ETAPA CALIBRAÇÃO .....	69
APÊNDICE B – DADOS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS DE REGRESSÃO LINEAR NA ETAPA CALIBRAÇÃO .....	71
APÊNDICE C - POSIÇÃO DOS ATUADORES NA ETAPA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

Em plena era tecnológica, tarefas normalmente atribuídas aos seres humanos, foram substituídas por robôs, aumentando a rapidez, eficácia e produtividade tão requerida pela indústria. Inicialmente prestavam auxílio e atualmente efetuam também tarefas difíceis e perigosas. A Associação de Robótica Industrial (RIA) define robô como: “Um manipulador multifuncional, reprogramável, projetado para movimentar materiais, ferramentas, dispositivos ou peças através de seus movimentos programados, desempenhando uma variedade de tarefas”. Os mesmos podem ser classificados em manipuladores em série e manipuladores em paralelo, sendo que o primeiro é constituído de elos conectados em série por intermédio de juntas, e o segundo constituído por duas plataformas, uma fixa e outra móvel, conectadas entre si através de elos em paralelo.

Um manipulador do tipo paralelo que atrai considerável atenção por possuir características inerentes tais como, alta capacidade de força, rigidez estrutural e maior precisão em posicionamentos, é conhecido como Plataforma de Stewart. Proposta inicialmente por D. Stewart como um simulador de voo, a Plataforma de Stewart possui seis graus de liberdade e é composta por seis elos de comprimento variável, fixos em uma base inferior fixa e em um prato móvel superior, sendo que cada um dos seis elos é conectado à base por meio de juntas universais e no prato, em geral, por juntas esféricas (MASORY et al., 1993).

Os manipuladores devem possuir uma importante característica, a capacidade de cumprir suas tarefas, tais como, montagem, pintura, soldagem etc., de forma eficaz e precisa em termos de posicionamento. Sendo assim, existe a necessidade de quantificar com alta exatidão diversas características do robô. Em robótica, o procedimento que determina os valores reais das dimensões geométricas e características mecânicas da estrutura de um manipulador, é denominado calibração. Os parâmetros cinemáticos descrevem principalmente os comprimentos dos elos dos robôs e a orientação relativa das juntas. Sua determinação constitui a calibração cinemática de um robô. Já os parâmetros dinâmicos, determinados na calibração dinâmica, descrevem as massas dos elos e das juntas e o atrito interno. Esses parâmetros têm importância na melhoria da exatidão dos movimentos e posições dos robôs (MARQUES, 2005).

Tendo em vista as diversas funcionalidades da plataforma de Stewart, o presente trabalho tem como objetivo, propor um procedimento de calibração cinemática e avaliar, por meio de medições, a exatidão de posicionamento de uma plataforma de Stewart após a implantação dos parâmetros determinados na calibração.

A calibração de manipuladores é um processo que integra modelagem, medição, identificação numérica das características físicas e correção de posicionamentos. O contexto de calibração neste trabalho se limita à determinação das características geométricas do robô por meio de medição direta dos parâmetros de interesse utilizando-se um sistema indoor-GPS e de uma estação total robotizada como sistemas de medição de referência, sem necessidade de otimização numérica.

As medições foram realizadas no Laboratório de Geodésia Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina, utilizando os equipamentos de medição disponíveis, e uma plataforma de Stewart projetada e construída no Centro Tecnológico de Joinville.

## **1.1. Objetivos**

Neste tópico serão apresentados o objetivo geral e objetivos específicos deste trabalho.

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Propor e validar um procedimento de calibração cinemática de uma plataforma de Stewart.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Determinação das posições das juntas da plataforma de Stewart;
- Determinação da matriz de transformação entre os sistemas coordenados da base e da plataforma móvel em posição de fim de curso;
- Determinação dos fatores de conversão entre contagem de pulsos nos *encoders* e o deslocamento efetivos dos atuadores da plataforma;
- Avaliação preliminar da exatidão de posicionamento;

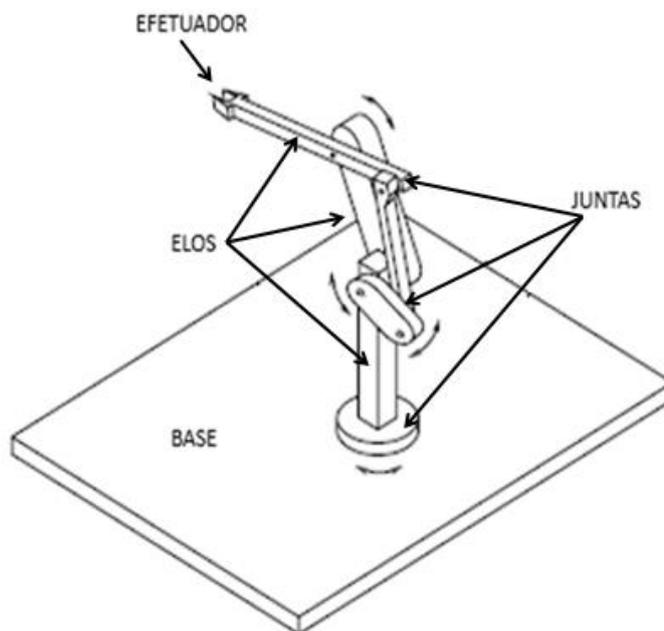
## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos pertinentes aos manipuladores em série e paralelos, dando foco à plataforma de Stewart, assim como, aos sistemas de medição Indoor-GPS (iGPS), Estação Total Robotizada e à calibração cinemática de robôs.

### 2.1. Robôs manipuladores

Um dos robôs mais utilizados nas indústrias e até mesmo laboratórios de pesquisa, é o do tipo manipulador. Os manipuladores têm como principal tarefa o deslocamento de peças ou ferramentas em um volume de trabalho definido. A estrutura que lhe permite executar tais tarefas é composta por uma sequência de corpos rígidos (elos), interconectados por articulações (juntas). Um manipulador (Figura 1) é caracterizado por possuir um braço que garante mobilidade, articulações que lhe conferem destreza, e um efetuador (pinça ou ferramenta), que executa a tarefa do robô (SCIAVICCO E SICILIANO, 2012).

Figura 1: Estrutura de um braço manipulador robótico.

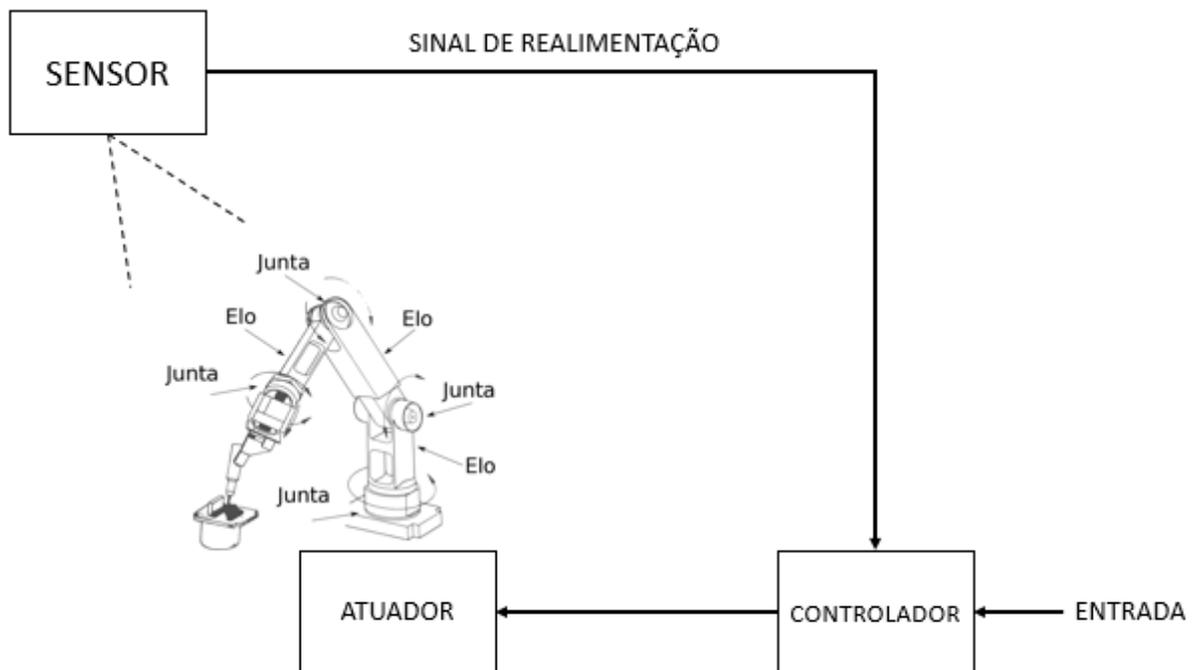


Fonte: Sciavicco e Siciliano, (2012).

A mobilidade de um manipulador é garantida pelas juntas, podendo elas ser prismáticas, esféricas ou de revolução. As juntas definem os graus de liberdade do robô. Os graus de liberdade (GL) são devidamente distribuídos ao longo da estrutura, devendo ser suficientes para que o robô execute determinadas tarefas. Geralmente, para orientar um objeto num espaço tridimensional (3D), são necessários seis graus de liberdade, três para posicionar um objeto num ponto qualquer dentro de espaço limitado, e três para obter a orientação adequada do efetuador que segura o objeto (SCIAVICCO E SICILIANO, 2012).

Além da estrutura mecânica, o manipulador contém um sistema de controle responsável por manipular as entradas do processo a fim de obter um comportamento desejado (Figura 2). *Encoders*, tacômetros ou câmeras de vídeo são exemplos de sensores utilizados para medir os movimentos do manipulador e permitir a realimentação do sistema de controle (MELLO, 2011).

Figura 2: Componentes de um sistema robótico.



Fonte: Autora (2017).

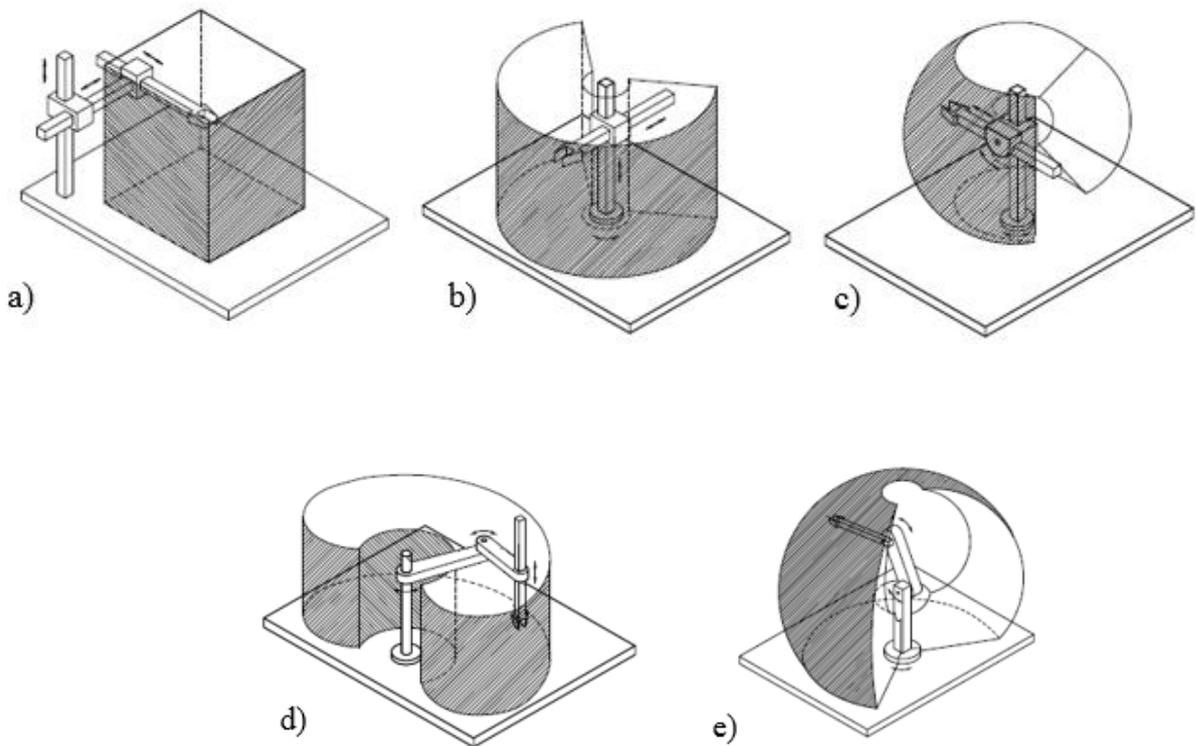
Os robôs manipuladores podem ser classificados como manipuladores seriais, manipuladores paralelos ou manipuladores híbridos, que combinam características dos anteriores.

### 2.1.1. Manipuladores Seriais

A estrutura de um manipulador serial consiste de uma sequência de elos rígidos interligados por meio de articulações (juntas). São caracterizados por um braço que garante mobilidade, um pulso que confere destreza e um efetor final que executa a tarefa necessária do robô (SCIAVICCO et al.,2012).

O espaço de trabalho representa o conjunto de todas as posições que o efetor do manipulador consegue alcançar. A varredura do espaço de trabalho depende da estrutura mecânica do manipulador, bem como os limites das articulações. Os manipuladores seriais podem ser classificados como cartesianos, cilíndricos, esféricos, SCARA e antropomórfico. Tais classificações se referem ao volume de trabalho dos mesmos (Figura 3) (SCIAVICCO E SICILIANO, 2012).

Figura 3: a) Manipulador cartesiano, b) Manipulador cilíndrico, c) Manipulador esférico, d) Manipulador SCARA, e) Manipulador antropomórfico.



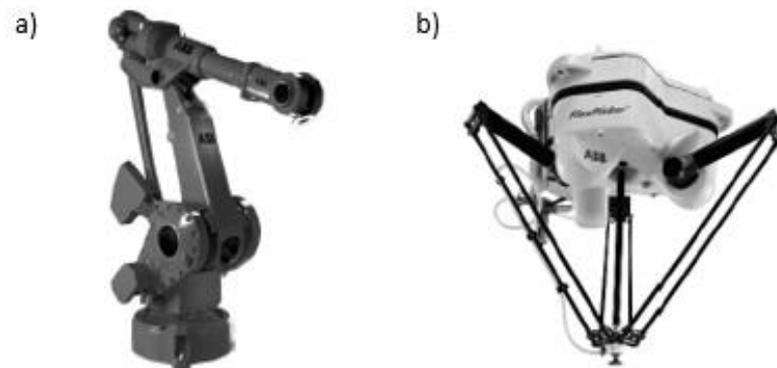
Fonte: Sciavicco e Sciliano, (2012).

### 2.1.2. Manipuladores Paralelos

À medida que os sistemas robóticos começavam a desempenhar tarefas normalmente atribuídas aos seres humanos, empregaram-se principalmente robôs manipuladores seriais. Tal manipulador tem a vantagem de fazer varreduras de espaços de trabalho com elevada mobilidade, similar a um braço humano. Porém, sua rigidez é relativamente baixa, limitando sua capacidade de carga, e precisão em posicionamentos. Ou seja, os manipuladores seriais de cadeia aberta, possuem tanto as vantagens, como as desvantagens de um braço humano (DASGUPTA E MRUTHYUNJAYA, 2000).

Sendo assim, para aplicações em que a capacidade de carga é elevada e um bom desempenho dinâmico e exatidão de posicionamentos são requeridos, é desejável uma alternativa aos manipuladores seriais. Observando o mundo biológico, constata-se que o corpo dos animais que suportam cargas é composto por múltiplas pernas paralelas. Logo, pode-se dizer que manipuladores com efetadores conectados ao solo através de vários elos em paralelo, terão maior rigidez e conseqüentemente precisão de posicionamento superior. Isso tornou os manipuladores paralelos de cadeia fechada, atraentes para determinadas aplicações (Figura 4) (DASGUPTA E MRUTHYUNJAYA, 2000).

Figura 4: a) Robô manipulador serial ABB IRB 4400 b) Robô manipulador paralelo ABB IRB 340 Flex Picker



Fonte: Sciavicco e Sciliano, (2012).

Há ainda manipuladores que possuem laços cinemáticos de cadeia aberta e fechada e/ou combinações de manipuladores seriais e paralelos. Tais manipuladores são denominados híbridos.

### 2.1.3. Comparação entre manipuladores seriais e manipuladores paralelos

O interesse por manipuladores paralelos surgiu para solucionar problemas existentes em manipuladores seriais, como baixa rigidez e pouca capacidade de carga. A Tabela 1, apresenta as principais características de manipuladores paralelos e seriais, onde se pode observar suas principais diferenças, vantagens e desvantagens.

Tabela 1: Comparação entre manipuladores seriais e paralelos.

	<b>Características</b>	<b>Manipulador Serial</b>	<b>Manipulador Paralelo</b>
<b>Mecanismo</b>	Capacidade de Carga	Baixa	Alta
	Volume de Trabalho	Grande	Pequeno
	Precisão do Efetuador	Baixa	Alta
	Articulações Passivas	Poucas ou nenhuma	Tem
	Velocidade/Aceleração	Baixa	Alta
	Acionamento	Elétrico	Elétrico
	Fabricação	Difícil	Fácil
	Aplicações Típicas	Soldagem, montagem, pintura, manuseio de materiais.	Simuladores, usinagem, posicionamento de precisão, montagem.
<b>Controle</b>	Controle de posição no espaço de trabalho	Difícil	Fácil
	Controle de força no espaço de trabalho	Fácil	Difícil
	Erro de Posição	Acumulado	Médio
	Erro de controle de Força	Médio	Acumulado
	Dinâmica	Difícil	Muito mais difícil

Fonte: Merlet, (2006).

#### 2.1.4. Manipulador do tipo Plataforma de Stewart

A estrutura do manipulador paralelo conhecido como plataforma de Stewart, projetada por D. Stewart, em 1962, foi inicialmente utilizada para simular condições de voo (Figura 5). Inicialmente o mecanismo de Stewart consistia de uma plataforma triangular, suportada por juntas esféricas em três pernas de comprimento ajustáveis, conectadas ao solo através de juntas universais (juntas Cardan). Gough (1962) sugeriu o uso de atuadores lineares em paralelo e, desse modo, a plataforma se tornou um mecanismo de atuação paralela completa, com seis graus de liberdade, e encontra aplicações em diferentes processos de manufatura e tarefas que exigem precisão ou exatidão (DASGUPTA E MRUTHYUNJAYA, 2000).

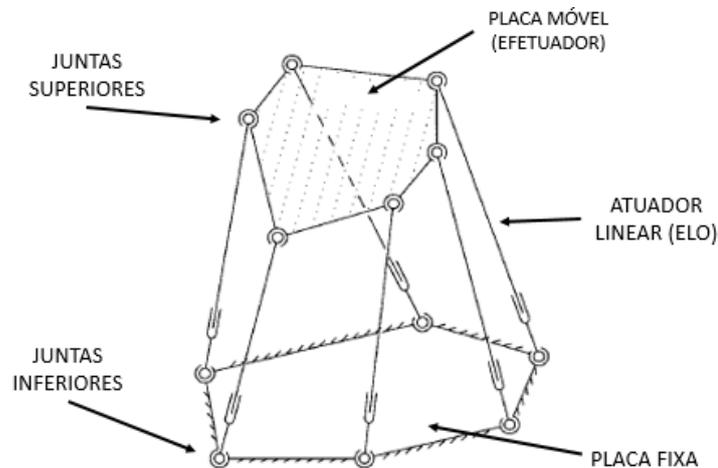
Figura 5: Simulador de voo Airbus A340.



Fonte: Merlet, (2006).

A plataforma de Stewart (Figura 6) é composta por seis elos, formados por atuadores lineares, de comprimento variável, fixos em uma placa inferior estacionária (base) e em uma plataforma móvel superior (efetuador) por meio de juntas universais ou esféricas (WANG E MASORY, 1993). Os atuadores podem se movimentar independentemente, variando o seu comprimento, para se obter a posição desejada, é necessária uma combinação dos comprimentos em todos os seis atuadores, obtendo-se então três movimentos de translação em X, Y e Z, e três movimentos de rotação (*roll*, *pitch* e *yaw*) (GONZALEZ, 2009).

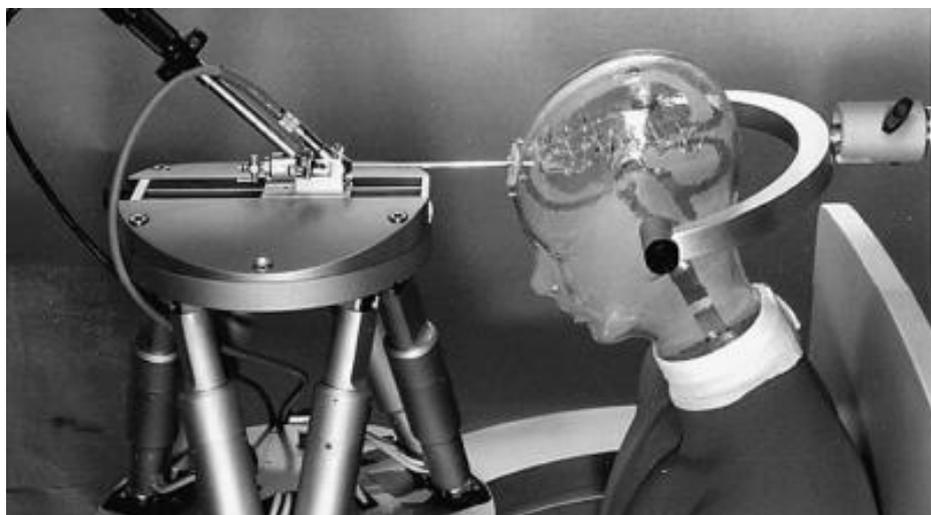
Figura 6: Representação de uma Plataforma de Stewart.



Fonte: Dasgupta e Mruthyunjava, (2000).

Em comparação com manipuladores em série, a Plataforma de Stewart possui alta capacidade de carga, pois os esforços são distribuídos em vários atuadores em paralelo; alta rigidez estrutural e melhor exatidão de posicionamento devido aos erros nas junções não serem cumulativos. (WANG E MASORY, 1993). Em virtude das vantagens mecânicas, a plataforma de Stewart tem sido utilizada em muitas aplicações tais como: simulador automobilístico que analisa o comportamento do veículo quando o mesmo é guiado por um motorista sob efeito de álcool, utilização da plataforma em cirurgias complexas, como no cérebro (Figura 7), manipuladores escaladores, utilizado para inspecionar tubulações, entre outros (MERLET, 2006).

Figura 7: Aplicação do manipulador Paralelo na área médica.

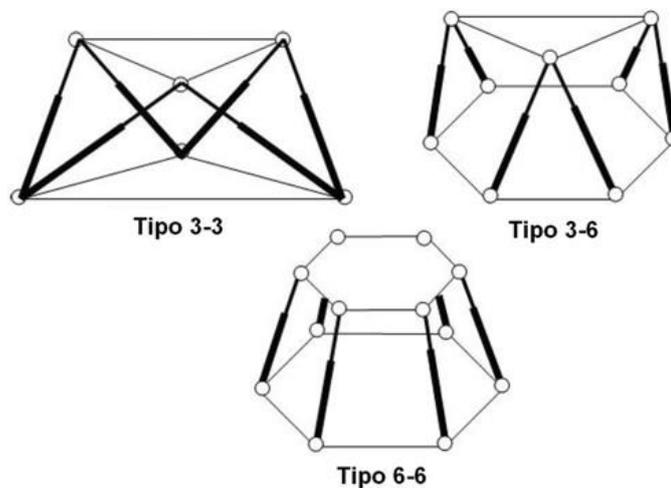


Fonte: Wapler et. al., 2003.

### 2.1.4. Aspectos geométricos e cinemáticos do Manipulador do tipo Plataforma de Stewart

A configuração do manipulador do presente trabalho é do tipo 6-6, em que o primeiro algarismo representa o número de vértices do corpo rígido superior e o segundo algarismo representa o número de vértices do corpo rígido inferior. A Figura 8 a seguir ilustra algumas configurações do manipulador do tipo plataforma de Stewart com seis pernas (MOLINA E FABIAN, 2008).

Figura 8: Configurações existentes de uma Plataforma de Stewart.



Fonte: Lara,(2008).

O número de graus de liberdade GDL de um mecanismo é o número de variáveis independentes necessárias para controlar sua posição no plano ou no espaço. A mobilidade pode ser determinada segundo o critério de Kutzbach-Grubler (1917), que define o número de graus de liberdade pela Equação 1:

$$n_{GDL} = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j g_i - I_f \quad (1)$$

Onde:

$n_{GDL}$ : Número de graus de liberdade do sistema;

$\lambda$ : Graus de liberdade do espaço onde o mecanismo se encontra ( $\lambda=6$  para o caso espacial);

$n$ : Número de elos fixos do mecanismo incluindo a base e o prato móvel;

$j$ : Número de juntas no mecanismo;

$g_i$ : Número de graus de liberdade do movimento relativo por junta;

$I_f$ : Número de graus de liberdade passivos do sistema;

Sendo que para a plataforma do presente trabalho tem-se  $\lambda=6$ ,  $n= 14$  (prato móvel, base e os dois extremos das seis pernas),  $j = 18$ ,  $g_i = 2$  (Junta Universal) e  $I_f= 0$ , pois não há grau de liberdade passivo no sistema.

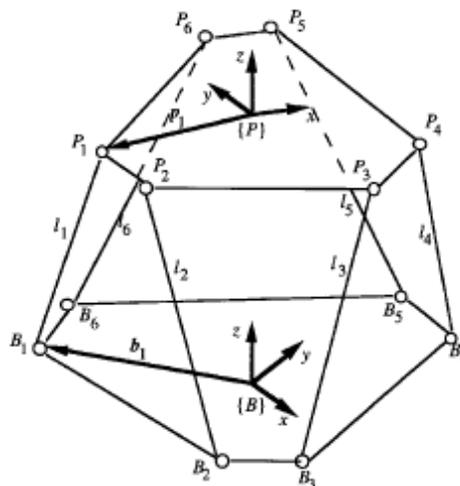
Substituindo os valores na Equação 1:

$$n_{GDL} = 6(14 - 18 - 1) + \sum_{i=1}^{18} 2 - 0 \quad (2)$$

Logo, o número de graus de liberdade do sistema é  $n_{GDL} = 6$ .

Para descrever o movimento da plataforma de Stewart, sistemas de coordenadas de referências são fixados na base e no prato móvel. O sistema de coordenadas {P} é localizado no centro do prato móvel, sendo o eixo Z perpendicular ao plano. Da mesma forma, um sistema de coordenadas {B} está localizado no centro da base. Os elos estão conectados à base e à plataforma móvel por juntas universais. Os centros das juntas universais da base são denotados como  $B_1, B_2, \dots, B_6$ , e as juntas universais do prato superior são denotados por  $P_1, P_2, \dots, P_6$ . As coordenadas de  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , em relação ao sistema de coordenada da base {B} são descritos pelos vetores  $b_1, b_2, \dots, b_6$ , e os do sistema de coordenadas do prato móvel {P} são descritos pelos vetores  $p_1, p_2, \dots, p_6$ . Cada comprimento do elo é denotado por  $l_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , sendo que  $b_i$  e  $p_i$  são vetores referência que ligam o centro da junta ao sistema coordenado da plataforma (Figura 9) (WANG E MASORY, 1993)

Figura 9: Sistemas de referência de uma Plataforma de Stewart.



Fonte: Wang e Masory, (1993).

O modelo cinemático da plataforma pressupõe as seguintes premissas:

1. Todas as juntas de ligação são perfeitas, ou seja, seus eixos são perpendiculares uns aos outros e se cruzam no mesmo ponto (no centro da junta);
2. Os elos (atuadores) são montados perfeitamente nas juntas, de modo que cada eixo do atuador passa pelos seus respectivos centros das juntas;
3. A estrutura da plataforma é exata, de modo que a localização das juntas é conhecida;
4. Considerando as premissas anteriores verdadeiras, as juntas universais podem ser tratadas como pontos e as ligações como linhas retas de comprimento conhecido, que estão conectadas entre os centros conjuntos (WANG e MASORY, 1993).

A posição e orientação da plataforma móvel dependem do comprimento dos atuadores, sendo que o estudo da cinemática traduz matematicamente essa relação. Há dois tipos de abordagens, da cinemática inversa e a da cinemática direta.

#### 2.1.4.1. Cinemática inversa

O modelo da cinemática inversa permite determinar as distâncias dos atuadores, tendo como entrada a posição e orientação do corpo rígido superior. Essa abordagem é muito utilizada na geração de trajetórias para sistema de controle de manipuladores (MERLET, 2004).

Durante a movimentação da plataforma, a plataforma móvel possui rotações nos eixos  $x_p$ ,  $y_p$  e  $z_p$  em relação ao sistema coordenado da base  $\{B\}$ . Cada rotação em torno em torno dos eixos é representada pelas matrizes (2), (3) e (4). Sendo  $\varphi$ ,  $\theta$ , e  $\psi$  os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* respectivamente.

$$\mathcal{R}(\varphi, x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\text{sen } \varphi \\ 0 & \text{sen } \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathcal{R}(\theta, y) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathcal{R}(\psi, z) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\text{sen } \psi & 0 \\ \text{sen } \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A matriz de orientação/rotação do sistema coordenado {P} da plataforma móvel em relação ao sistema coordenado da base {B} é calculado segundo a Equação 5 a seguir.

$$\mathcal{R}_P^B = \mathcal{R}(\varphi, x) \cdot \mathcal{R}(\theta, y) \cdot \mathcal{R}(\psi, z) \quad (5)$$

Que resulta na seguinte matriz:

$$\mathcal{R}_P^B = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\varphi s\theta - c\varphi s\psi & c\varphi c\psi s\theta - s\varphi s\psi \\ c\theta s\psi & c\varphi c\psi - s\varphi s\theta s\psi & -c\psi s\varphi + c\varphi s\theta s\psi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\varphi c\psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde:

$c\varphi = \cos(\varphi)$  e  $s\varphi = \sin(\varphi)$ .

Assumindo  $p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$  como o vetor de translação entre a base fixa e a plataforma móvel, pode-se escrever o vetor  $S_i$ , que caracteriza os atuadores segundo a Equação 7.

$$S_i = \mathcal{R}_P^B \cdot p_i + p - b_i \quad (7)$$

A partir dessa grandeza, é possível calcular o comprimento do atuador, através da Equação 8.

$$l_i = \|S_i\| = D \cdot (\mathcal{R}_P^B \cdot p_i + p - b_i) \quad (8)$$

De posse da Equação 8, e dada uma determinada trajetória é possível calcular o comprimento exigido de cada um dos seis atuadores.

### 2.1.4.2. Cinemática Direta

O modelo da cinemática direta obtém a posição e orientação do corpo rígido superior em função dos parâmetros das juntas, tendo como entrada o comprimento dos atuadores  $l_i$  e obtendo como saída a posição e orientação do corpo rígido superior. Ao contrário da cinemática inversa, a cinemática direta não possui uma única solução. Os cálculos para determinação da posição e orientação são complexos e envolvem solução de um sistema com equações lineares (LOPES, 2001). A seguir são apresentadas algumas equações da cinemática direta de um manipulador.

Como demonstrado anteriormente, os centros das juntas universais da base são denotados como  $B_1, B_2, \dots, B_6$ , e as juntas universais da plataforma móvel são denotados por  $P_1, P_2, \dots, P_6$ . Os pontos  $B_i$  conectam os elos (atuadores) da plataforma à base, e os pontos  $P_i$  conectam os elos (atuadores) à plataforma móvel superior (Figura 9).

As coordenadas globais dos pontos  $P_i$  ( $P_i^B$ ) podem ser relacionadas com as coordenadas locais ( $P_i^P$ ) por meio da Equação 9.

$$\begin{bmatrix} P_i^B \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B T_P \begin{bmatrix} P_i^P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sendo  ${}^B T_P$  a matriz de transformação homogênea do sistema local {P} para o sistema global {B}, que pode ser definida pela Equação 10.

$${}^B T_P 4 \times 4 = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_P^B 3 \times 3 & O_{3 \times 1}^B \\ 0 \ 0 \ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

$O_{3 \times 1}^B = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ : Posição de origem (x, y e z) da plataforma móvel em relação à base.

$\mathcal{R}_P^B 3 \times 3$ : Matriz de orientação/rotação.

Logo a matriz de transformação homogênea especifica a posição e a orientação da plataforma móvel em relação à base, tendo como parâmetros de entrada o comprimento dos atuadores  $l_i$ .

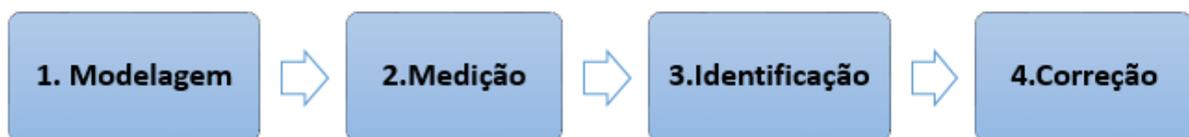
## 2.2. Calibração Cinemática de Manipuladores

Em robótica, calibração é o termo adotado para referenciar os procedimentos que determinam os valores reais das dimensões geométricas e características mecânicas da estrutura de um robô manipulador. Os parâmetros podem ser classificados como cinemáticos ou dinâmicos. Os parâmetros dinâmicos descrevem as massas e atrito interno de elos e juntas, e os parâmetros cinemáticos determinam os comprimentos dos elos e a orientação dos elos em relação aos centros das juntas. A determinação dos mesmos constitui calibração cinemática do robô (MARQUES, 2005).

A determinação dos parâmetros do robô é de extrema importância quando se deseja melhorar a exatidão de posicionamento. Erros de posicionamento podem estar associados a diversos fatores, que podem ser classificadas como causas geométricas tais como: geometria de elos e juntas, erros lineares e não lineares nas transmissões, folgas nos motores e transmissões, batimento nos mancais, etc. Há também causas não geométricas, tais como: desgaste de componentes, geração de calor interno, vibração, deflexão estática ou dinâmica em elos e juntas, erros de implementação no modelo cinemático, erros numéricos, erros de medições dos sensores, etc. O ambiente também pode contribuir com erros devido a vibração transmitida pelo solo, deformação do acoplamento do robô com o piso, gradientes térmicos espaciais e temporais, diferença entre temperatura de operação e temperatura de referência, etc.

A calibração cinemática pode ser dividida em etapas, conforme apresentado no fluxograma a seguir (Figura 10).

Figura 10: Etapas da calibração cinemática



Fonte: Roth et al., (1987)

A calibração da plataforma de Stewart é similar à calibração de manipuladores em série. Determina-se primeiramente um modelo cinemático, que inclua os parâmetros que representam o robô nominal. Em seguida, características selecionadas são medidas com instrumentos de medição de alta precisão. Na etapa seguinte, um procedimento para

identificação de parâmetros é realizado, de modo a quantificar um conjunto de parâmetros, que deverão ser introduzidos no modelo nominal, que representa o robô precisamente. E por último, o modelo nominal é corrigido no código de controle de posição (MOTTA & MCMASTER, 1999).

A calibração cinemática, também chamada de calibração nível 2, é formulada em termos da diferença entre o comprimento da perna real medido e o comprimento da perna nominal. Com esta formulação, é possível identificar o problema cinemático, evitando os problemas numéricos associados à cinemática direta. Os parâmetros possíveis de identificar são basicamente erros nas juntas esféricas e universais da plataforma, assim como as diferenças nos comprimentos das pernas (ZHUANG E MARSORY, 1998).

A seguir, são descritos com mais detalhes as etapas sequenciais de calibração cinemática:

**Modelamento:** Um modelo cinemático é uma descrição matemática da geometria e movimentação do robô. Um número de diferentes aproximações existe para desenvolver o modelo cinemático de um robô manipulador. O método mais popular, foi desenvolvido por Denavit e Hartenberg. O método se baseia em matrizes de transformação homogênea. O procedimento consiste em estabelecer sistema de coordenadas em cada eixo da junta. Cada sistema de coordenada está relacionado a um conjunto específico de coeficientes na matriz de transformação homogênea.

**Medição:** Na fase de medição é medido um determinado número de posições do robô com um sistema de medição de referência. Esses valores são comparados com as posições do modelo teórico do robô. Geralmente são necessários seis parâmetros para especificar a posição e orientação de um corpo rígido. A fase de medição é a etapa mais difícil e demorada da calibração do robô. O procedimento de medição deve retornar os parâmetros do modelo nominal. Sendo assim o modelo de medição deve ser suficientemente exato para detectar os efeitos desses parâmetros. O procedimento de medição normalmente é feito em ambiente de laboratório. As posições do manipulador são medidas com equipamentos de alta resolução.

**Identificação:** A identificação dos parâmetros envolve normalmente métodos numéricos. Os métodos devem ser confiáveis o suficiente para que uma solução possa ser alcançada, mantendo um nível de confiança razoável nos valores dos parâmetros identificados. Alguns modelos podem ser utilizados para identificação dos parâmetros.

**Compensação:** Está é a etapa final e decisiva na calibração cinemática de um robô, no qual um passo de correção é inserido no software de controle do robô. Devido à dificuldade em

modificar os parâmetros cinemáticos diretamente no controlador do robô, as compensações das juntas podem ser feitas nas leituras do *encoder* do robô (ROTH et al., 1987).

### 2.3. Avaliação de desempenho

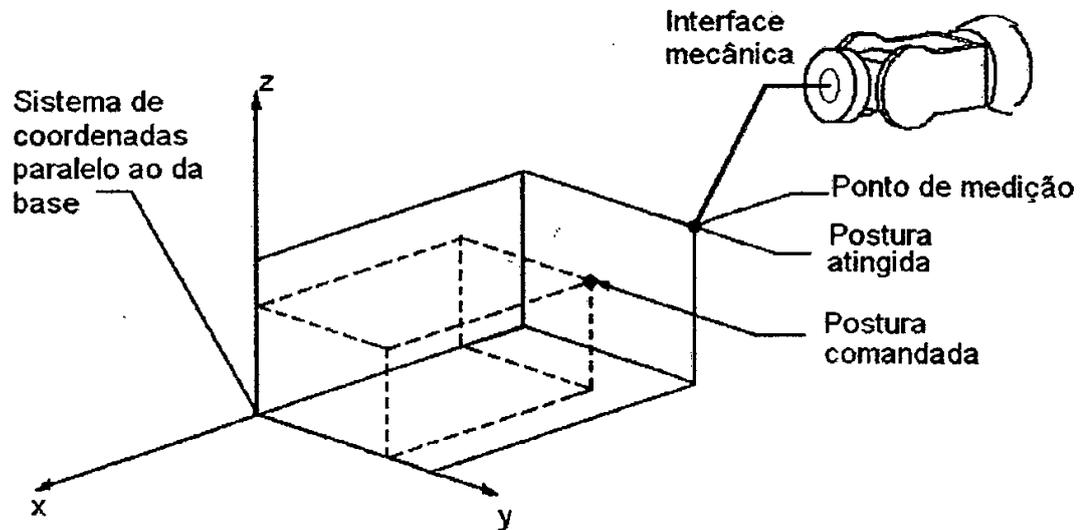
Uma avaliação de desempenho de um robô tem como objetivo classificar se o mesmo está apto ou não para realizar as funções para o qual foi construído. Quanto mais exigente for a tarefa, mais crítica é sua avaliação. As características da postura são as principais grandezas a serem determinadas na avaliação de desempenho de uma plataforma de Stewart. Essas grandezas qualificam os erros entre uma postura teórica (determinada através da programação da plataforma) e respectiva postura atingida (Figura 11). Os erros podem ser causados pelo algoritmo que controla a plataforma, pelas transformações de coordenadas, pelo processo de fabricação, pela falta de manutenção e até mesmo influências externas como a temperatura (GUENTHER et al., 2000).

A norma ISO9283 de 1998 estabelece uma série de critérios que visam avaliar diversos tipos de robôs. Estes critérios estão listados abaixo (PINTO et al., 2001):

- Tendência e repetibilidade de postura;
- Variação multidirecional na tendência de postura;
- Tendência e repetitividade de distância;
- Tempo de estabilização de postura;
- Sobrepasso;
- Variação das características de postura;
- Intercambialidade;
- Tendência e repetitividade de percurso;
- Tendência de percurso na reorientação;
- Desvio de canto;
- Características de velocidade de percurso;
- Flexibilidade estática;
- Desvios de tecimento (movimento em ziguezague utilizado em soldagem).

A norma ISO9283 não especifica quais desses critérios devem ser selecionados para um robô específico, sendo assim, o usuário desta norma que estabelecerá quais características de desempenho devem ser quantificadas de acordo com sua necessidade (PINTO et al., 2001).

Figura 11: Postura teórica e postura atingida.



Fonte: Guenther et al., (2000).

## 2.4. Sistema indoor-GPS

O termo iGPS é a abreviação de indoor-GPS, onde GPS é uma referência ao Sistema de Posicionamento Global ou *Global Positioning System*, em inglês, que consiste num sistema de localização por satélite, utilizado principalmente em tarefas de posicionamento e navegação ao ar livre.

O sistema iGPS, por sua vez, é utilizado predominantemente para tarefas de medição e alinhamento de grandes estruturas. O sistema não utiliza satélites, mas funciona por meio de um conjunto de transmissores que emitem sinais óticos em torno de um objeto a ser medido, sendo que esses objetos são geralmente peças e conjuntos de aeronaves, automóveis ou navios (MAISANO et al., 2008).

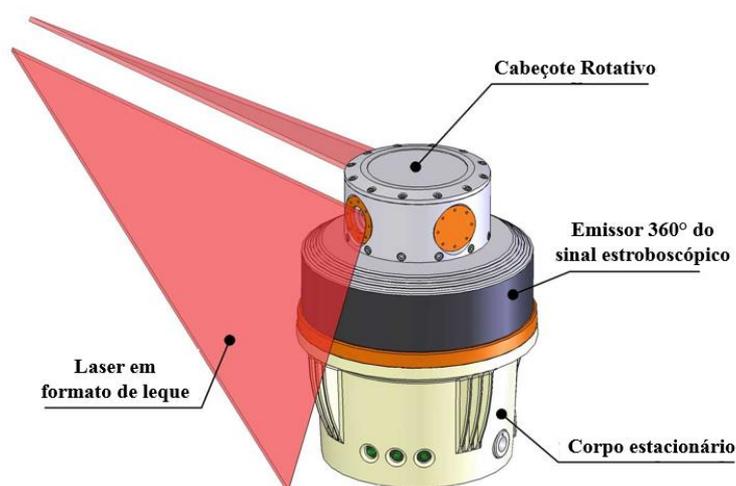
### 2.4.1. Histórico

Em 1990, a empresa Arc-Second, de Dulles, no estado da Virgínia nos Estados Unidos, começou a desenvolver o sistema de posicionamento iGPS baseado em sinais de rádio. A intenção inicial era aplicar o sistema em construções ao ar livre no ramo da engenharia civil. Porém, problemas como erros de medição elevados e visibilidade, levaram a empresa a realizar experimentos com sinais baseados em laser, que apresentaram ótimos resultados em ambientes dentro de fábrica (MAISANO et al., 2008).

### 2.4.2 Características

O sistema *iGPS*, produzido atualmente pela empresa Nikon Metrology, é composto por um determinado número de transmissores ativos e um ou mais receptores. Cada transmissor (Figura 12) transmite dois diferentes tipos de sinais, o primeiro denominado sinal estroboscópico, e dois feixes de laser infravermelho em formato de leque, que são emitidos continuamente e giram em torno do eixo vertical devido ao movimento rotativo do cabeçote em formato cilíndrico, na parte superior do transmissor. Logo, devido ao movimento de rotação, é possível varrer um determinado volume de trabalho.

Figura 12: Representação de um transmissor do sistema indoor-GPS

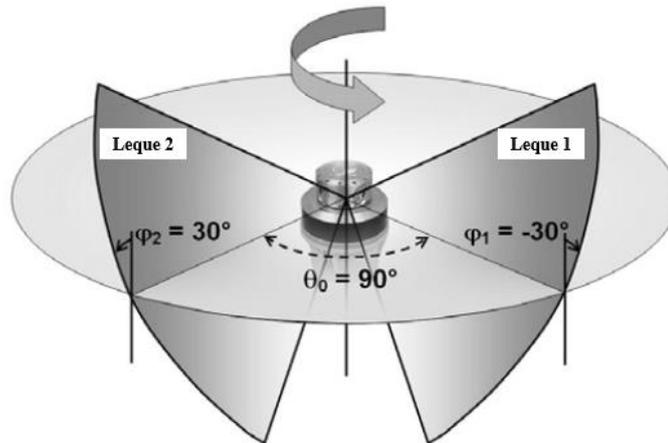


Fonte: Muelaner (2010).

O sinal estroboscópico é emitido a cada duas rotações, e tem o intuito de sincronizar os sinais que chegam aos receptores. A frequência de rotação de cada transmissor é única, para permitir o isolamento do sinal vindo de cada transmissor. Essa frequência encontra-se na faixa entre 40 Hz e 50 Hz. (DEPENTHAL E SCHWENDEMANN, 2009);(HUGHES et al., 2010).

Os feixes em formato de leque têm uma elevação no plano vertical de  $\pm 30^\circ$  e  $\pm 30^\circ$  no plano horizontal e estão dispostos de modo que no plano horizontal estejam separados por um ângulo de  $90^\circ$  (Figura 13).

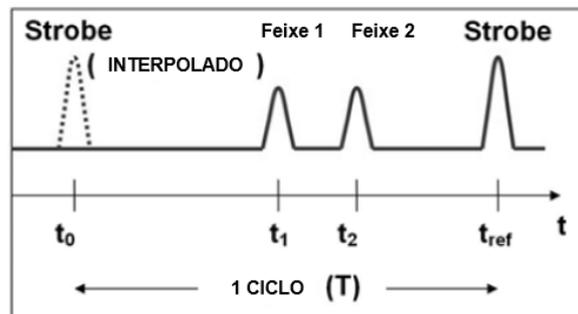
Figura 13: Geometria dos feixes emitidos pelo transmissor do sistema iGPS



Fonte: Depenthal e Schwendemann (2009).

Um ou mais receptores localizado no volume de trabalho (Figura 15), detectam e processam os sinais de transmissores visíveis e calculam o tempo de chegada. O tempo do sinal estroboscópico ( $t_{ref}$ ) e o sinal interpolado ( $t_0$ ) definem o começo e fim de cada ciclo (Figura 14). Os tempos  $t_1$  e  $t_2$  são medidos quando cada feixe passa pelos receptores.

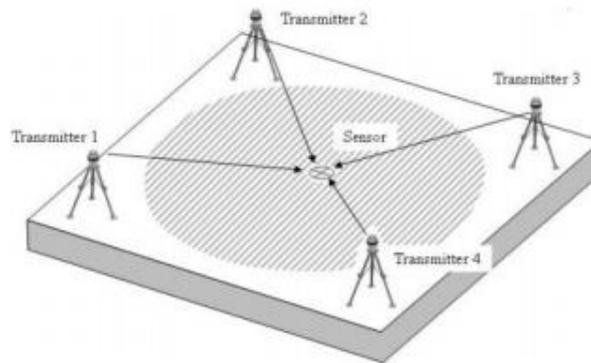
Figura 14: Sequência de Sinais de um transmissor



Fonte: Depenthal e Schwendemann (2009).

Os ângulos de elevação horizontal entre transmissor e receptor são determinados com base no tempo  $t_{ref}$  do sinal estroboscópico e média dos tempos  $t_1$  e  $t_2$ . O ângulo de elevação vertical é determinado a partir da diferença entre  $t_1$  e  $t_2$ , além de considerar a geometria dos feixes em formato de leque. (DEPENTHAL E SCHWENDEMANN, 2009), (HUGHES et al., 2010).

Figura 15: Configuração padrão de um sistema iGPS com quatro transmissores



Fonte: Schwendemann (2009).

A partir desses ângulos, se determina por meio de triangulação a posição e orientação de cada receptor no volume de trabalho. O receptor consiste de 32 fotodiodos dispostos em um cilindro facetado, e protegidos por um revestimento de vidro. O receptor é conectado a um conversor analógico-digital e uma unidade de pré-cálculo, o PCE (*Position Calculation Engine*), que registra o instante de chegada de cada sinal através de um relógio interno, e gerencia comunicação com o computador (DEPENTHAL E SCHWENDEMANN, 2009).

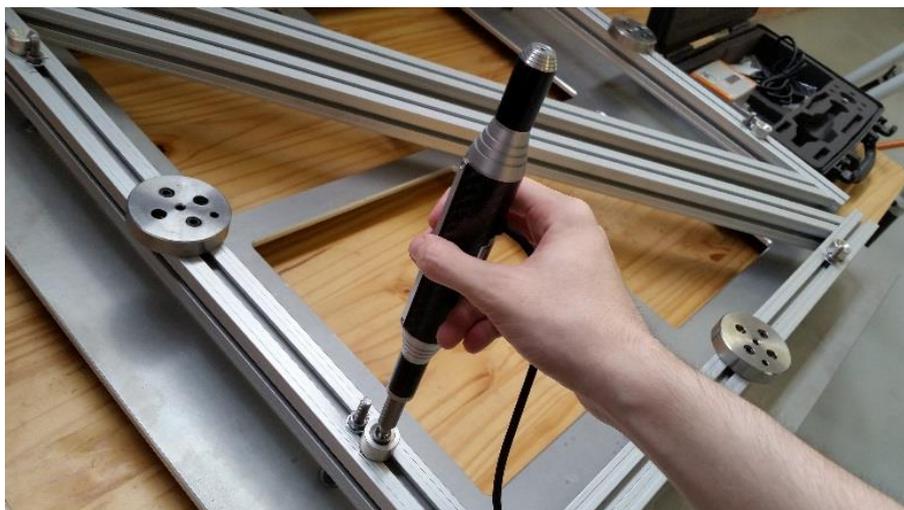
A Figura 16 apresenta conjunto é denominado *Handheld Vector Bar* (HHVB) ou Barra Vetor Portátil em português. A mesma é composta de dois receptores montados em linha e uma esfera de apalpação. Essa barra é utilizada para captar pontos manualmente, como apresentado na Figura 17 (HUGHES, et al., 2010).

Figura 16: Vector Bar



Fonte – HUGHES et al., 2010.

Figura 17: Aquisição de pontos manualmente por meio de um Hand-Held-Vector Bar.



Fonte: Autora (2017).

### 2.4.3. Aplicações do sistema iGPS

Na indústria encontram-se diversas aplicação para o sistema iGPS, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Aplicação do sistema iGPS na indústria

<b>Setor</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Aeroespacial</b>	Determinação do perfil de asas Verificação de montagem de turbinas e motores Verificação das dimensões principais para controle geométrico
<b>Automotivo</b>	Posicionamento e alinhamento de vários componentes da linha de produção Rastreamento em tempo real da posição de equipamentos ou robôs em linha de montagem Medições do produto acabado
<b>Ferrovário</b>	Medições de vagões Controle do alinhamento e posicionamento dos componentes e do conjunto montado
<b>Naval</b>	Alinhamento de blocos de navios Medições de navios e medições de subconjuntos
<b>Outros</b>	Monitoramento da deformação de torres de resfriamento Medição de grandes antenas parabólicas Alinhamento e posicionamento de máquinas

Fonte: Schmitt et al.( 2016).

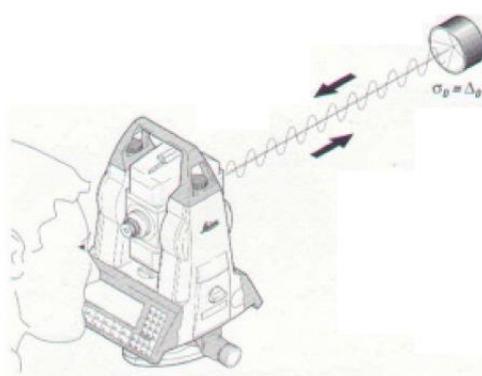
## 2.5. Estação Total Robotizada

Pode-se dizer que uma estação total é um conjunto de três equipamentos, um teodolito eletrônico, sendo que um teodolito é um equipamento destinado a medições de ângulos, um distanciômetro eletrônico (medida linear) e um processador matemático.

### 2.5.1. Características

A Estação Total, representada na Figura 18, é um equipamento derivado dos teodolitos, que mede além dos ângulos horizontal e vertical, a distância até o alvo por meio de um feixe de laser infravermelho, que é emitido do centro da luneta e, ao atingir um prisma (alvo refletor), retorna à posição inicial. Esses dados são convertidos pelo software embarcado no sistema para coordenadas cartesianas, obtendo-se a posição do alvo no espaço (Figura 19). (VIEIRA, 2003).

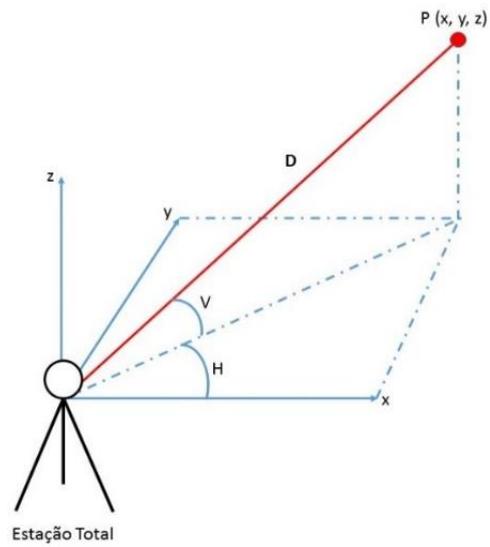
Figura 18: Medição com Estação Total



Fonte: Vieira (2013).

A Estação Total Robotizada (ETR) tem a vantagem de realizar centragem automática, ou seja, a cada medição, o sistema se ajusta e lê no ângulo horizontal correto, perfeitamente no centro do prisma, aumentando a precisão nas medições. Além disso, é possível controlar a estação total via controladora com sinal de rádio, o que garante rendimento e produtividade.

Figura 19: Localização de um alvo por meio de uma Estação Total



Fonte: Autora (2016).

No próximo capítulo será apresentada a metodologia utilizada para realização do procedimento de calibração e avaliação de desempenho.

### 3. METODOLOGIA

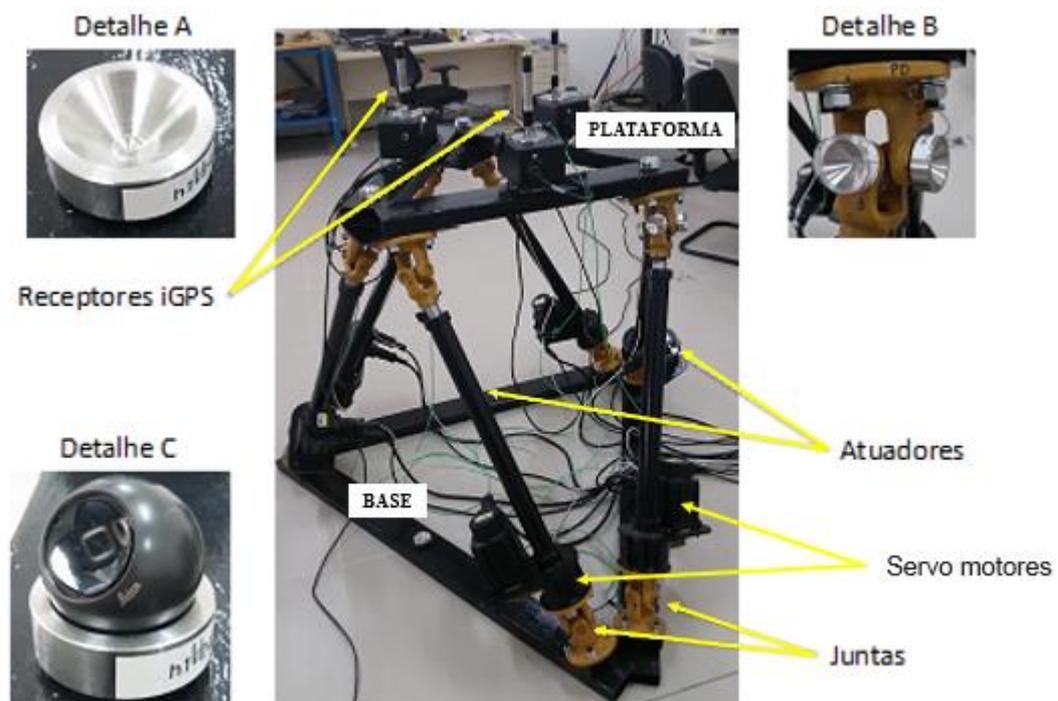
Os equipamentos utilizados nos experimentos e os procedimentos de medição e análise dos dados são descritos a seguir:

#### 3.1. Equipamentos

##### 3.1.1. Plataforma de Stewart

Nos experimentos, foi utilizada uma Plataforma de Stewart, projetada e fabricada no Laboratório de Geodésia Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 20).

Figura 20: Plataforma de Stewart – Laboratório de Geodésia Industrial.



Fonte: Autora (2017).

O extremo inferior do atuador é conectado à base por meio de uma junta universal, e o extremo superior do atuador também é conectado à plataforma móvel por meio de uma junta universal. A plataforma superior móvel tem seis graus de liberdade dentro de seu volume de

trabalho, em relação à base. O movimento relativo entre plataforma e base é produzindo variando o comprimento dos atuadores lineares acionados por servo motores.

O sistema coordenado da base e da plataforma foi definido por três pontos. Esses pontos foram materializados através de ninhos cinemáticos (cilindros metálicos com cones internos) e os mesmos foram fixos na base e na plataforma (Figura 20 – Detalhe A). Uma junta universal ou junta Cardan (Figura 20 – Detalhe B), utilizada na plataforma, é um acoplamento de um eixo que transfere o movimento em outra direção sem modificar o sentido de giro. A junta é constituída por um par de dobradiças unidas por uma cruzeta. É usada principalmente para transmissão de torque entre eixos que estão sob diferentes orientações. A plataforma de Stewart possui no total seis juntas universais fixas à base e seis juntas universais fixas à plataforma. Elas foram escolhidas de tal modo a atender as exigências de projeto, devendo ser robustas, mas de baixo custo (Figura 21).

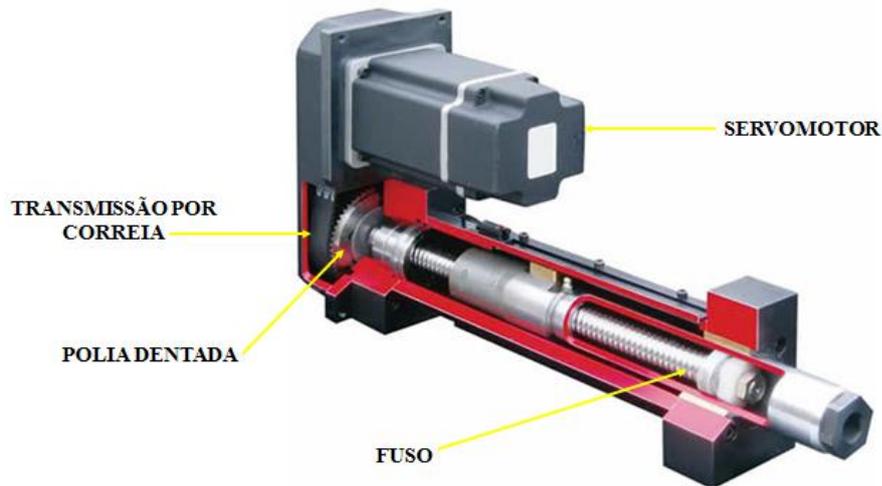
Figura 21: Junta universal (Junta Cardan).



Fonte: Disponível em: <http://www.aemco.com.br/conteudo/juntas>, acessado em setembro/2017.

Um atuador linear acionado por um servo motor foi a escolha para o projeto da plataforma. Esses atuadores funcionam convertendo energia de movimento do motor, em movimento linear. O acoplamento é realizado por correia, e um sistema mecânico de transformação de torque em força, que no caso é um fuso que transforma o torque do motor elétrico numa força linear que movimenta os atuadores da plataforma (Figura 22).

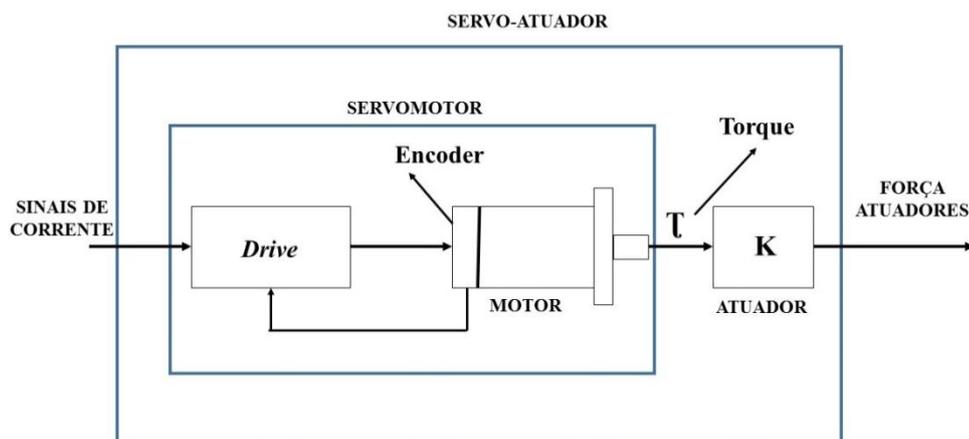
Figura 22: Exemplo de Atuador Linear eletromecânico.



Fonte: Disponível em: <https://johnbrooks.co.nz/e-drive-ball-and-roller-screw-actuators>, acessado em setembro/2017.

O servo motor é composto por um *drive*, motor elétrico e um *encoder* alojado na carcaça do motor elétrico. O *encoder* converte movimentos rotativos em pulsos elétricos de onda quadrada, fornecendo uma quantidade fixa de pulsos por volta de um eixo ou por unidade de deslocamento linear. O conjunto forma uma malha fechada de controle, cuja grandeza de controle é a corrente de alimentação do motor, que segundo a configuração do *drive* pode representar um torque desejado ou uma velocidade desejada. A corrente de alimentação do motor é aumentada ou reduzida em função do sinal lido no *encoder*, determinando assim a aceleração e velocidade de rotação do motor (Figura 23). No total são utilizados seis servos motores acoplados aos seis atuadores lineares da plataforma.

Figura 23: Servo-Atuador – Circuito simplificado.

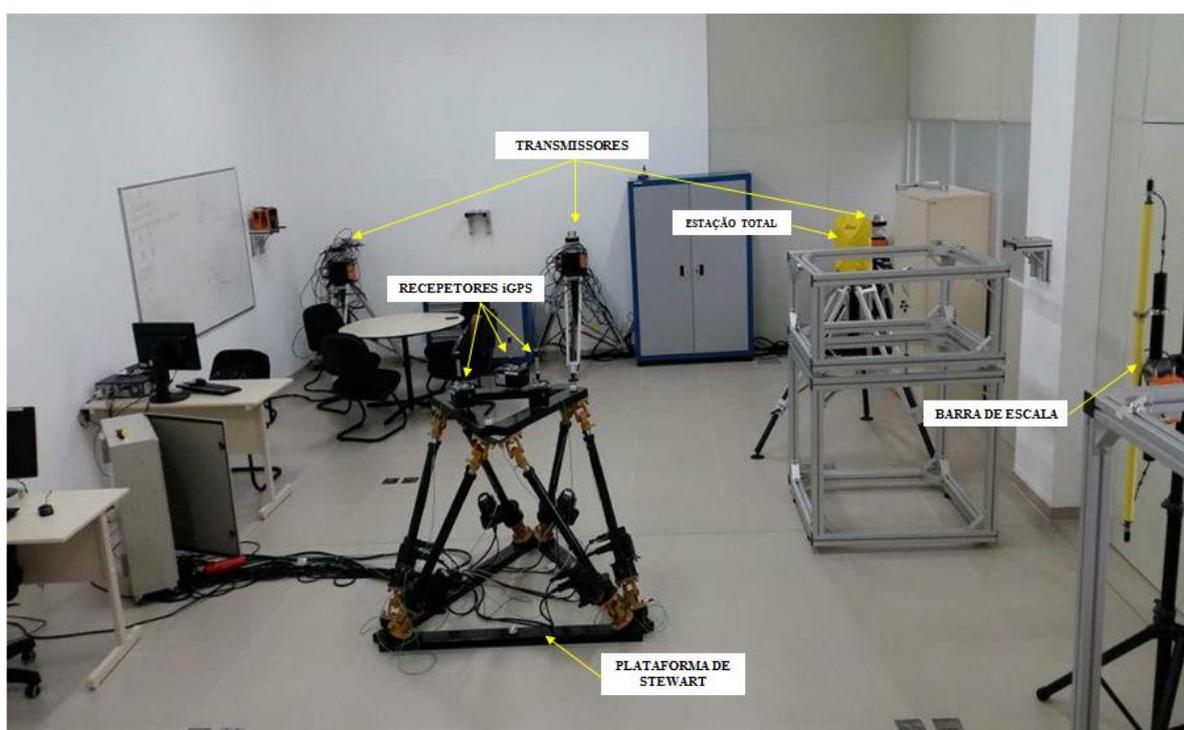


Fonte: Autora (2017).

### 3.1.2. Indoor-GPS (GPS)

O sistema de medição *indoor-GPS* (iGPS) disponível no Laboratório de Geodésia Industrial é composto de cinco transmissores, que são distribuídos no ambiente de trabalho (Figura 24), e sensores que são associados aos pontos a serem medidos. A exatidão especificada do iGPS é de 0,50 mm para um alcance de medição de 55m. O erro máximo obtido em condições de laboratório é de  $E_M = 0,2$  mm, O erro pode ser minimizado pela adição de mais transmissores (NIKON METROLOGY, 2011).

Figura 24: Disposição dos transmissores no ambiente de trabalho (Laboratório de Geodésia Industrial).

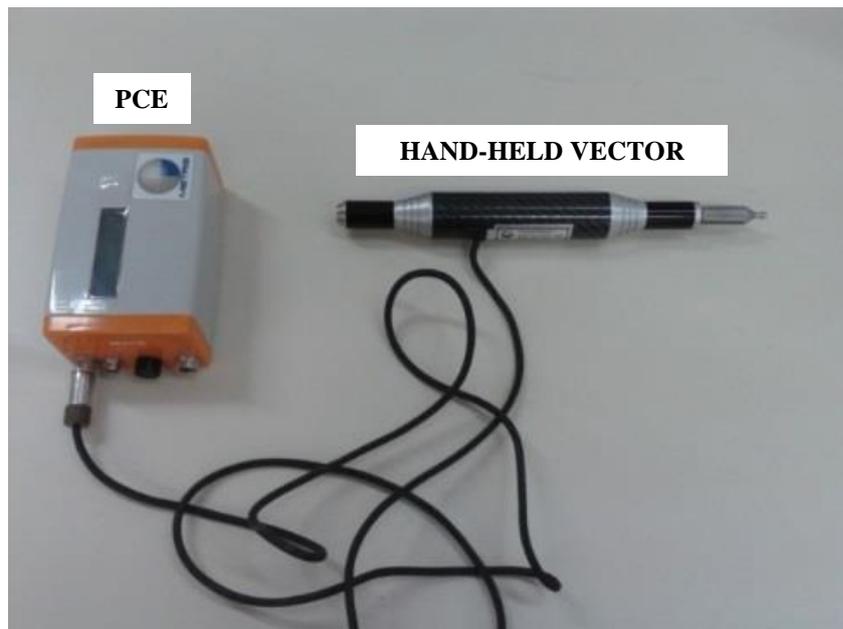


Fonte: Autora (2017).

Os equipamentos que fazem parte do sistema de medição são descritos a seguir:

- Hand-Held Vector Bar: O mesmo é conectado ao PCE (*Position Calculation Engine*), que mede hora de chegada de cada sinal através de um relógio interno, e gerencia comunicação com o computador (Figura 25).

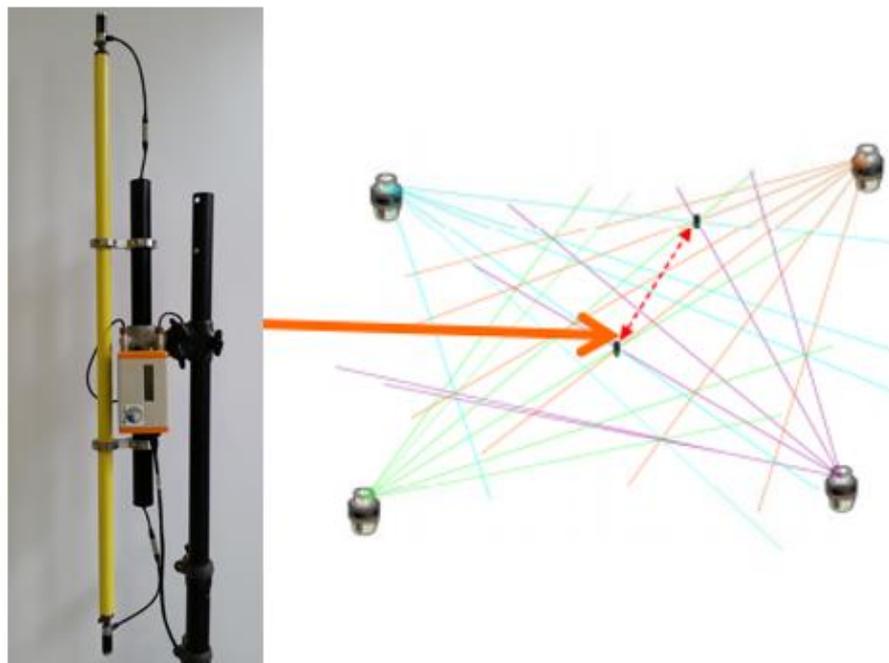
Figura 25: Hand-Held Vector bar conectado ao PCE



Fonte: Autora (2017).

- Barra de escala: Utilizada para determinar as posições e orientações dos transmissores do iGPS no espaço de trabalho durante a fase de setup do sistema. (Figura 26).

Figura 26: Barra de escala



Fonte: Autora (2017).

- Tripés: Responsáveis por apoiar os transmissores em experimentos de campo (Figura 27).

Figura 27: Tripé para transmissores



Fonte: Nikon Metrology (2017).

- Transmissores: responsáveis por enviar sinais aos receptores. Os mesmos são montados em suas caixas transmissoras, que podem ser fixados em tripés ou suportes fixos na parede (Figura 28).

Figura 28: Transmissor junto a caixa transmissora

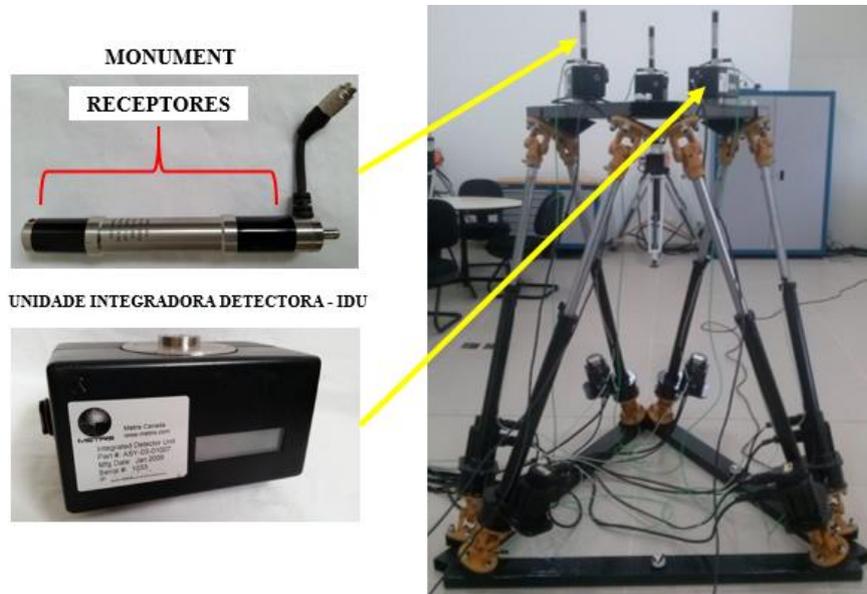


Fonte: Nikon Metrology (2017).

- Unidades integradas de detecção (IDU): São mantidas fixas em pontos de objetos/equipamentos que se deseja realizar rastreamento. Esses dispositivos são

compostos de um par de receptores fixados a uma caixa que contém um amplificador de sinal e um PCE. (Figura 29).

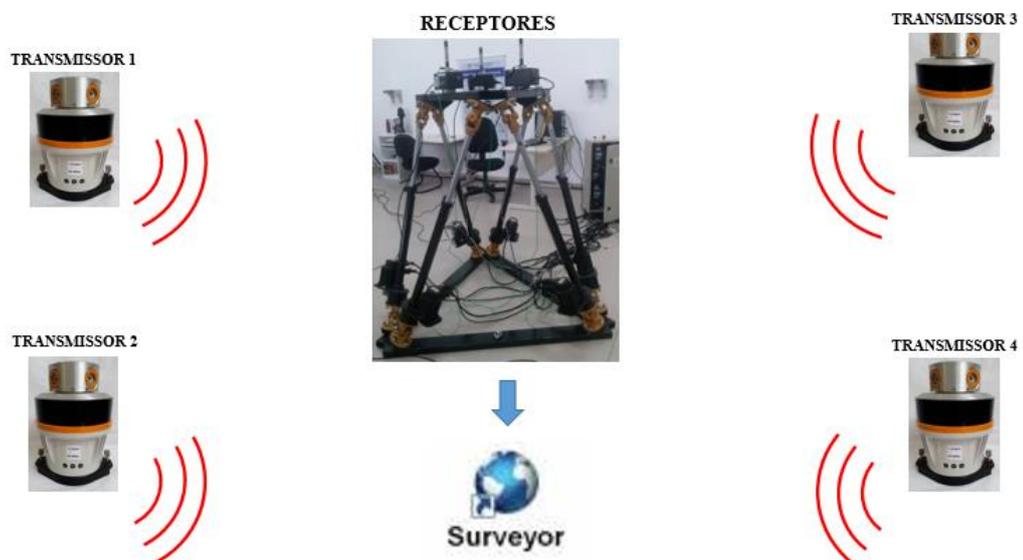
Figura 29: Unidades integradas de detecção fixadas na plataforma.



Fonte: Autora (2017).

- Software *iGPS Surveyor*: O coração do sistema iGPS é o software *Surveyor*. Ele se conecta aos PCEs, coleta dados dos sensores e disponibiliza a localização dos receptores (Figura 30) (DEPENTHAL, 2010).

Figura 30: Representação do sistema iGPS.



Fonte: Autora (2017).

### 3.1.3. Estação Total Robótica

O equipamento utilizado nesse trabalho é uma estação total robótica modelo TS 12 da Leica Geosystems, produzida em 2015. Para esse modelo, o fabricante especifica um erro máximo de 1,0 mm + 1,5 ppm para medições de comprimento e de 7" para medições de ângulo. A faixa de medição é de até 3500 m (Figura 31).

Figura 31: Estação Total Robotizada utilizada nas medições.



Fonte: Autora (2017).

Todas as especificações são válidas quando são utilizados alvos adequados. Nesse projeto, utilizou-se como alvo um refletor do tipo *spherical mounted cube-corner reflector* (SMR) com 38,1 mm (1,5 pol) de diâmetro. Os refletores são apoiados nos ninhos cinemáticos da plataforma (Figura 32).

Os dados coletados pela estação total são processados com o auxílio do software *Spatial Analyzer*, sendo este um software de metrologia para aplicações de grande escala. Ele facilita a integração dos dados com múltiplos instrumentos (Laser Trackers, iGPS, MMC, Estações totais, Laser Scanners, etc.).

Figura 32: *Spherical mounted cube-corner reflector (SMR)* – Alvo refletor da estação total.



Fonte: Autora (2017).

### 3.2. Procedimento Experimental

A seguir são discutidos os procedimentos adotados na calibração e na avaliação preliminar de exatidão da plataforma de Stewart.

#### 3.2.1. Calibração

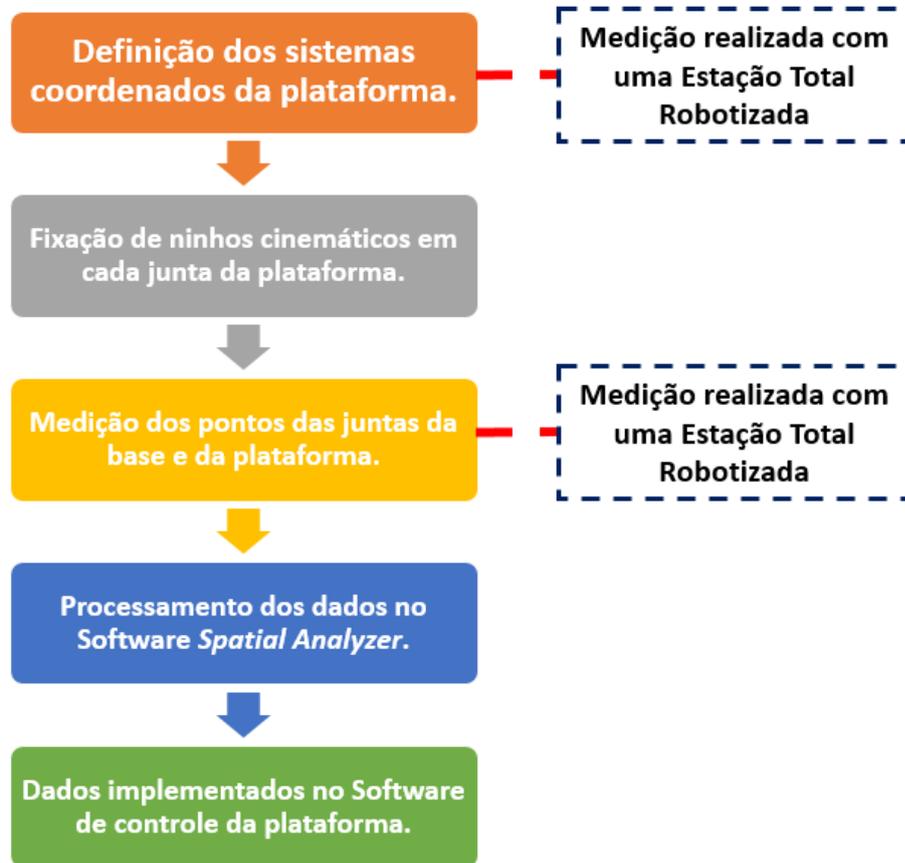
A calibração neste trabalho se limita à determinação das características geométricas do robô por meio de medição direta dos parâmetros de interesse utilizando-se um sistema indoor-GPS e de uma estação total robotizada como sistemas de medição de referência. Diferentemente da calibração tradicional, que confere ao robô, uma compensação dos eventuais desvios dentro do algoritmo de controle.

Por meio da calibração, quantificaram-se os seguintes parâmetros geométricos da plataforma de Stewart.

1.  $\mathbf{x}_{B,i}$  ( $i= 1, 2, \dots, 6$ ): Posições dos centros das juntas da base em relação ao sistema coordenado da base da plataforma.
2.  $\mathbf{x}_{P,i}$  ( $i= 1, 2, \dots, 6$ ): Posições dos centros das juntas da plataforma em relação ao sistema coordenado da plataforma.
3.  ${}^B\mathbf{T}_P$ : Matriz de transformação homogênea do sistema coordenado da plataforma para o sistema coordenado da base quando a plataforma está na posição de fim-de-curso dos atuadores.
4.  $d_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ): Fatores de conversão entre a contagem de pulsos no *encoder* do servo-motor e o deslocamento efetivo do atuador.

A seguir, é apresentando o procedimento de medição realizado para determinação dos centros das juntas. O procedimento seguiu a seguinte sequência (Figura 33):

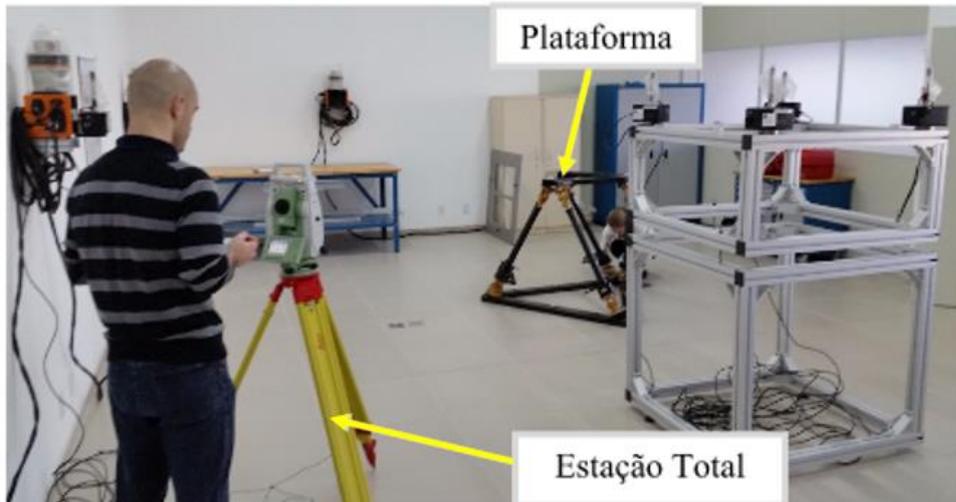
Figura 33: Procedimento de medição para determinação dos centros das juntas.



Fonte: Autora (2017).

Tanto a base quanto a plataforma possuem três pontos materializados através de cilindros metálicos com cones internos (ninhos cinemáticos), o que garante elevada repetibilidade nas medições. Esses pontos foram utilizados para definir os sistemas coordenados da plataforma de Stewart. As coordenadas ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) de cada ponto foram determinadas com auxílio da estação total robótica. Para determinar as posições dos centros das juntas  $\mathbf{x}_{B,i}$  e  $\mathbf{x}_{P,i}$ , foram fixados quatro ninhos em cada junta. As posições foram capturadas com o auxílio da estação total e de um alvo (refletor esférico) posicionado no ninho cinemático. A estação total foi posicionada em diversas posições ao redor da plataforma de modo a visualizar e medir todos os pontos das juntas (Figura 34).

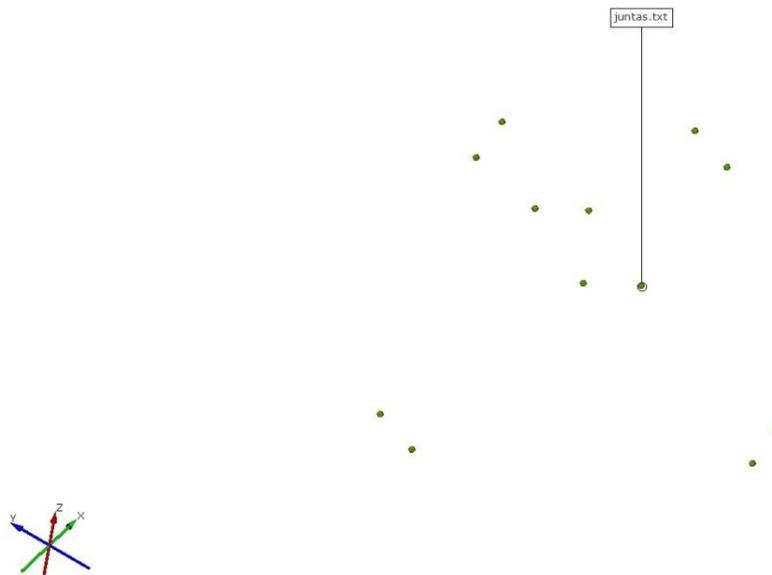
Figura 34: Medição dos pontos das juntas da plataforma de Stewart com a estação total.



Fonte: Autora (2017).

O processamento dos dados coletados foi realizado no software metrológico *Spatial Analyzer* (Figura 35).

Figura 35: Interface do Software *Spatial Analyzer* – Localização das juntas.



Fonte: Autora (2017).

A posição do centro da junta universal corresponde a intersecção dos eixos de cada dobradiça, ou corresponde ao centro da cruzeta que liga as duas dobradiças. Cada um dos eixos das dobradiças foi definido pela reta que liga os dois ninhos cinemáticos fixados nas juntas, e a intersecção desses eixos é definido como centro da junta (Figura 36).

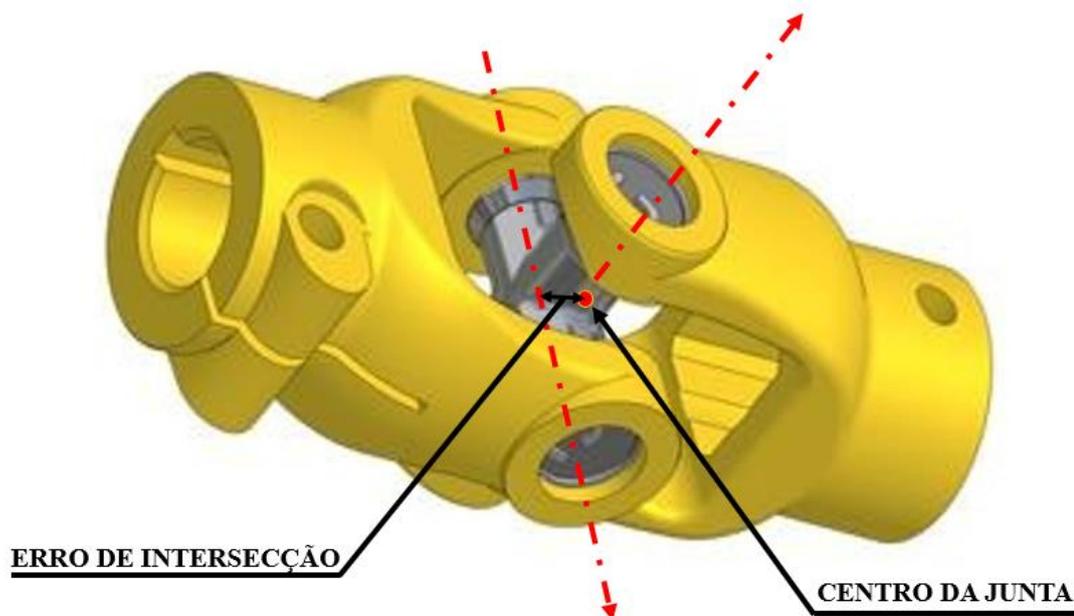
Figura 36: Localização do centro das junta.



Fonte: Autora (2017).

Porém, devido às imperfeições mecânicas, de montagem e à incerteza do processo de medição, a intersecção desses eixos não é exata. Logo, definiu-se como centro da junta, a intersecção entre o eixo da dobradiça que está acoplado na plataforma e na base, e a perpendicular ao eixo da dobradiça que está acoplado no atuador. O comprimento da perpendicular entre os dois eixos corresponde ao erro de intersecção da junta (Figura 37). Esse erro foi medido através do software *Spatial Analyzer* e registrado.

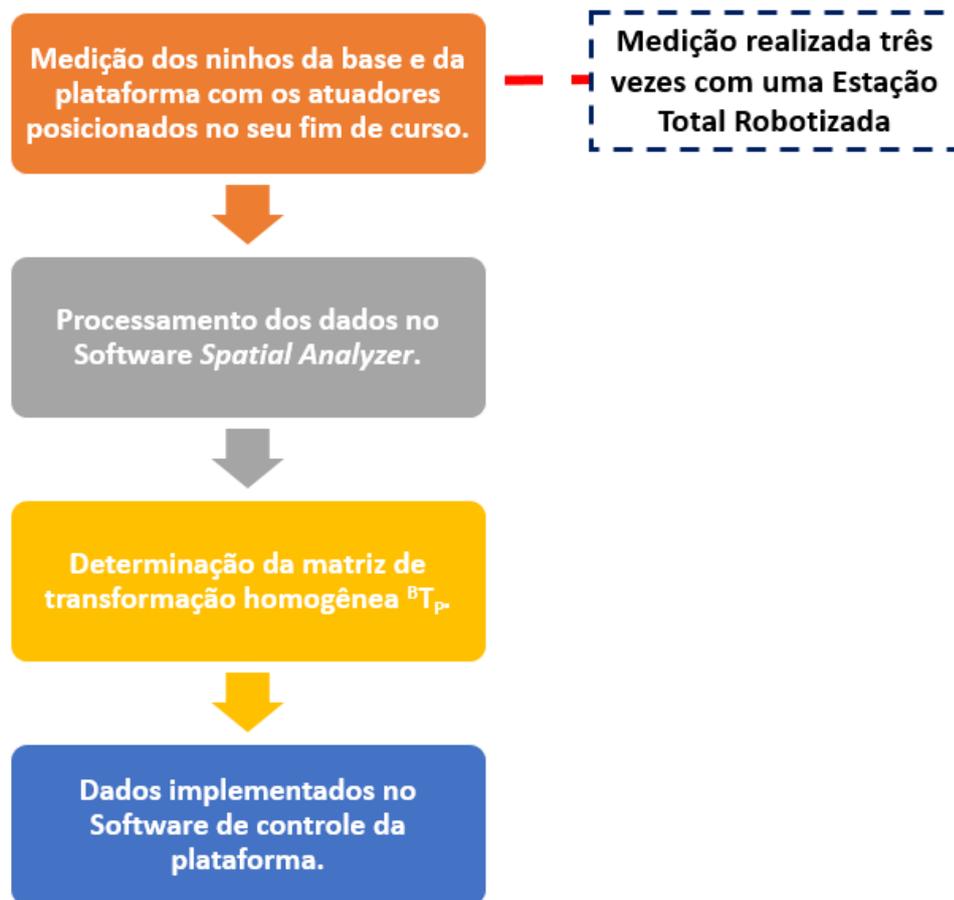
Figura 37: Localização do centro da junta e erro de intersecção.



Fonte: Autora (2017).

Após a medição dos pontos das juntas, determinou-se a matriz de transformação homogênea  ${}^B T_P$  do sistema coordenado da base em relação ao sistema coordenado da plataforma com a estação total robótica. A matriz homogênea representa a situação ou posição (posição e orientação) de um referencial móvel (plataforma) em relação a um referencial fixo (base). O procedimento seguiu a seguinte sequência (Figura 38):

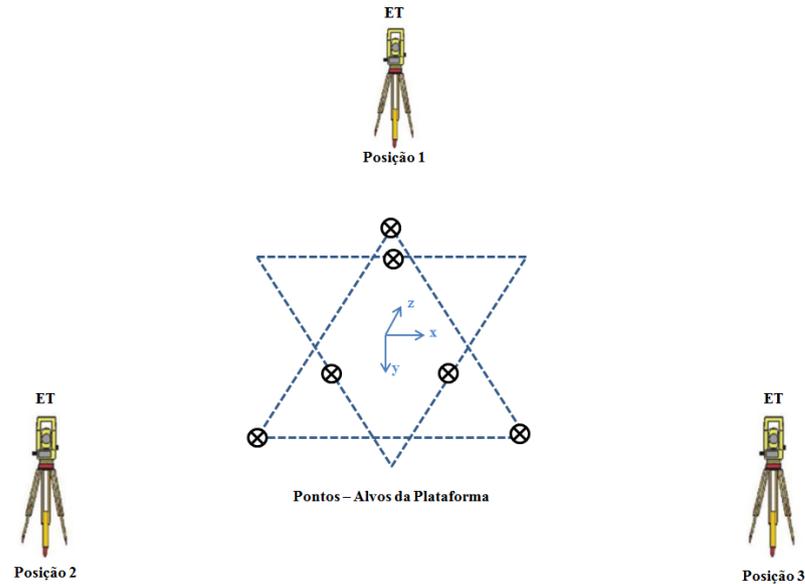
Figura 38: Procedimento para determinação da matriz de transformação homogênea.



Fonte: Autora (2017).

A posição dos três ninhos da base, e dos três ninhos da plataforma foi medida com os atuadores da plataforma de Stewart posicionados no seu fim de curso (origem). Foram realizados três ciclos de medições. Para cobrir todos os pontos-alvos, a estação total foi deslocada para diferentes posições (Figura 39). A cada nova posição a mesma foi devidamente nivelada. Os dados foram repassados ao software *Spatial Analyzer*, foram processados e com o próprio software obteve-se a matriz de transformação homogênea.

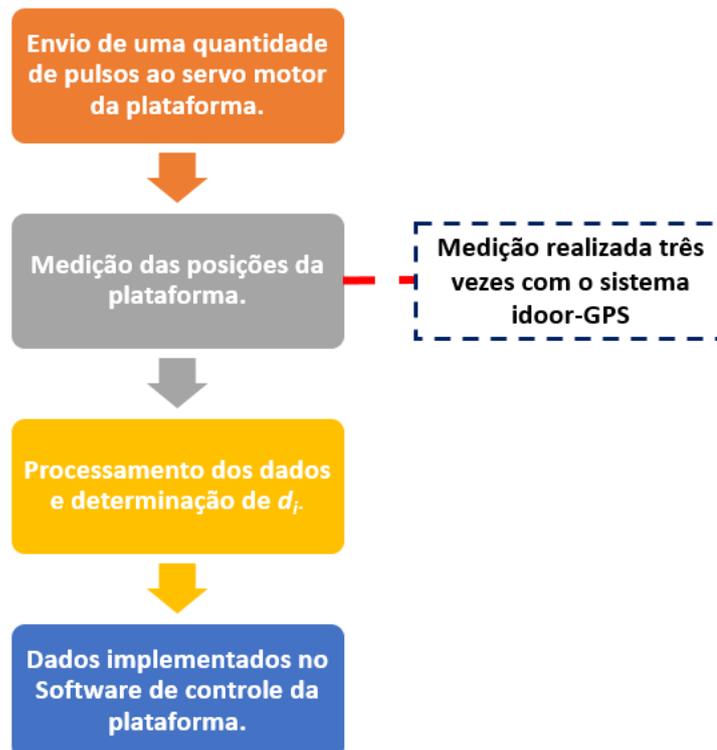
Figura 39: Medição dos pontos da base e da plataforma com a estação total.



Fonte: Autora (2017).

Em seguida, determinaram-se os fatores dos fatores de conversão  $d_i$  que relacionam a contagem de pulsos e o deslocamento efetivo do atuador. O procedimento seguiu a seguinte sequência (Figura 40):

Figura 40: Procedimento para determinação do fator de conversão  $d_i$ .



Fonte: Autora (2017).

Como explicado anteriormente, o servo-motor é alimentado com dados de posição em formato de pulsos elétricos originados nos *encoders*. Para uma quantidade de pulsos lidos nos *encoders*, o atuador linear se desloca em uma determinada distância em milímetros. A determinação dos fatores de conversão  $d_i$  que relacionam a contagem de pulsos no *encoder* do servo-motor e o deslocamento efetivo do respectivo atuador linear, foi realizada movimentando-se a plataforma para diversas posições, monitorando-se esse posicionamento com o sistema iGPS.

Três IDU, com seus respectivos receptores, foram fixadas sobre a plataforma (Figura 20). As posições dessas unidades foram associadas ao sistema coordenado da Plataforma de Stewart e aos centros das juntas, anteriormente determinados. Essa associação permitiu que o sistema iGPS monitorasse a posição dos centros das juntas da plataforma em relação ao sistema coordenado da base, quando a plataforma é movimentada. A tabela a seguir apresenta as os pulsos enviados para plataforma, afim de medir a posição em milímetros realizado pela plataforma. Foram realizados três ciclos de medições (Tabela 3).

Tabela 3: Pulso enviados a plataforma afim de determinar os fatores  $d_i$ .

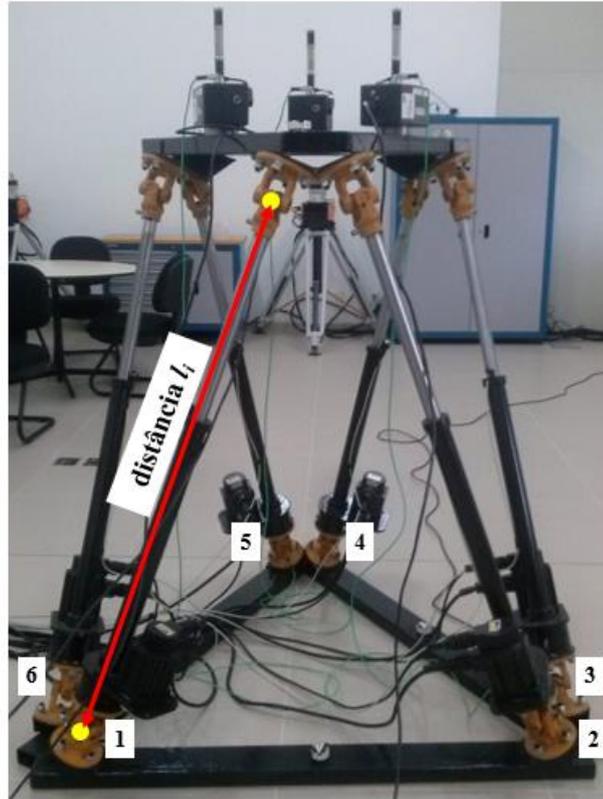
$n_p$	Pulsos
1	Fim de curso
2	10000
3	94000
4	195200
5	296400
6	397600
7	498800
8	60000
9	605000

Fonte: Autora (2017).

Antes da captura dos pontos, o sistema iGPS foi calibrado com a barra de escala, a fim de determinar as posições e orientações dos transmissores do iGPS no volume de trabalho. A partir da posição de origem (atuadores posicionados no fim de curso) todos os atuadores foram movimentados até que um determinado número de pulsos  $n_p$  fosse contado no *encoder* do servo-motor. Para cada posição, foram registradas as posições das juntas da

plataforma em relação ao sistema coordenado da base e determinado a distância  $l_i$  entre os centros das juntas da base e da plataforma (Figura 41).

Figura 41: Distância  $l_i$  entre os centros das juntas.



Fonte: Autora (2017).

A relação entre a contagem de pulsos  $n_p$  e a distância percorrida pelo atuador linear  $l_i$  corresponde ao coeficiente  $d_i$  conforme a Equação 11 a seguir:

$$l_i = a_i + d_i n_i \quad (13)$$

Esse coeficiente foi determinado por regressão linear. A análise de regressão linear consiste na realização de uma análise estatística com o objetivo de verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes. Em outras palavras consiste na obtenção de uma equação que tenta explicar a variação da variável dependente pela variação da variável independente. Para cada contagem de pulsos, foram registradas a distância percorrida de cada atuador, nos três ciclos de medições.

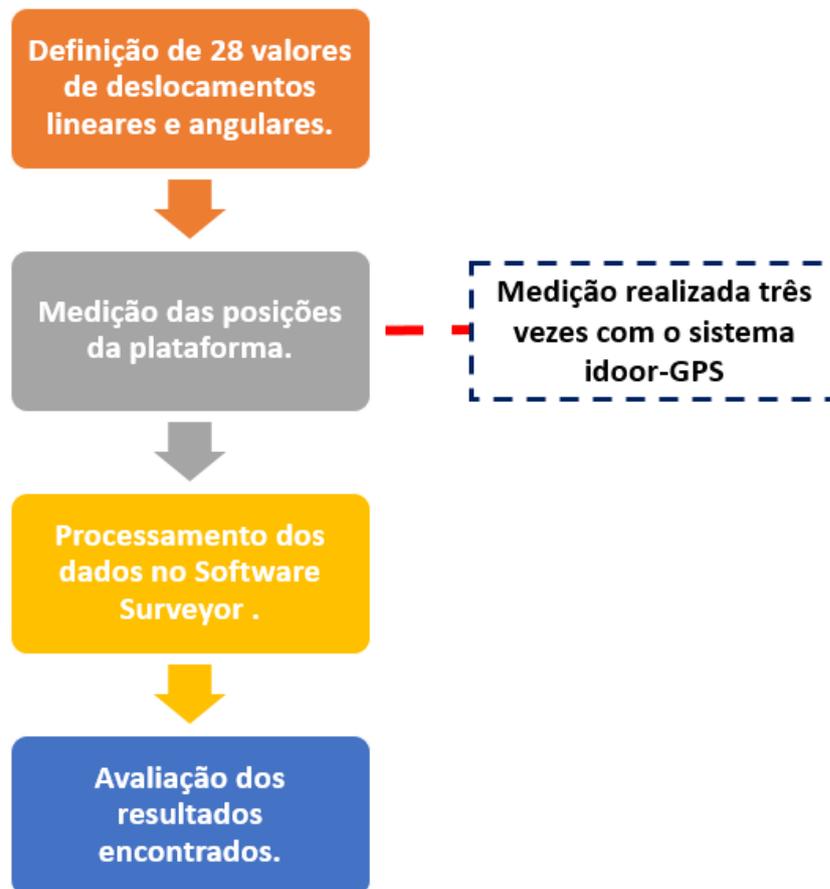
Como medida da qualidade de regressão linear, determinou-se o valor RMS (*root-mean-square*) através da Equação 12, onde  $\hat{l}_i$  corresponde ao deslocamento observado e  $l_i$  ao deslocamento determinado através da Equação 11. Ou seja, o RMS mede o erro existente entre dois conjuntos de dados, comparando um valor previsto e um valor observado.

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum(\hat{l}_i - l_i)^2}{n}} \quad (12)$$

### 3.2.2. Avaliação preliminar de desempenho

Como mencionado anteriormente, os parâmetros determinados na etapa de calibração foram inseridas no software de controle da plataforma de Stewart. Com o intuito de verificar o desempenho do manipulador após a implementação desses parâmetros, realizou-se uma avaliação preliminar de posicionamento, que seguiu a seguinte sequência (Figura 42):

Figura 42: Procedimento realizado na avaliação de desempenho.



Fonte: Autora (2017).

Definiu-se primeiramente os valores de deslocamentos lineares (x,y e z) e angulares (roll, pitch e yaw), que a plataforma realizaria (Tabela 4).

Tabela 4: Valores pré-definidos de deslocamentos lineares e angulares do manipulador.

Posição	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta R_x$ (roll)	$\Delta R_y$ (pitch)	$\Delta R_z$ (yaw)
1	Fim de curso					
2	0	0	300	0	0	0
3	Fim de curso					
4	0	0	500	0	0	0
5	Fim de curso					
6	300	0	300	0	0	0
7	Fim de curso					
8	-300	0	300	0	0	0
9	Fim de curso					
10	0	300	300	0	0	0
11	Fim de curso					
12	0	-300	300	0	0	0
13	Fim de curso					
14	0	0	300	15	0	0
15	Fim de curso					
16	0	0	300	-15	0	0
17	Fim de curso					
18	0	0	300	0	15	0
19	Fim de curso					
20	0	0	300	0	-15	0
21	Fim de curso					
22	0	0	300	0	0	15
23	Fim de curso					
24	0	0	300	0	0	-15
25	Fim de curso					
26	150	150	150	5	5	5
27	Fim de curso					
28	-150	-150	150	-5	-5	-5

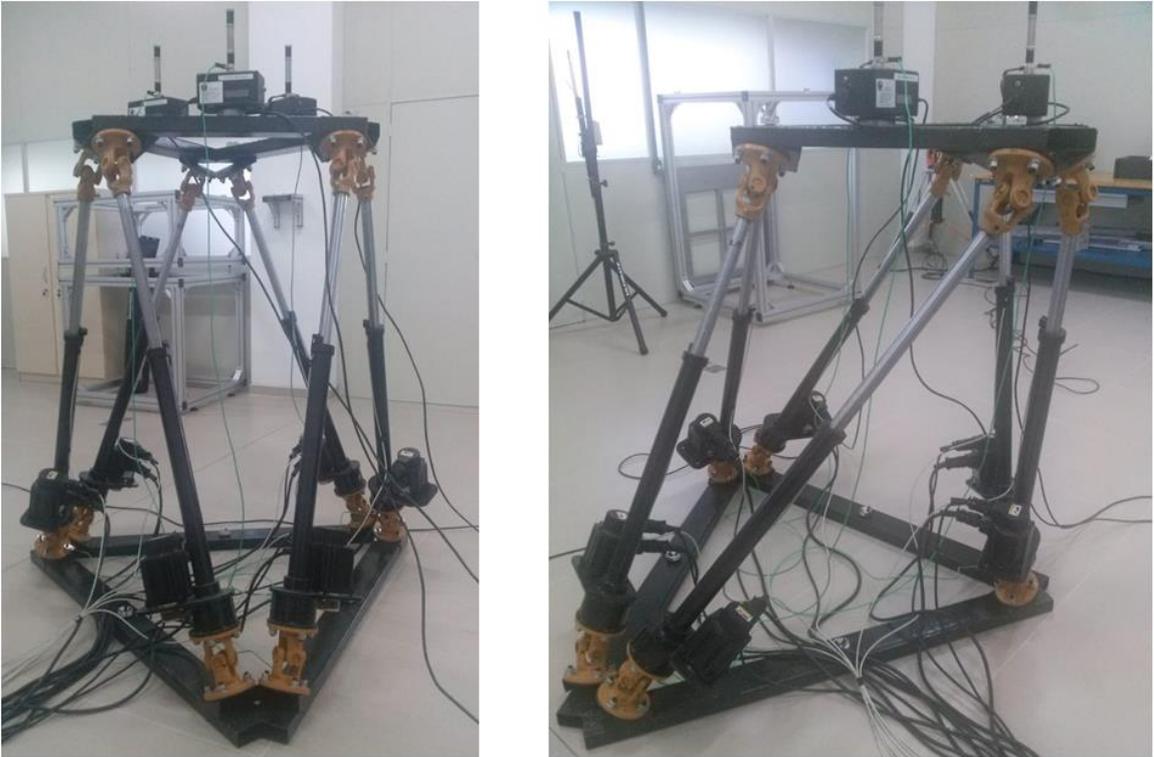
Fonte: Autora (2017).

Antes da captura dos pontos, o sistema iGPS foi calibrado com a barra de escala, a fim de determinar as posições e orientações dos transmissores do iGPS no volume de trabalho. A posição dos três ninhos cinemáticos superiores (plataforma) foi capturada manualmente com o auxílio do Hand-Held Vector Bar, assim como a posição dos três ninhos inferiores (base). As posições das unidades detectoras foram associadas ao sistema coordenado da plataforma móvel, permitindo que o sistema iGPS monitorasse a posição dos ninhos superiores da plataforma em relação ao sistema coordenado da base, quando a plataforma é movimentada. Os deslocamentos foram realizados com a plataforma de Stewart posicionada aproximadamente no centro do volume de medição do sistema iGPS.

As 28 posições foram medidas com o sistema iGPS e o ciclo de medição foi repetido três vezes. Os deslocamentos lineares e de pequenos ângulos, foram reproduzidos sem problemas pela plataforma. A posição  $\Delta z = 500$  mm e o ângulo de  $15^\circ$  foram definidos como as posições limites na qual a plataforma poderia atingir, evitando que os atuadores excedessem seu limite e se “soltassem” da plataforma.

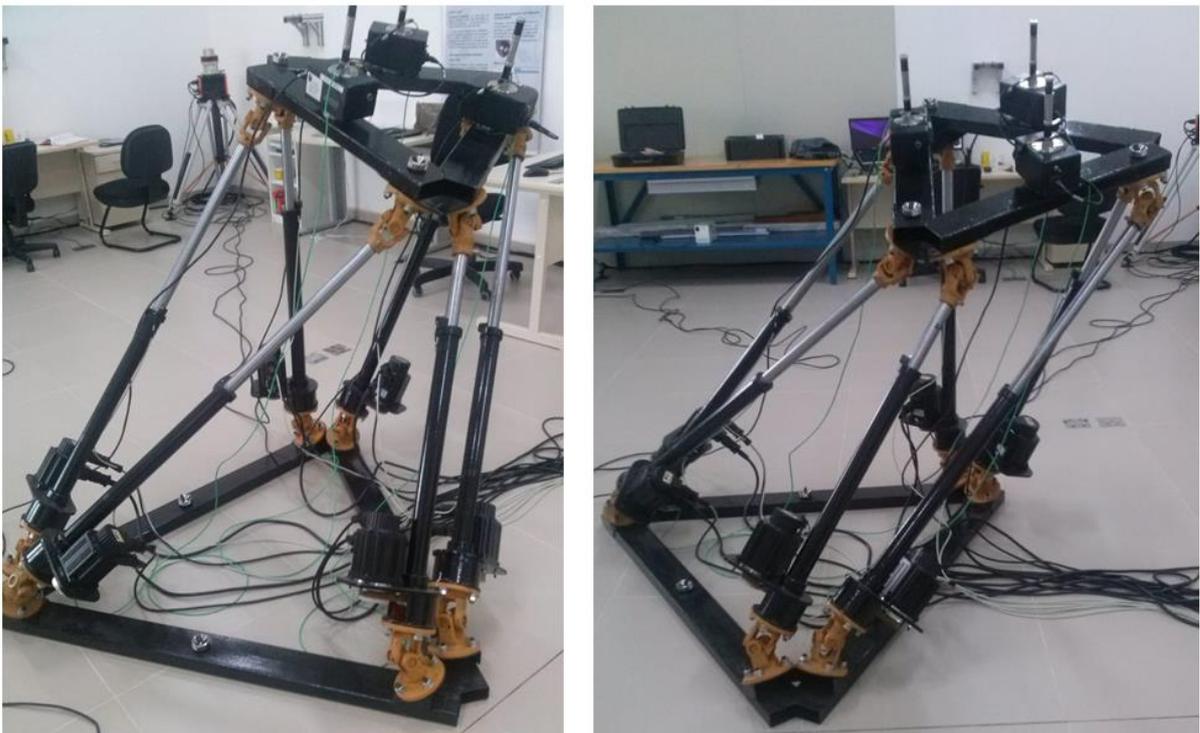
A seguir exemplos de deslocamentos lineares limites realizados pelo manipulador (Figura 43). Algumas posições como 26 e 28 exigiram que a plataforma se deslocasse em todas as posições lineares e angulares, conforme apresentado na Tabela 13 (Apêndice A). Tais posições exigiram que alguns atuadores atingissem seus limites de extensão (Figura 44).

Figura 43: Deslocamentos lineares limites realizados pela plataforma de Stewart.



Fonte: Autora (2017).

Figura 44: Deslocamentos lineares e angulares realizados pela plataforma de Stewart.



Fonte: Autora (2017).

### 3.3. Processamento dos dados

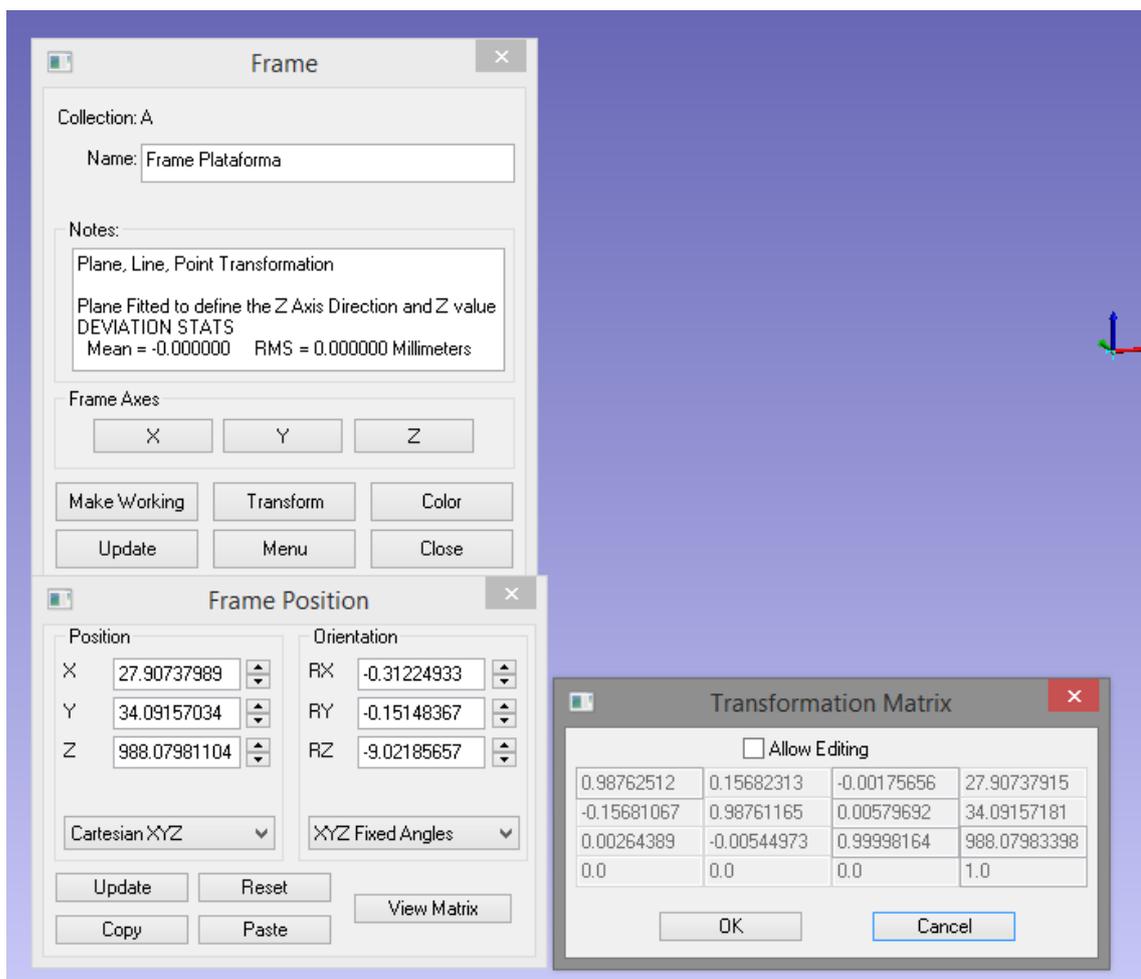
A seguir são apresentados os procedimentos adotados no processamento dos dados obtidos na calibração e na avaliação preliminar de exatidão da plataforma de Stewart.

#### 3.3.1. Obtenção dos centros das juntas e da matriz de transformação homogênea

Como apresentado anteriormente, o processamento dos pontos para a definição dos centros das juntas, foi realizado no software metrológico *Spatial Analyzer*. Através do software foi determinado o erro de intersecção da junta.

A matriz de transformação do sistema coordenado da plataforma para o sistema coordenado da base, na posição de fim-de-curso dos atuadores, também foi determinada com auxílio do software *Spatial Analyzer*, a partir dos pontos obtidos com a estação total (Figura 45).

Figura 45: Matriz de transformação homogênea (XYZ).



Fonte: Autora (2017).

### 3.3.2. Obtenção do fator de conversão $d_i$

Como demonstrado anteriormente, o coeficiente  $d_i$  foi determinado por regressão linear. A regressão linear tem duas finalidades, prever o valor de  $y$  a partir de  $x$ , e estimar o quanto  $x$  influencia ou modifica o valor de  $y$ . Da tabela  $x$ , denomina-se  $y$  como as distâncias dos atuadores e o valor de  $x$  como o número de pulsos  $n_p$ .

Pela Equação 11, apresentada no capítulo anterior,  $d_i$  é coeficiente de inclinação da linha de regressão linear, ele mede o aumento ou redução de  $y$  para cada aumento em  $x$ , e o coeficiente  $a_i$  é chamado de intercepto ou coeficiente linear, ou seja, é o valor que  $y$  assume quando  $x$  for zero, ou o ponto em que a linha de regressão linear corta o eixo  $y$ . Foram determinados os coeficientes para cada um dos seis atuadores da plataforma. O coeficiente  $d_i$  foi estimado pelo método dos mínimos quadrados, conforme a Equação 13 a seguir:

$$d_i = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

O coeficiente linear  $a_i$  foi estimado pela seguinte Equação 14.

$$a_i = \bar{y} - d\bar{x} \quad (14)$$

Onde:

$\bar{x}$ : Média dos valores  $x$ ;

$\bar{y}$ : Média dos valores  $y$ ;

$n$ : Número de atuadores da plataforma.

Os cálculos para determinar os coeficientes  $a_i$ ,  $d_i$  e os gráficos de dispersão foram realizados no Excel. Os pontos obtidos nos três ciclos de medição, e utilizados na realização dos cálculos de regressão linear são apresentados na Tabela 14 (Apêndice B).

### 3.3.3. Obtenção dos valores RMS

De posse dos deslocamentos dos atuadores determinados anteriormente, determinou-se o valor RMS (*root-mean-square*) através da Equação 12 apresentada no capítulo anterior. Os cálculos para determinar os valores RMS foram realizados no Excel.

### 3.3.4. Avaliação de desempenho

Na etapa de avaliação de desempenho determinou-se a média dos deslocamentos relativos em relação aos pontos definidos na Tabela 4. Os Erros de posicionamento linear e angular foram calculados em relação aos valores nominais apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Deslocamentos Nominais.

Posição	Deslocamentos Nominais					
	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta R_x$ (roll)	$\Delta R_y$ (pitch)	$\Delta R_z$ (yaw)
2 - 4	600	0	0	0	0	0
6 - 8	0	600	0	0	0	0
10 - 12	0	0	200	0	0	0
14 - 16	0	0	0	30	0	0
18 - 20	0	0	0	0	30	0
22 - 24	0	0	0	0	0	30
26 - 28	300	300	0	10	10	10

Fonte: Autora (2017).

O erro é definido como a diferença entre a média de um conjunto de dados, considerando suficientes medições e o resultado verdadeiro convencional (valor de referência), e é calculado através da seguinte Equação 15.

$$E = \bar{I} - VC \quad (15)$$

Onde:

$\bar{I}$ : Média das “ $n$ ” indicações;

$VC$ : Valor verdadeiro convencional.

Foram determinados também os valores de amplitudes das medições. A amplitude é definida como sendo a diferença entre o maior e o menor valor do conjunto de dados, e pode ser um indicador da repetibilidade. Logo, quanto menor o valor da amplitude, melhor é a repetibilidade da medição, ou seja, há uma baixa dispersão nos valores obtidos em relação a média. A amplitude é calculada através da seguinte Equação 16.

$$R = |I_{máx} - I_{mín}| \quad (16)$$

Onde:

$I_{máx}$ : Valor máximo obtido;

$I_{mín}$ : Valor mínimo obtido;

Os cálculos da análise de desempenho foram realizados no Excel. No Apêndice C são apresentados os dados das medições dos atuadores, em cada um dos pontos definidos no experimento, na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.

## 4. RESULTADOS

Nessa seção serão apresentados os resultados das etapas de calibração e avaliação de desempenho. Esses resultados serão discutidos na seção seguinte.

### 4.1. Calibração

A Tabela 6 resume os resultados da etapa de determinação das posições dos centros das juntas.

Tabela 6: Posições dos centros das juntas.

$i$	$\mathbf{x}_{B,i}$ [mm]	$\mathbf{x}_{P,i}$ [mm]
1	(-265,3; -435,7; 69,0)	(-35,2; -69,3; 820,3)
2	(-183,7; -576,1; 71,3)	(249,0; -579,7; 823,8)
3	(853,3; -595,6; 73,0)	(425,9; -581,0; 824,2)
4	(934,6; -450,0; 72,7)	(730,2; -75,3; 824,0)
5	(431,7; 449,1; 70,7)	(644,3; 77,6; 822,1)
6	(268,5; 451,0; 70,4)	(51,7; 79,7; 820,4)

Fonte: Autora (2017).

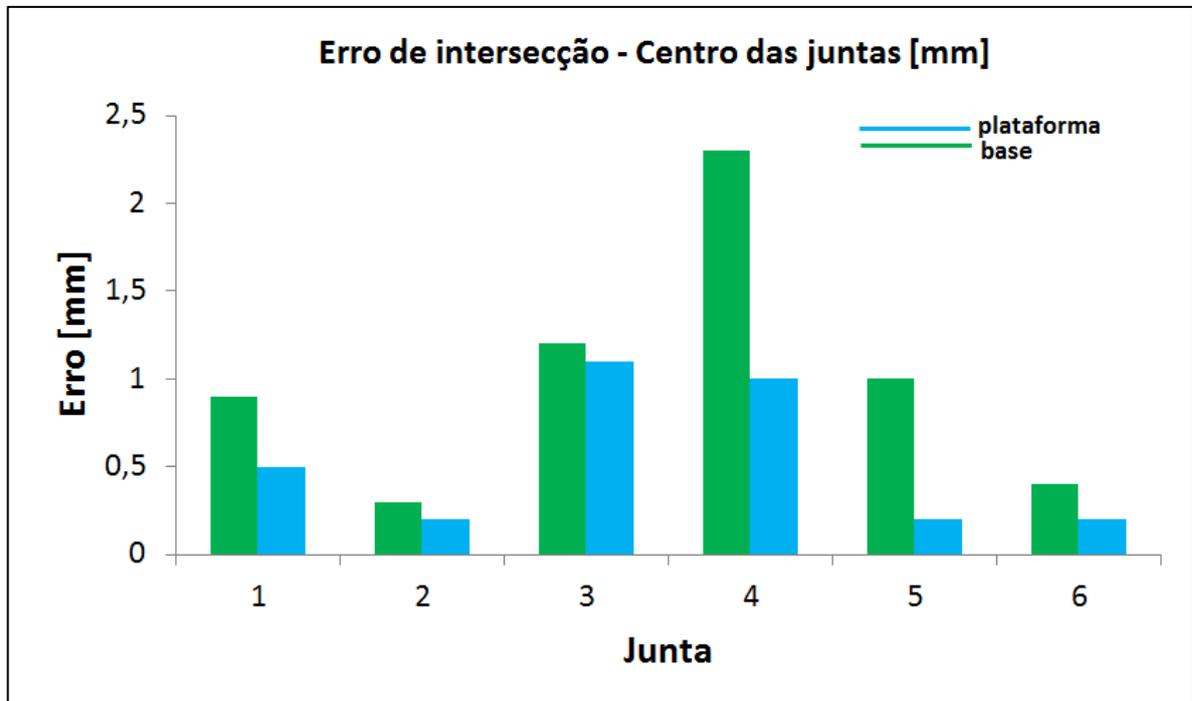
A Tabela 7 apresenta os erros de intersecção dos centros das juntas.

Tabela 7: Erros de intersecção dos centros das juntas.

$i$	$\mathbf{x}_{B,i}$ [mm]	$\mathbf{x}_{P,i}$ [mm]
	(EI) [mm]	(EI) [mm]
1	0,9	0,5
2	0,3	0,2
3	1,2	1,1
4	<b>2,3</b>	1,0
5	1,0	0,2
6	0,4	0,2

Fonte: Autora (2017).

Gráfico 1: Erro de Intersecção dos centros das juntas.



A matriz de transformação homogênea do sistema coordenado da plataforma para o sistema coordenado da base é apresentada na Equação 17.

$${}^B T_P = \begin{bmatrix} 0,98762 & 0,15682 & -0,00176 & 27,9 \\ -0,15681 & 0,98761 & 0,005796 & 34,1 \\ 0,00264 & -0,00545 & 0,99998 & 988,1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Fonte: Autora (2017).

Para cada atuador foi realizado uma análise de regressão linear, obtendo os coeficientes  $a$  e  $d$ , e os gráficos de dispersão que relaciona as variáveis  $x$  e  $y$  de cada atuador. A Tabela 8 apresenta os coeficientes  $a$  e  $d$  de cada um dos atuadores, assim como os deslocamentos  $l_i$  determinados através da Equação 11.

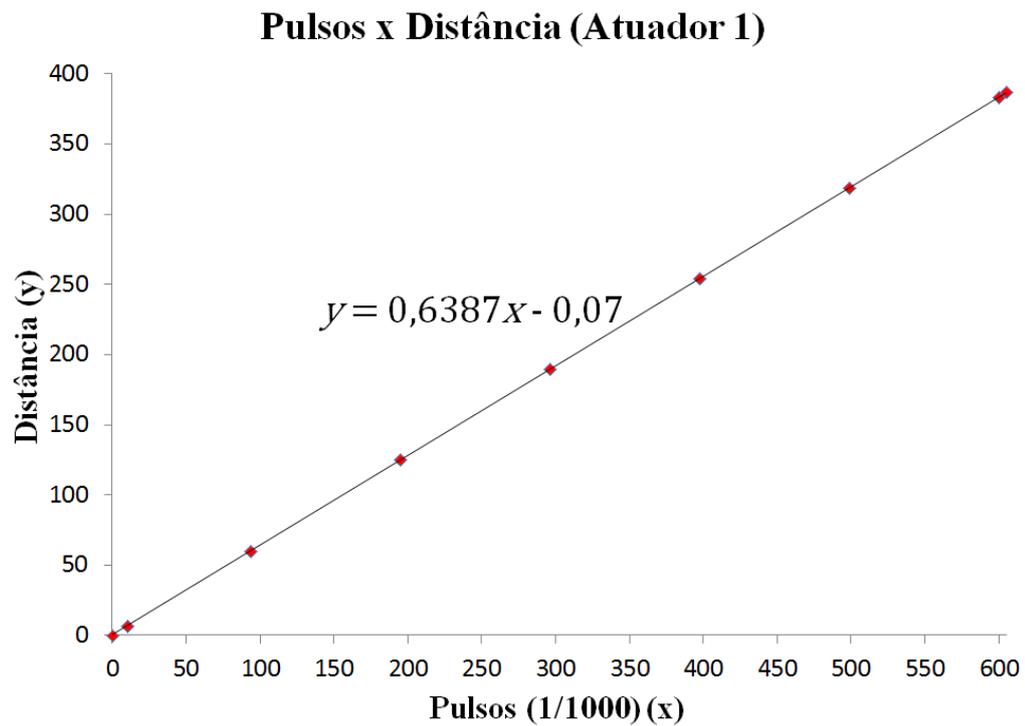
Tabela 8: Coeficientes  $a_i$ ,  $d_i$  e deslocamentos  $l_i$ .

$i$	$d_i$ [mm/10000 pulsos]	$a_i$ [mm/10000 pulsos]	$l_i$ [mm/10000 pulsos]
1	6,387	-0,07	6,387
2	6,367	-0,09	6,367
3	6,387	-0,06	6,387
4	6,375	-0,06	6,375
5	6,388	-0,12	6,388
6	6,379	-0,01	6,379

Fonte: Autora (2017).

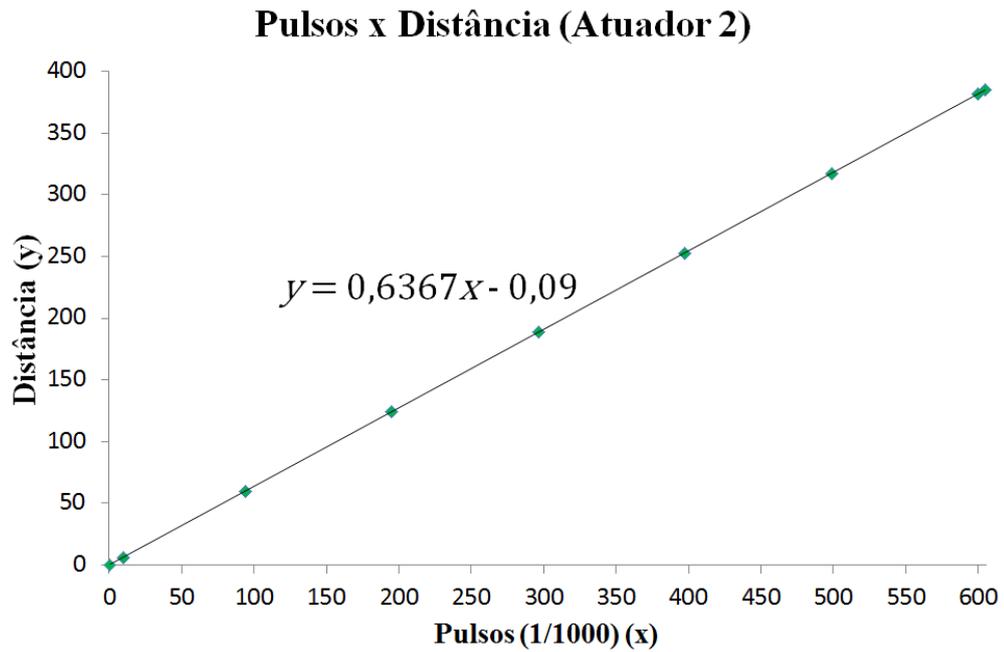
A seguir é apresentado o gráfico de regressão linear de cada um dos atuadores (Gráfico 2), (3), (4), (5), (6) e (7).

Gráfico 2: Gráfico de regressão linear – Atuador 1.



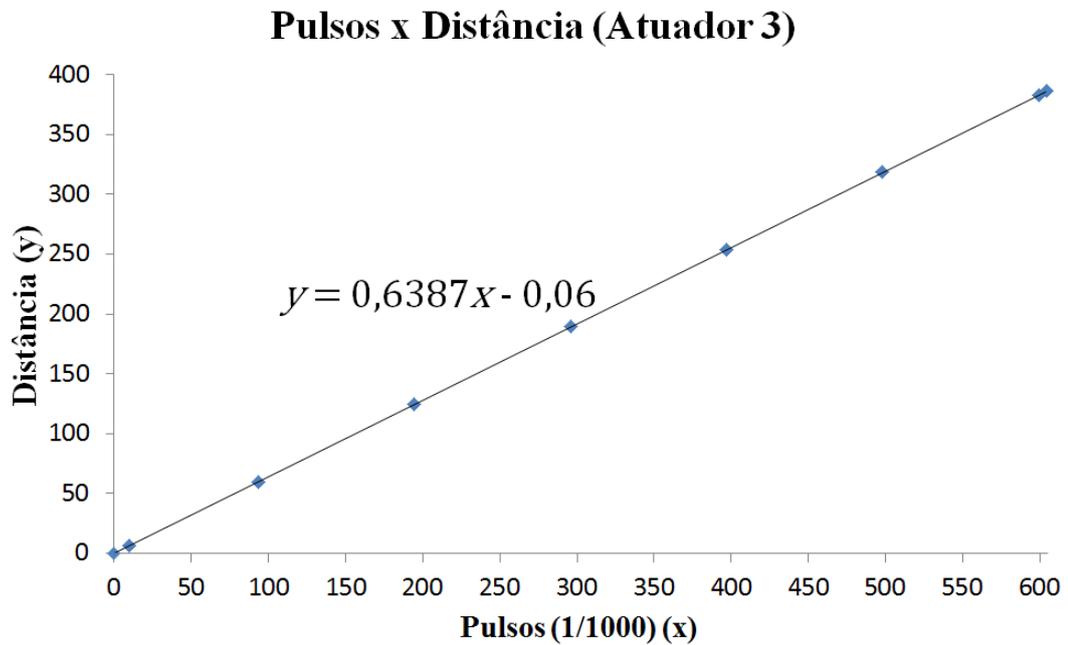
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 3: Gráfico de regressão linear – Atuador 2.



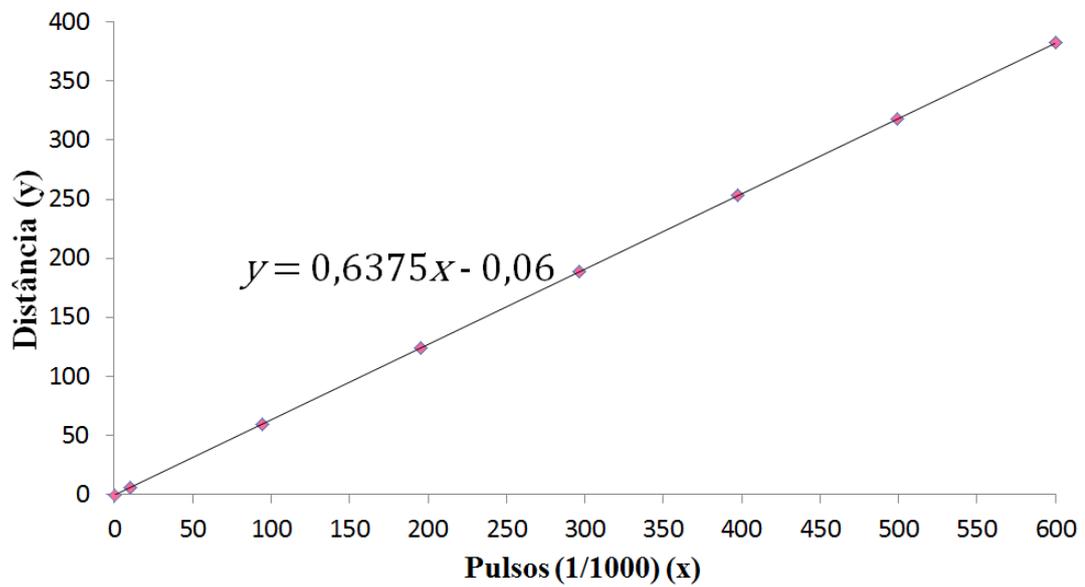
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 4: Gráfico de regressão linear – Atuador 3.



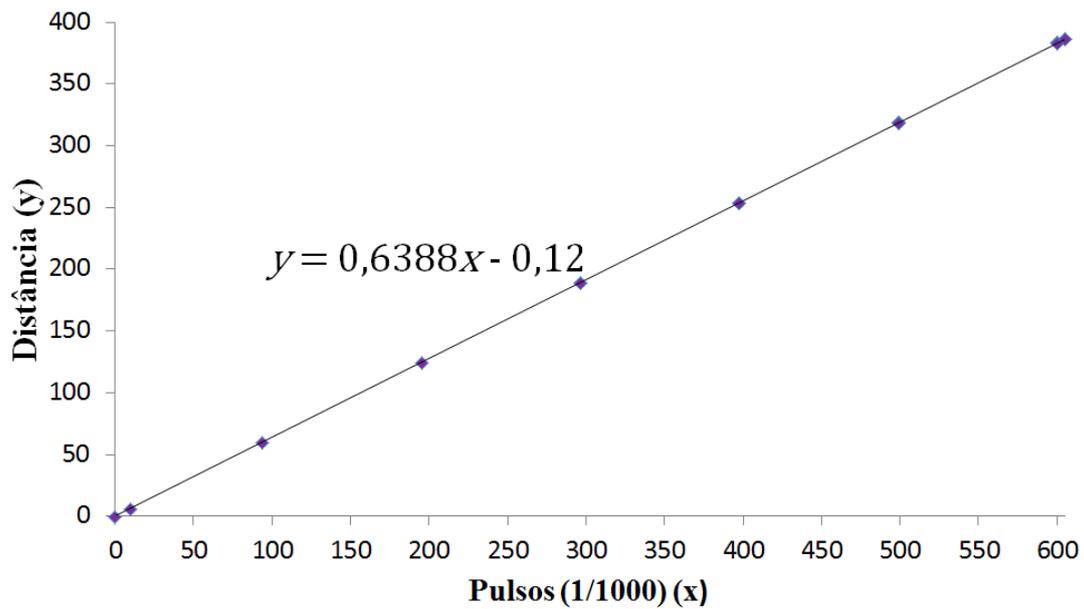
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 5: Gráfico de regressão linear – Atuador 4.

**Pulsos x Distância (Atuador 4)**

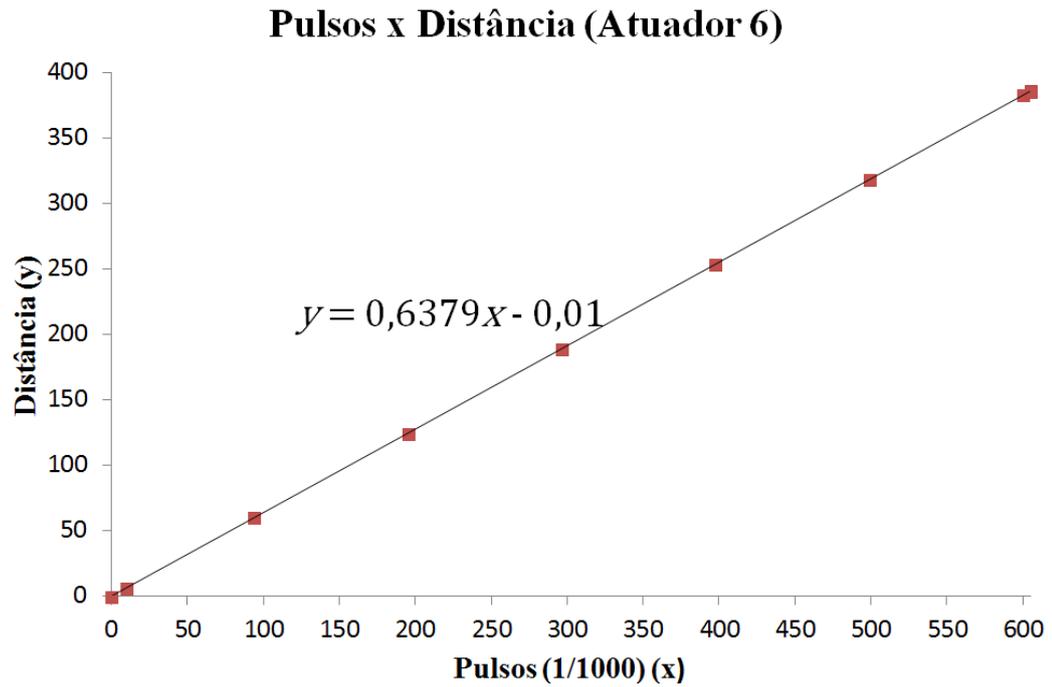
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 6: Gráfico de regressão linear – Atuador 5.

**Pulsos x Distância (Atuador 5)**

Fonte: Autora (2017).

Gráfico 7: Gráfico de regressão linear – Atuador 6.



Fonte: Autora (2017).

A Tabela 9 apresenta os valores RMS, onde,  $\hat{l}_i$  corresponde ao deslocamento observado e  $l_i$  ao deslocamento determinado através da Equação 11.

Tabela 9: Valores RMS.

$i$	$RMS$ [mm]
1	0,05
2	0,07
3	0,06
4	0,05
5	0,19
6	0,05

Fonte: Autora (2017).

## 4.2. Avaliação preliminar de desempenho da Plataforma

Na avaliação de desempenho, foram determinados os erros de posicionamentos lineares e angulares. Como mencionado anteriormente, a norma ISO9283 não especifica quais critérios devem ser selecionados para um robô específico, sendo assim, o usuário estabelecerá quais características de desempenho devem ser quantificadas de acordo com sua necessidade.

A média dos deslocamentos relativos entre os atuadores, nos três ciclos de repetições pode ser observada na Tabela 10, a seguir.

Tabela 10: Média dos deslocamentos relativos entre os atuadores.

Posição relativa atuadores	Média dos três ciclos					
	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta R_x$ (roll)	$\Delta R_y$ (pitch)	$\Delta R_z$ (yaw)
2 - 4	1,0	0,8	199,8	0,0	0,0	0,0
6 - 8	600,7	0,5	0,8	0,0	0,1	0,0
10 - 12	0,4	601,2	3,3	0,1	0,1	0,0
14 - 16	0,8	1,5	-0,1	30,1	0,0	0,1
18 - 20	1,8	-0,1	0,1	0,0	30,1	0,2
22 - 24	0,1	0,6	0,6	0,1	0,2	30,0
26 - 28	300,9	300,6	2,0	10,1	10,0	10,0

Fonte: Autora (2017).

Os erros de posicionamento linear ( $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$ ) e angular ( $\delta R_x$ ,  $\delta R_y$ ,  $\delta R_z$ ) médios para cada um dos deslocamentos relativos definidos para esse ensaio, em relação aos valores nominais, são apresentados da Tabela 11 a seguir, onde os erros foram de no máximo 3,3 mm e 0,2°.

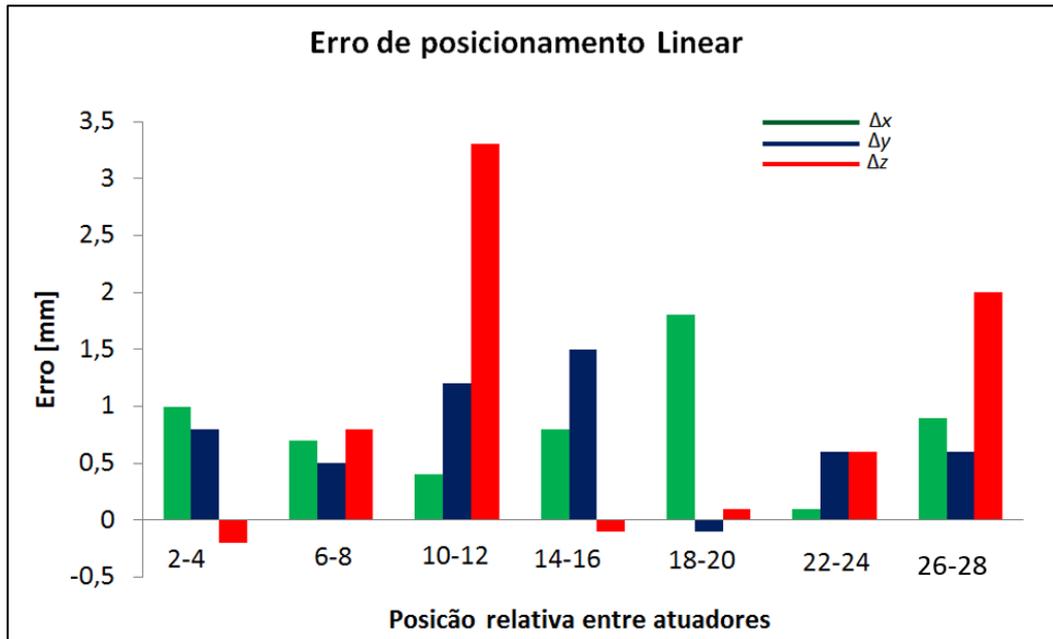
Tabela 11: Erros de posicionamento linear e angular.

Posição relativa atuadores	Erros de posicionamento linear e angular					
	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta R_x$ (roll)	$\Delta R_y$ (pitch)	$\Delta R_z$ (yaw)
2 - 4	1,0	0,8	-0,2	0,00	-0,04	0,04
6 - 8	0,7	0,5	0,8	-0,03	0,10	0,04
10 - 12	0,4	1,2	<b>3,3</b>	0,08	0,07	-0,01
14 - 16	0,8	1,5	-0,1	0,06	0,02	0,12

18 - 20	1,8	-0,1	0,1	0,03	0,08	<b>0,20</b>
22 - 24	0,1	0,6	0,6	0,07	0,18	0,05
26 - 28	0,9	0,6	2,0	0,10	0,00	0,00

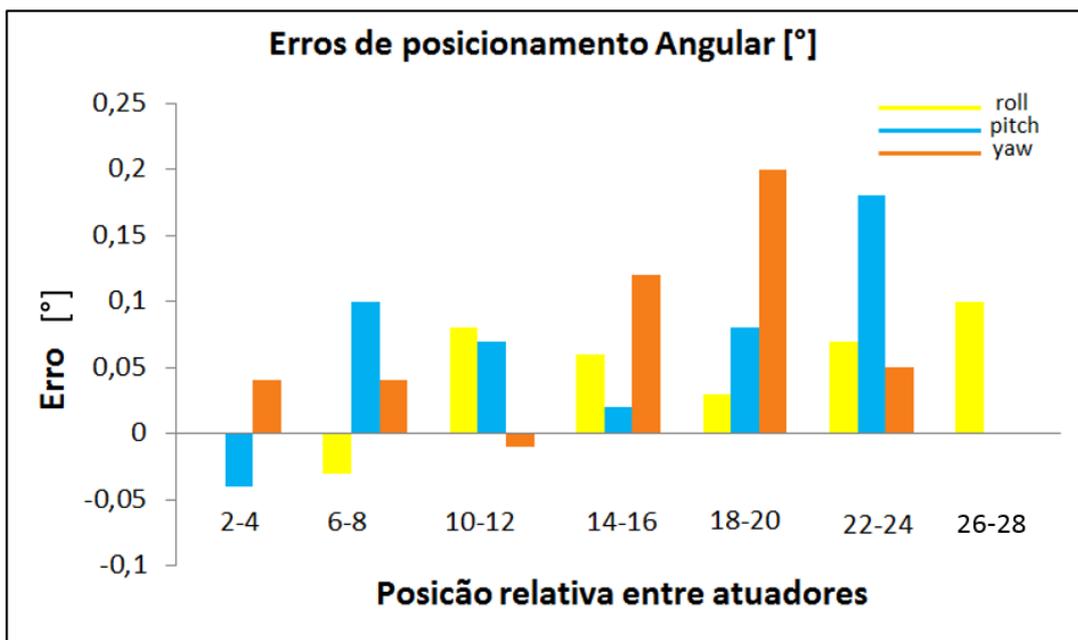
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 8: Erros de Posicionamento Linear.



Fonte: Autora (2017).

Gráfico 9: Erro de Posicionamento Angular



Fonte: Autora (2017).

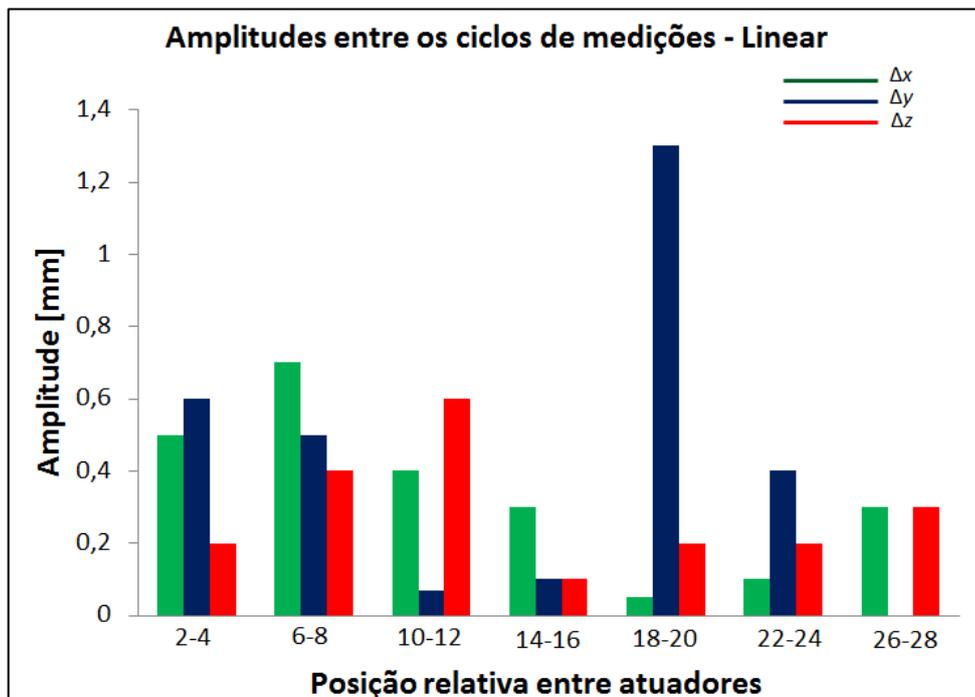
As amplitudes entre os três ciclos de medições são apresentadas da Tabela 12, onde as amplitudes foram de no máximo 1,3 mm e 0,13°. Essa variabilidade combina a repetibilidade de posicionamento da plataforma.

Tabela 12: Amplitudes entre os três ciclos de medições.

Posição relativa atuadores	Amplitude					
	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta R_x$ (roll)	$\Delta R_y$ (pitch)	$\Delta R_z$ (yaw)
2 - 4	0,50	0,60	0,20	0,03	0,03	0,04
6 - 8	0,7	0,50	0,40	0,08	0,05	<b>0,13</b>
10 - 12	0,40	0,07	0,60	0,01	0,03	0,03
14 - 16	0,30	0,10	0,10	0,00	0,01	0,00
18 - 20	0,05	<b>1,30</b>	0,20	0,01	0,04	0,00
22 - 24	0,10	0,40	0,20	0,01	0,04	0,02
26 - 28	0,30	0,00	0,30	0,03	0,01	0,02

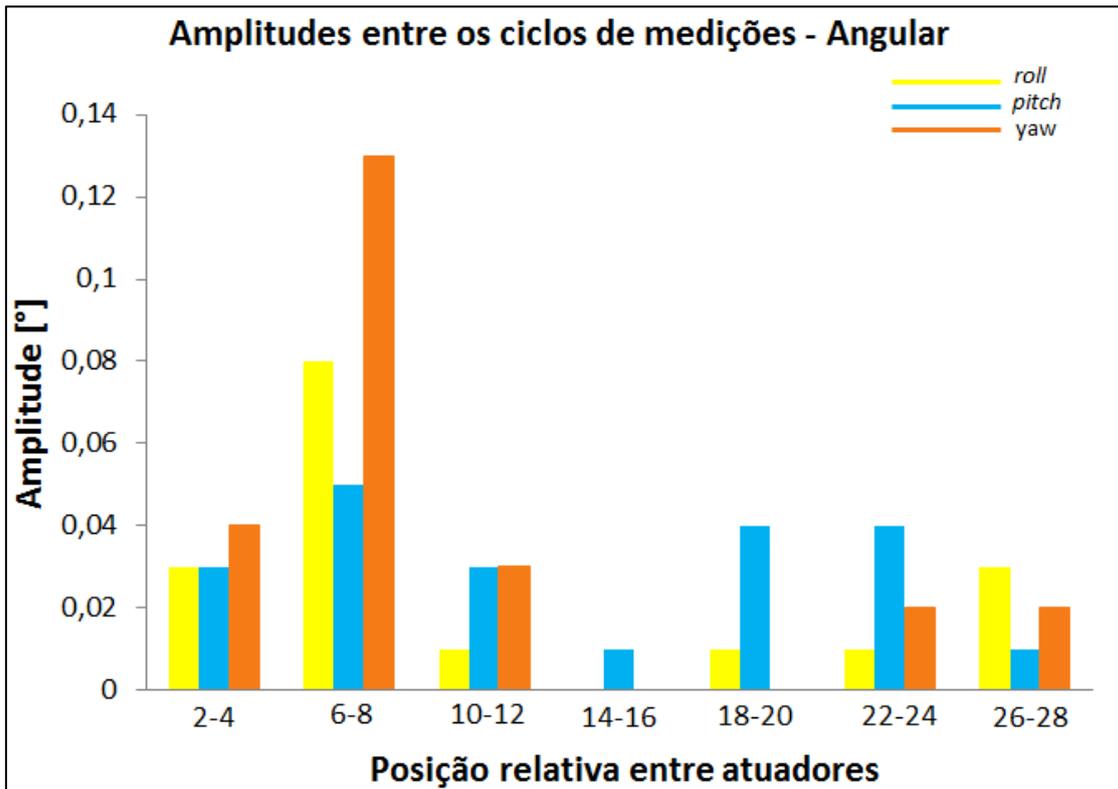
Fonte: Autora (2017).

Gráfico 10: Amplitude medição linear.



Fonte: Autora (2017).

Gráfico 11: Amplitude medição angular.



Fonte: Autora (2017).

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento desse trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um procedimento de calibração de uma plataforma de Stewart através da medição direta dos parâmetros cinemáticos. Esse procedimento apresenta a vantagem de ser de simples realização e não necessitar de otimização numérica. As medições foram realizadas com uma estação total robotizada e o sistema de medição *indoor-GPS*. Os dados coletados foram enviados para um computador, e processados com o auxílio do Software *Spatial Analyzer* para obtenção dos centros das juntas, da matriz de transformação homogênea e dos fatores de conversão dos atuadores lineares. Os dados da análise de desempenho foram processados no Excel, assim como para obtenção dos fatores de conversão.

Observaram-se erros de interseção das juntas universais de até 2,3 mm. Esses erros têm influência direta na exatidão de posicionamento da plataforma. São, no entanto, necessários experimentos adicionais para averiguar se esses erros estão associados a imperfeições mecânicas ou à incerteza do processo de medição. Se a causa for relacionada a imperfeições mecânicas, avaliar-se-á a viabilidade de compensação numérica.

Os comprimentos dos atuadores foram corrigidos a partir do fator  $d_i$  obtidos na etapa de calibração. As equações de cinemática corrigidas foram implementadas no software de controle da plataforma, permitindo que a avaliação preliminar de exatidão de posicionamento fosse executada.

Na avaliação preliminar de exatidão de posicionamento, observou-se um erro de posicionamento linear de 0,9 mm em média e de no máximo 3,3 mm. O erro de posicionamento angular foi de 0,06° em média e de no máximo 0,20°. Esses valores são muito elevados para as aplicações pretendidas. As amplitudes entre as três repetições foram de no máximo 1,3 mm e 0,13°, que combina com a repetibilidade de posicionamento da plataforma e com a repetibilidade do processo de medição.

A principal contribuição do procedimento de calibração relaciona-se à facilidade da medição direta dos parâmetros de interesse utilizando os sistemas de medição *indoor-GPS* e a Estação Total Robotizada. No entanto, o procedimento de calibração proposto não alcançou os resultados esperados, uma vez que os valores encontrados na avaliação de desempenho são muito elevados para futuras aplicações da plataforma de Stewart.

Como sugestão para trabalhos futuros, estuda-se aumentar a exatidão de posicionamento através do refinamento do processo de calibração utilizando equipamentos que permitam menor incerteza de medição (*Laser Tracker*, por exemplo), e da integração do sistema iGPS com o sistema de controle de posição do equipamento.

## REFERÊNCIAS

- DASGUPTA, Bhaskar; MRUTHYUNJAYA, T. S. The Stewart platform manipulator: a review. **Mechanism and machine theory**, v. 35, n. 1, p. 15-40, 2000.
- DEPENTHAL, C. iGPS Used as Kinematic Measuring System. **FIG Congress 2010, Facing the Challenges – Building the Capacity**.p. 11–16, 2010.
- DEPENTHAL, C.; SCHWENDEMANN, J. iGPS – a New System for Static and Kinematic Measurements. **Optical 3-D Measurement Techniques IX**, v. 1, p. 131–140, 2009.
- GONZALEZ A., H., **Projeto Mecatrônico de uma Plataforma Stewart para Simulação dos Movimentos Nos Navios**, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- GUENTHER, Raul; DE PIERI, Edson. **Avaliação de desempenho de robôs industriais**. Universidade Federal de Santa Catarina, v. 15, 2000.
- HUGHES, E. B., FORBES, A. B., SUN, W., MAROPOULOS, P. G., MUELANER, J. E., JAMSHIDI, J., & WANG, Z. iGPS Capability Study. **Hmso**, v. 1754–2987, p. 41, 2010.
- ISO 10218 - Manipulating Industrial Robots - Safety, **ISO Publications**, France, 1992.
- KYLE, S. A. et al. Understanding large scale metrology. **National Measurement Conference**, 2001.
- MOLINA, Lara; FABIAN, Andres. **Ambiente de simulação de manipuladores paralelos: modelagem, simulação e controle de uma plataforma Stewart**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2008.
- LOPES, A. M. **Modelação Cinemática e Dinâmica de Manipuladores de Estrutura em Série**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2001.
- MAISANO, Domenico A. et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation. **International Journal of Manufacturing Research**, v. 3, p. 335-349, 2008.
- MARQUES, Greicy Costa. **Calibração remota de sistemas robóticos utilizando sensores internos e externos**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- MASORY, Oren; WANG, Jian; ZHUANG, Hanqi. On the accuracy of a Stewart platform. II. Kinematic calibration and compensation. In: **Robotics and Automation, 1993. Proceedings. 1993 IEEE International Conference on**. IEEE, 1993. p. 725-731.
- MARTIN, V. B. **Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear**. Dissertação (Mestrado). PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

MAYOUD, M. Large scale metrology for research and industry – application to particle accelerators and recent developments large scale metrology for research and industry – application to particle accelerators and recent developments. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. p. 1–15, 2004.

MELLO, Camilla Bacellar. **Controle de Trajetória de uma Plataforma Stewart para Simulação de transferência de carga Fora de Porto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

MERLET, J. P., 2006, **Parallel Robots**, 2 ed. Netherlands, Springer.

MERLET, J. P., 2004, “Solving the Forward Kinematics of a Gough-Type Parallel Manipulator with Interval Analysis”, **The International Journal of Robotics Research**, Vol. 23, n. 3, March, p. 221-235.

MOTTA, J.M. & McMaster, R.S., 1999, Modeling, Optimizing and Simulating Robot Calibration with Accuracy Improvement, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, Vol. 3, Sep.1999, pp. 386-402.

MUELANER, J. E., Wang, Z., Jamshidi, J., & Maropoulos, P. G. Verification of the indoor GPS system by comparison with points calibrated using a network of laser tracker measurements. In: **Proceedings of the 6th CIRP-sponsored international conference on digital enterprise technology**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 607-619.

NIKON METROLOGY. An introduction to iSpace. Disponível em <<http://www.nikonmetrology.com/Products/Large-Volume-Applications/iGPS/iGPS>> Acesso em novembro de 2016.

PINTO, Tiago Loureiro Fígaro da costa. **Avaliação de Desempenho de Robôs Industriais utilizando um braço de medição portátil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2001.

ROTH, Z. V. I. S.; MOORING, B.; RAVANI, Bahram. An overview of robot calibration. **IEEE Journal on Robotics and Automation**, v. 3, n. 5, p. 377-385, 1987.

SCIAVICCO, Lorenzo; SICILIANO, Bruno. **Modelling and control of robot manipulators**. Springer Science & Business Media, 2012.

SCHMITT, R. H. et al. Advances in large-scale metrology – review and future trends. **Manufacturing Technology**, v. 65, p. 643–665, 2016.

VIEIRA, Paulo Rogério. **A utilização de máquinas optoeletrônicas portáteis de longo alcance para medição tridimensional como fator de otimização fabril**. 2013. 72 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, SP, 2003.

ZHUANG, Hanqi; YAN, Jiahua; MASORY, Oren. Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals. **Journal of Field Robotics**, v. 15, n. 7, p. 395-405, 1998.

WANG, Jian; MASORY, Oren. On the accuracy of a Stewart platform. I. The effect of manufacturing tolerances. In: **Robotics and Automation, 1993. Proceedings, 1993 IEEE International Conference on**. IEEE, 1993. p. 114-120.

WAPLER, M.; URBAN, V.; WEISENER, T., STALLKAMP, J.; DURR, M. & HILLER, A. A Stewart Platform for Precision Surgery, **Institute of Measurement and Control**, Vol. 25, n.4, p. 329–334.

## APÊNDICE A – POSIÇÃO DOS ATUADORES NOS TRÊS CICLOS DE MEDIÇÕES NA ETAPA CALIBRAÇÃO

Neste apêndice são apresentados os dados coletados nos três ciclos de medições, da posição dos atuadores na etapa de calibração (Tabela 13).

Tabela 13: Posição dos atuadores nos três ciclos de medições.

$n_p$ (pulsos)	Atuador	Distância percorrida [mm]		
		Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Fim de curso	1	0	0	0
10000		6,35	6,33	6,33
94000		59,95	59,99	59,97
195200		124,60	124,60	124,60
296400		189,13	189,13	*
397600		253,97	253,96	253,98
498800		318,51	318,50	318,48
60000		383,18	383,18	383,18
605000		386,34	386,35	386,36
Fim de curso	2	0	0	0
10000		6,31	6,29	6,28
94000		59,78	59,78	59,79
195200		124,22	124,14	124,19
296400		188,68	188,66	*
397600		252,91	252,91	252,90
498800		317,55	317,57	317,57
60000		381,96	381,96	381,94
605000		385,19	385,16	385,16
Fim de curso	3	0	0	0
10000		6,33	6,34	6,35
94000		59,90	59,97	59,99
195200		124,50	124,71	124,55
296400		189,32	189,31	*
397600		253,91	253,92	253,96
498800		318,59	318,59	318,63
60000		383,10	383,13	383,15
605000		386,32	386,30	386,36
Fim de curso	4	0	0	0
10000		6,33	6,29	6,29

94000		59,86	59,85	59,85
195200		124,29	124,41	124,41
296400		188,96	188,99	188,99
397600		253,43	253,46	253,46
498800		*	317,80	317,80
60000		382,46	382,46	382,46
605000		385,64	385,66	385,66
Fim de curso			0	0
10000	<b>5</b>	*	*	6,31
94000		*	*	59,92
195200		124,63	*	*
296400		189,33	189,30	*
397600		253,86	253,88	253,55
498800		318,56	318,67	318,11
60000		383,35	383,43	382,80
605000	386,39	386,64	386,28	
Fim de curso	<b>6</b>	0	0	0
10000		6,37	6,32	6,32
94000		59,99	60,01	60,00
195200		124,51	124,48	124,52
296400		188,93	188,93	*
397600		253,67	253,67	253,69
498800		318,14	318,19	318,19
60000		382,69	382,72	382,70
605000	385,86	385,88	385,86	

Fonte: Autora (2017).

Os campos preenchidos com um “\*” referem-se a valores discrepantes descartados.

## APÊNDICE B – DADOS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS DE REGRESSÃO LINEAR NA ETAPA CALIBRAÇÃO

Neste apêndice são apresentados os dados utilizados nos cálculos de regressão linear (Tabela 14).

Tabela 14: Pontos utilizados nos cálculos de regressão linear.

<i>Pulsos</i> (1/1000)	Ciclo	Distância percorrida					
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
10	1	6,35	6,31	6,33	6,33	*	6,37
94		59,95	59,78	59,90	59,86	*	59,99
195,2		124,60	124,22	124,50	124,29	124,63	124,51
296,4		189,13	188,68	189,32	188,96	189,33	188,93
397,6		253,97	252,91	253,91	253,43	253,86	253,67
498,8		318,51	317,55	318,59		318,56	318,14
600		383,18	381,96	383,10	382,46	383,35	382,69
605		386,34	385,19	386,32	385,64	386,39	385,86
10	2	6,33	6,29	6,34	6,29	*	6,32
94		59,99	59,78	59,97	59,85	*	60,01
195,2		124,60	124,14	124,71	124,41	*	124,48
296,4		189,13	188,66	189,31	188,99	189,30	188,93
397,6		253,96	252,91	253,92	253,46	253,88	253,67
498,8		318,50	317,57	318,59	317,80	318,67	318,19
600		383,18	381,96	383,13	382,46	383,43	382,72
605		386,35	385,16	386,30	385,66	386,64	385,88
10	3	6,33	6,28	6,35	6,29	6,31	6,32
94		59,97	59,79	59,99	59,85	59,92	60,00
195,2		124,60	124,19	124,55	124,41	*	124,52
296,4		*	*	*	188,99	*	*
397,6		253,98	252,90	253,96	253,46	253,55	253,69
498,8		318,48	317,57	318,63	317,80	318,11	318,19
600		383,18	381,94	383,15	382,46	382,80	382,70
605		386,36	385,16	386,36	385,66	386,28	385,86
Coefi. b		0,6387	0,6367	0,6387	0,6375	0,6388	0,6379
Coefi. a		-0,07	-0,09	-0,06	-0,06	-0,12	-0,01
<b>L/10000 pulsos</b>		<b>6,387</b>	<b>6,367</b>	<b>6,387</b>	<b>6,375</b>	<b>6,388</b>	<b>6,379</b>

Fonte: Autora (2017).

Os campos preenchidos com um “\*” referem-se a valores discrepantes descartados.

## APÊNDICE C - POSIÇÃO DOS ATUADORES NA ETAPA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste apêndice são apresentados os dados coletados da posição dos atuadores, nos três ciclos de medição da etapa de avaliação de desempenho (Tabela 15), (Tabela 16) e (Tabela 17),

Tabela 15: Avaliação de desempenho – Ciclo 1 de medição.

Posição	Dados Ciclo - 1					
	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta R_x$ (roll)	$\Delta R_y$ (pitch)	$\Delta R_z$ (yaw)
2	1,9	7,0	299,3	0,1926	0,0172	-0,0086
4	2,8	7,7	499,0	0,2027	-0,0172	0,0345
6	300,7	6,7	299,3	0,2419	0,0776	0,0948
8	-299,3	7,4	299,8	0,2425	0,112	-0,0086
10	1,2	307,9	297,9	0,1671	0,0776	-0,0689
12	1,3	-293,2	301,1	0,2351	0	-0,0603
14	1,6	6,4	299,3	14,8171	0,0431	-0,0776
16	0,7	7,9	299,3	-15,2432	0,0345	-0,0259
18	2,2	7,3	299,4	0,255	15,0835	-0,1428
20	0,5	7,9	299,2	0,234	-15,0208	0,0535
22	0,9	8,4	299,7	0,2004	0,1465	15,0397
24	1,0	7,6	299,0	0,2713	-0,0603	-14,9958
26	151,3	157,5	148,6	5,2629	4,6158	5,4207
28	-149,8	-143,1	150,7	-4,8565	-5,3771	-4,5494

Fonte: Autora (2017).

Tabela 16: Avaliação de desempenho – Ciclo 2 de medição.

Posição	Dados Ciclo - 2					
	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta Rx$ (roll)	$\Delta Ry$ (pitch)	$\Delta Rz$ (yaw)
2	1,4	7,9	299,4	0,2354	0,0172	-0,0259
4	2,2	9,0	499,1	0,2403	-0,0086	0,0345
6	301,6	7,7	298,6	0,2399	-0,0259	0,0603
8	-299,8	8,4	299,4	0,3176	0,1293	0,0862
10	1,0	309,0	297,5	0,1884	0,0776	0,0086
12	1,3	-292,3	301,2	0,2723	-0,0086	-0,0086
14	*	*	*	*	*	*
16	1,0	8,4	299,1	-15,2775	0	0,0172
18	2,2	8,1	299,2	0,2859	15,0563	-0,116
20	*	*	*	*	*	*
22	1,1	8,1	299,6	0,2001	0,1293	15,0563
24	1,1	7,7	299,1	0,2716	-0,0431	-15,0041
26	151,2	157,3	148,6	5,2469	4,6249	5,4387
28	-149,6	-143,3	150,7	-4,8397	-5,3856	-4,5667

Fonte: Autora (2017).

Os campos preenchidos com um “\*” referem-se a valores discrepantes descartados.

Tabela 17: Avaliação de desempenho – Ciclo 3 de medição.

Posição	Dados Ciclo - 3					
	Linear [mm]			Angular [°]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta R_x$ (roll)	$\Delta R_y$ (pitch)	$\Delta R_z$ (yaw)
2	1,8	7,1	299,2	0,2033	0,0172	-0,0172
4	3,1	7,6	499,1	0,181	-0,0345	0
6	302,4	6,5	298,4	0,202	-0,0517	0,0431
8	-298,4	6,7	299,6	0,2095	0,0603	0,0086
10	1,7	307,8	297,7	0,1289	0,0345	-0,0259
12	2,4	-293,5	300,8	0,2079	-0,0259	-0,0431
14	2,1	6,3	299,2	14,8339	0,0345	-0,0345
16	1,5	7,7	299,1	-15,2299	0,0086	0,0086
18	2,8	7,2	299,2	0,2418	15,0563	-0,116
20	1,0	6,5	299,2	0,202	-15,0041	0,0803
22	1,5	7,2	299,6	0,1571	0,112	15,0397
24	1,6	6,6	299,0	0,2234	-0,0517	-15,0019
26	151,7	156,6	148,7	5,2853	4,6327	5,4465
28	-149,1	-144,0	150,5	-4,8028	-5,377	-4,5667

Fonte: Autora (2017).