



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Curso de Engenharia Mecânica

Rodrigo Rafael Pinheiro Pereira

**Análise e Modelagem do Erro de Sensores e
Atuadores em um Braço Robótico Controlado
com Arduino**

São Luís - MA

2017

Rodrigo Rafael Pinheiro Pereira

Análise e Modelagem do Erro de Sensores e Atuadores em um Braço Robótico Controlado com Arduino

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Flavio Nunes Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rogério de Almeida Ribeiro

São Luís - MA

2017

Pereira, Rodrigo Rafael Pinheiro.

Análise e modelagem do erro de sensores e atuadores em um braço robótico controlado com Arduino. / Rodrigo Rafael Pinheiro Pereira. – São Luís, 2017.

77.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Flavio Nunes Pereira.

Coorientador: Prof. Paulo Rogério de Almeida Ribeiro

1. Robótica. 2. Braço robótico. 3. Cinemática inversa. 4. Arduino. 5. Regressão linear. I. Título.

CDU 531.1:004

Rodrigo Rafael Pinheiro Pereira

Análise e Modelagem do Erro de Sensores e Atuadores em um Braço Robótico Controlado com Arduino

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. São Luís - MA, 27 de Junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Flavio Nunes Pereira
(Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Paulo Rogério de Almeida
Ribeiro (Coorientador)
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Msc. Denner Robert Rodrigues
Guilhon
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Mauro Sergio Silva Pinto
Universidade Estadual do Maranhão

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado força e energia nessa longa jornada que é a graduação em Engenharia Mecânica. Agradeço imensamente ao meu orientador e amigo Flavio Nunes Pereira que sempre me orientou de forma satisfatória não somente no meu trabalho de conclusão de curso, mas também na minha graduação e iniciação científica. Juntamente com o orientador, meu co-orientador foi de extrema importância para a parte final do meu curso pois se mostrou disposto e interessado a me orientar a todo tempo.

O incentivo familiar dos meus pais e meu irmão foi indispensável para que eu me encontrasse hoje onde estou. Sempre me trataram com muito carinho, amor e respeito. Além disso minhas tias que sempre estiveram presente e me apoiando nessa jornada de trabalho. Agradeço a minha namorada pois sempre esteve presente e me apoiou e me deu dicas importante de como controlar minha ansiedade quanto a entrega do meu trabalho.

Por último, porém não menos importante a todos os meus professores que tiveram influência direta para o meu crescimento acadêmico.

Resumo

O crescimento da robótica tem despertado interesse dos pesquisadores ao desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas robóticos. Braços robóticos tem sido utilizados em diversos setores, tais como industrial, hospitalar e doméstico. O objetivo desse trabalho é apresentar um estudo sobre o erro de um sensor ultrassônico e um servomotor utilizando a cinemática inversa de um braço robótico. Inicialmente, fez-se uma análise do erro desse sensor e do atuador. Posteriormente, esses erros foram corrigidos usando uma regressão linear. Uma análise estatística - usando teste t pareado - demonstrou que o erro após a correção foi menor do que o erro antes da correção. Adicionalmente, aplicou-se o teste Z para verificar que as medidas foram mais próximas das desejadas após a correção do que antes dessa correção. O erro representa testes iniciais e sem nenhum tipo de ajuste, porém a correção representa o resultado pós a aplicação da regressão linear sobre os ensaios iniciais. Além disso, outro ponto desse trabalho é demonstrar a importância dos testes na fase de aperfeiçoamento desse equipamento a fim de fazer o mesmo executar de forma mais precisa a função desejada que seria a coleta de um objeto. Para as melhorias, foi utilizada a regressão linear, os testes t e Z. A regressão linear tornou o mecanismo mais controlado e próximo dos resultados desejados. Além disso, os testes t e Z comprovam que os valores de erro e correção divergem e que os resultados não ocorreram ao acaso. Os resultados obtidos demonstraram melhorias significativas tanto na utilização do sensor ultrassônico, quanto na aplicação da cinemática inversa.

Palavras-chaves: robótica, braço robótico, cinemática inversa, Arduino, regressão linear, teste t, teste Z.

Abstract

The growing of robotics has aroused interest in the researchers to the development and improvement of robotic systems. Robotic arms have been used in many sectors, such as industrial, clinical and domestic. The aim of this work is to present a study about the error of an ultrasonic sensor and a servomotor used in the inverse kinematics of a robotic arm. Initially, an analysis of error concerning to such sensor and an actuator was made. Afterwards, these errors were corrected using a linear regression. A statistics analysis – using paired test t – demonstrated that the error after the correction was smaller than before such correction. Additionally, the test Z was applied in order to verify that the measurements were closer to the desired ones after the correction than before. The error represents initial tests and without any type of adjustments, however the correction represents the result after the application of linear regression on the initial tries. Besides, another goal of this work is to demonstrate the importance of tests in improvement phase of this equipment in order to have it perform in a more precise way the desired function; which would be the collecting of an object. To the improvements, a linear regression was used, the tests t and Z . The linear regression made the mechanism more stable and near to the desired results. Moreover, the tests t and Z prove that the correction and error values diverge and that the results didn't happen by chance. The obtained results demonstrated significant improvements both in the use of the ultrasonic sensor and in the inverse kinematics application.

Keywords: Robotics, robotic arm, inverse kinematics, Arduino, linear regression, test t , test Z .

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação de aplicações de um robô	16
Figura 2 – Exemplo de tipos de Geometria	19
Figura 3 – ARDUINO	21
Figura 4 – Diagrama de processo do Arduino	22
Figura 5 – IDE Arduino	22
Figura 6 – Esquema de funcionamento sensor ultrassônico	23
Figura 7 – Sensor Ultrassônico	24
Figura 8 – Servomotor	25
Figura 9 – Funcionamento de um servo motor	25
Figura 10 – Resposta servomotor a um sinal	26
Figura 11 – Esquema representativo cinemática direta e inversa	27
Figura 12 – Representação cinemática direta	28
Figura 13 – Exemplo de regressão linear	30
Figura 14 – Exemplo de um teste bicaudal	32
Figura 15 – Metodologia proposta	34
Figura 16 – Diagrama de funcionamento do sensor ultrassônico	36
Figura 17 – Sensor HC-SR04	36
Figura 18 – Servo moto 9g Tower Pro	37
Figura 19 – Modelo Arduino	38
Figura 20 – Modelo do braço robótico	38
Figura 21 – Divisão dos pontos do braço	39
Figura 22 – Representação eletrônica do sensor ultrassônico	42
Figura 23 – Representação do teste da base	44
Figura 24 – Representação do teste do braço	45
Figura 25 – Representação do erro global	47
Figura 26 – Representação do funcionamento da estrutura	50
Figura 27 – Representação eletrônica do sistema	51
Figura 28 – Foto superior da representação do sistema	52
Figura 29 – Foto lateral do braço <i>meArm</i>	53

Figura 30 – Gráfico Box Plot ensaio inicial do sensor ultrassônico	57
Figura 31 – Gráfico de regressão linear para o sensor ultrassônico	58
Figura 32 – Gráfico Box Plot correção do sensor ultrassônico	61
Figura 33 – Gráfico de regressão linear da base	66
Figura 34 – Gráfico Box Plot para o ensaio inicial do braço	69
Figura 35 – Gráfico de regressão linear para os ensaios iniciais do braço	70
Figura 36 – Gráfico Box Plot correção do braço	72
Figura 37 – Gráfico de regressão linear para a correção do braço	73

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de materiais utilizados	35
Tabela 2 – Tabela de aleatoriedade para ensaio inicial do sensor ultrassônico . . .	42
Tabela 3 – Tabela de aleatoriedade para o erro da base	43
Tabela 4 – Valores de referência para o ensaio do braço	45
Tabela 5 – Tabela de aleatoriedade para o braço	46
Tabela 6 – Tabela de resultado do ensaio inicial do sensor ultrassônico	55
Tabela 7 – Erro médio do sensor ultrassônico na fase inicial	55
Tabela 8 – Desvio padrão sensor ultrassônico para o ensaio inicial	56
Tabela 9 – Tabela de resultado da correção do sensor ultrassônico	59
Tabela 10 – Erro médio do sensor ultrassônico pós correção	60
Tabela 11 – Desvio padrão sensor ultrassônico pós correção	60
Tabela 12 – Teste T para o sensor ultrassônico (comparando testes iniciais e correção)	63
Tabela 13 – Teste Z para o sensor ultrassônico (comparando valores ideias)	63
Tabela 14 – Tabela de resultado do teste da base parte 1	64
Tabela 15 – Tabela de resultado do teste da base parte 2	65
Tabela 16 – Tabela de resultado dos ensaios iniciais do braço	67
Tabela 17 – Erro médio do braço na fase inicial	68
Tabela 18 – Desvio padrão do braço no ensaio inicial	68
Tabela 19 – Tabela de resultado da correção do braço	71
Tabela 20 – Erro médio da correção do braço	71
Tabela 21 – Desvio padrão braço pós correção	72
Tabela 22 – Teste t para o braço (comparando ensaio inicial e correção)	74
Tabela 23 – Teste Z para o braço (comparando valores ideias)	75

Lista de abreviaturas e siglas

SCARA *Selective Compliant Articulated Robot for Assembly*

RIA *Robot Industries Association*

IDE *Integrated Development Environment*

GDL *Graus de Liberdade*

PWM *Pulse Width Modulation*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivo	14
1.2.1	Objetivos Específicos	14
1.3	Contribuições	15
1.4	Trabalhos Relacionados	15
1.5	Organização do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Braço Robótico	18
2.1.1	Tipos de Geometria	18
2.1.2	Números de Eixos	19
2.1.3	Tipos Acionamentos	20
2.1.4	Tipos de Controle	20
2.2	Arduino	20
2.3	Sensor Ultrassônico	22
2.4	Servomotor	24
2.5	Cinemática do Robô	27
2.5.1	Cinemática direta	27
2.5.2	Cinemática Inversa	28
2.6	Regressão Linear	30
2.7	Teste t	31
2.8	Teste Z	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Material utilizado	35
3.1.1	Sensor ultrassônico modelo HC-Sr04	35
3.1.2	Servo motor modelo 9g Tower Pro	37
3.1.3	Arduino modelo Mega 2560	37
3.1.4	Braço robótico modelo <i>meArm</i>	38

3.2	Obtenção de um modelo ideal	40
3.2.1	Modelo ideal para o sensor ultrassônico	40
3.2.2	Modelo ideal para a base	40
3.2.3	Modelo ideal para o braço	40
3.3	Aplicação da cinemática inversa	41
3.4	Ensaio inicial	41
3.4.1	Ensaio inicial para o sensor ultrassônico	41
3.4.2	Cálculo do erro para a base	43
3.4.3	Ensaio inicial para o braço	44
3.5	Aplicação da Regressão Linear	46
3.6	Correção do sistema	47
3.7	Utilização do teste t	48
3.8	Utilização do teste Z	49
3.9	Funcionamento da estrutura	50
4	RESULTADOS	54
4.1	Resultados: Sensor ultrassônico	54
4.1.1	Resultados: Erro do Sensor ultrassônico	54
4.1.2	Resultados: ensaios pós correção do Sensor ultrassônico	58
4.1.3	Analisando o Teste t e Z para o sensor ultrassônico	62
4.2	Resultados: Base	64
4.2.1	Resultados: Erro da base	64
4.3	Resultados: Braço	66
4.3.1	Resultados: Ensaio inicial do Braço	66
4.3.2	Resultados: Correção do Braço	69
4.3.3	Analisando o Teste t e Z para o braço	73
5	CONCLUSÃO	76
5.1	Trabalhos Futuros	77
	REFERÊNCIAS	79

1 Introdução

A robótica no século passado era considerada um projeto para o futuro. Essa realidade tem sido modificada com o decorrer dos anos e a robótica tem sido aplicada em diversas áreas. Os robôs são geralmente relacionados com o âmbito industrial, entretanto, a robótica pode ser encontrada em vários outros setores, tais como: hospitalar, militar e doméstico. Esse avanço ocorre devido ao rápido desenvolvimento da tecnologia.

Existem diversos tipos de robôs e cada um desempenha uma função específica. Dentre os tipos de robôs existentes, as categorias podem ser divididas entre: inteligentes, controlados por computador, de aprendizagem e manipuladores ([SHHEIBIA, 2001](#)).

Uma das especializações da robótica são os braços robóticos. Esses braços possuem aplicações nos mesmos setores onde outros tipos de mecanismos robóticos são aplicados (industrial, hospitalar, militar), porém com funcionalidades diferentes. Os braços robóticos são utilizados com o intuito de copiar o movimento do braço humano.

Diversas vantagens da utilização dessa modalidade de robô podem ser apresentadas. De acordo com [Shheibia \(2001\)](#), os braços robóticos apresentam vantagens sobre o ser humano pois não possuem sentimentos e, além disso, os robôs obedecem de forma precisa as funções exigidas a eles.

1.1 Justificativa

Estruturas robóticas são utilizadas em diversos setores. Na reabilitação de pacientes, por exemplo, um projeto de uma estrutura robótico foi utilizado para a recuperação e reabilitação de ombros de pacientes ([NUNES et al., 2012](#)). Através desse exemplo, pode-se notar que a robótica pode ser utilizada na melhoria da qualidade de vida dos seres humanos, reforçando assim a necessidade de avanços em pesquisas da área.

Adicionalmente, braços robóticos tem o intuito de agilizar os processos e fazer processos repetitivos mais eficazes. Os braços robóticos podem estar presentes em locais onde seres humanos podem ter difícil acesso, tais como: locais muito quentes, muito frios, sem muito oxigênio, com cheiros fortes, entre outros. Outro aspecto importante é que os

braços robóticos podem apresentar melhor resultado em movimentos repetitivos do que os seres humanos devido ao fato de não acumularem cansaço (YUSOFF; SAMIN; IBRAHIM, 2012).

Assim sendo, os braços robóticos são ferramentas importantes para o desenvolvimento humano, isto é, podem auxiliar na melhoria da condição de vida, além de evitar trabalhos repetitivos e perigosos.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é analisar a aplicação da cinemática inversa a um braço robótico *meArm* (SABO et al., 2016). Para incluir esse modelo em um braço robótico é necessário que ajustes sejam feitos ao projeto a fim de obter um melhor desempenho do mesmo. O estudo desse braço robótico dividiu-se em: sensor, base e braço. A estrutura apresenta erros de precisão quanto a medida do sensor ultrassônico, e a angulação feita pelos servos da base e do braço utilizados nesse projeto. Foi aplicado um modelo ideal para que sirva de parâmetro para os testes.

Com o intuito de atingir melhor performance, serão analisadas possíveis diferenças entre um modelo ideal e o modelo real. Para isso, serão utilizados testes de regressão linear para avaliar a precisão do braço robótico juntamente com os testes t e Z. A aplicação da cinemática inversa ocorrerá através da plataforma Arduino.

1.2.1 Objetivos Específicos

Esse trabalho tem como objetivos específicos:

- Aplicar um sensor ultrassônico a estrutura do braço *meArm*.
- Aplicar a cinemática inversa em um braço robótico *meArm*.
- Obter um modelo ideal para o sensor ultrassônico.
- Obter um modelo ideal para a base do braço robótico.
- Obter um modelo ideal para a articulação do braço.
- Realizar testes iniciais sem correção para o sensor ultrassônico, base e braço.

- Comparar o sensor ultrassônico, utilizado no projeto, com um modelo ideal com a finalidade de calibração do sensor e melhor funcionalidade de precisão do braço robótico.
- Teste de precisão do servo motor da base do braço robótico. Esse motor é responsável pelo movimento rotacional então é de fundamental importância a sua análise de bom funcionamento.
- Análise de precisão da cinemática inversa quanto a pontos selecionados de forma específica.
- Aplicação da regressão linear com a finalidade de análise e correção de erros.
- Aplicação dos Testes t e Z com a finalidade de analisar a aleatoriedade dos testes de correção de erros e definir se os mesmos divergem ou não.
- Contribuir com a sociedade acadêmica sobre o tema de cinemática inversa.
- Aprofundar conhecimentos de robótica e automação e contribuir para a produção acadêmica na área de pesquisa na engenharia.

1.3 Contribuições

As principais contribuições desse trabalho são:

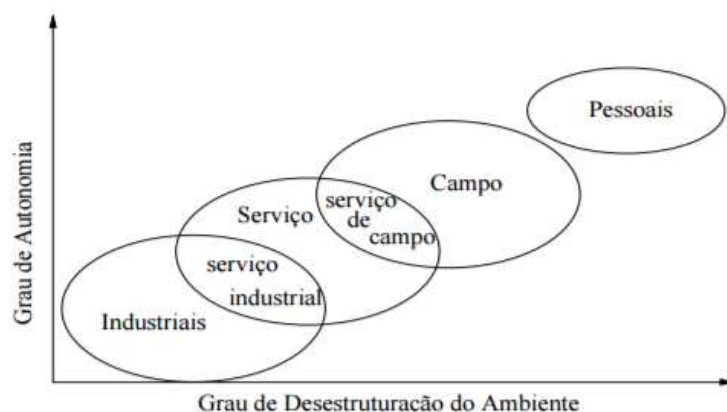
- Estudo avaliativo da aplicação da cinemática inversa em um braço robótico de pequena escala.
- Análise e comparação de um modelo ideal com uma amostra real de um braço robótico.
- Uso de um braço robótico em pequena escala com o propósito de teste de inovações em projetos universitários laboratoriais.

1.4 Trabalhos Relacionados

O uso dos braços robóticos tem sido importante para grandes avanços. A capacidade desses equipamentos de facilitar trabalhos manuais e repetitivos tem sido largamente

utilizada em diversos setores, tais como: industrial (SZABÓ; LIE, 2012),(KEATING; OXMAN, 2013), hospitalar (JUNG et al., 2010),(BAIK et al., 2008),(HANLY; TALAMINI, 2004) e doméstico (KADIR; SAMIN; IBRAHIM, 2012). A Figura 1 apresenta diversas aplicações dos robôs.

Figura 1 – Áreas de atuações de robôs.



Fonte – (PIERI, 2002)

Utilizando um braço robótico, Hanly e Talamini (2004) afirmam que foram registrados 202 casos de cirurgias de abdômen no hospital universitário Johns Hopkins em Baltimore nos Estados Unidos. Esse robô tem sido utilizado na aplicação de laparoscopia com o intuito de tratar todos os órgãos abdominais.

Um estudo feito por Filho e Ferrari (2014), identifica diversas aplicações da robótica na indústria pelo mundo. As áreas de maior atuação no setor industrial são: soldagem, pintura, manipulação de equipamentos, cortes e acabamentos. Em 1988 em torno de 65% dos projetos robóticos existentes no Brasil eram utilizados no setor automobilístico com a função de soldagem e pintura.

Com a finalidade de demonstrar que robôs podem ser utilizados em seguimentos diferentes dos industriais, Kadir, Samin e Ibrahim (2012) exemplifica um braço robótico para uso doméstico. Esse braço é controlado via internet e utiliza o Arduino Uno para receber e enviar sinais. Além do mais, esse protótipo pode ser utilizado em atividades domésticas diversas.

1.5 Organização do Trabalho

Esse trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro é uma breve introdução ao tema, objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo são conceituados termos necessários para o entendimento do projeto. Algumas associações são feitas dentro desse capítulo com o próprio projeto com o interesse de facilitar o entendimento e direcionar o leitor para os pontos fundamentais.

No terceiro capítulo está descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto e dos testes envolvidos. Além disso, no quarto capítulo são analisados os resultados obtidos. Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas com esse estudo.

2 Fundamentação Teórica

Esse capítulo tem por objetivo definir conceitos importantes para o entendimento das análises e testes feitos nesse projeto. O projeto se divide em três etapas, a parte física que inclui a estrutura do braço robótico juntamente com os sensores, a cinemática inversa e os testes aplicados com o intuito de corrigir os erros.

2.1 Braço Robótico

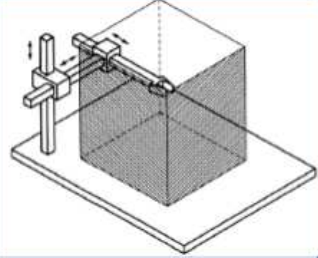
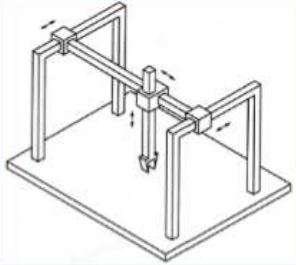
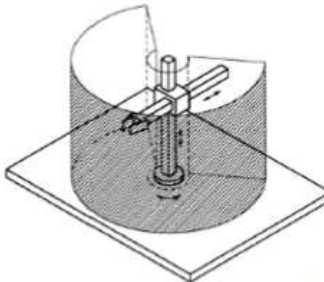
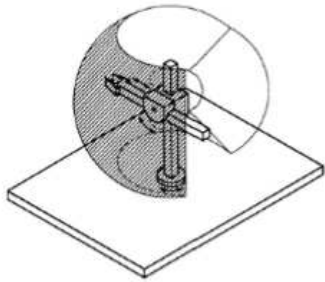
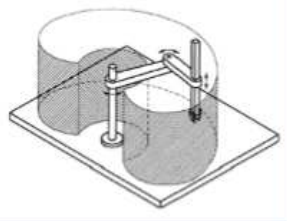
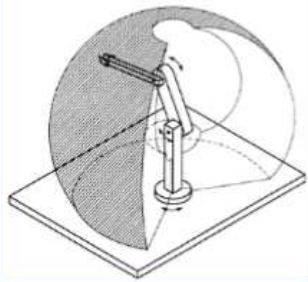
O braço robótico é definido pela Associação de Indústrias de Robôs dos Estados Unidos (*Robot Industries Association* - RIA) como manipuladores reprogramáveis que podem ser aptos a manusear ferramentas ou materiais (SPONG et al., 1994). Esses tipos de robôs podem ser classificados quanto a sua geometria, número de eixos, tipo de acionamento e ou tipos de controle.

Um braço robótico tem como objetivo obter movimentos e funções similares ao braço humano (YUSOFF; SAMIN; IBRAHIM, 2012). Geralmente os braços robóticos são programáveis e podem responder de forma autônoma inteligente (pré-programado) ou de forma manipulável, ou seja o usuário insere o comando e o braço responde.

2.1.1 Tipos de Geometria

A geometria dos robôs se define através das configurações do eixo desse robô, podendo essas configurações serem rotacionais ou lineares. Essas geometrias podem se dividir em cinco classes principais, articulada ou revolução, SCARA (*Selective Compliant Articulated Robot for Assembly*), polar ou esférica, cartesiana e cilíndrica (FILHO; FERRARI, 2014). A geometria utilizada para o trabalho em questão é o articulado pois tem o intuito de repetir a movimentação do braço humano. De acordo com a Figura 2, pode-se notar a configuração dos braços robóticos de acordo com o tipo de geometria de cada um dos mecanismos.

Figura 2 – Tipos de geometria de um braço robótico.

Name	Figure	Name	Figure
Cartesian		Gantry	
Cylindrical		Sphre	
Scara		Anthropomorhic	

Fonte – (SPONG et al., 1994)

2.1.2 Números de Eixos

O eixo de um robô é responsável pela sua movimentação. Além disso, quanto maior o número de eixos de um braço robótico, maior será o seu grau de liberdade. De acordo com (FILHO; FERRARI, 2014), a maioria dos robôs possuem entre 3 a 6 eixos. O número de graus de liberdade desse projeto é de 4 graus.

A divisão é feita da seguinte forma:

- Base: possui um grau de liberdade através do movimento rotacional.
- Braço inferior: possui um grau de liberdade através do movimento rotacional. Com

o objetivo de afastar ou unir a garra do objeto.

- Braço superior: possui um grau de liberdade através do movimento rotacional. Juntamente com o braço inferior, possui o objetivo de elevar o braço.
- Garra: possui um grau de liberdade. Responsável pelo movimento de abrir e fechar tendo como finalidade agarrar e soltar um objeto.

2.1.3 Tipos Acionamentos

Os acionamentos de um braço robótico podem ser diversos. Os principais tipos de acionamentos são: hidráulicos, pneumáticos e elétricos. O acionamento do projeto *meArm* é feito através de acionamento elétrico pois a energia é transferida direto para os motores com o intuito de controlar o braço.

2.1.4 Tipos de Controle

O controle de um braço robótico pode ser automático, semi-automático, ou manual. O controle automático quer dizer que não é necessária a interferência humana uma vez que o mecanismo foi acionado para operar uma função. Outro modo de acionamento é o semi-automático que funciona parcialmente automático porém em alguns pontos necessita que uma pessoa supervisione ou opere a máquina de alguma forma. Por outro lado, o controle manual requer a todo momento que o mecanismo seja operacionado por uma pessoa e não possui nenhum tipo de autonomia ([CRAIG, 2005](#)).

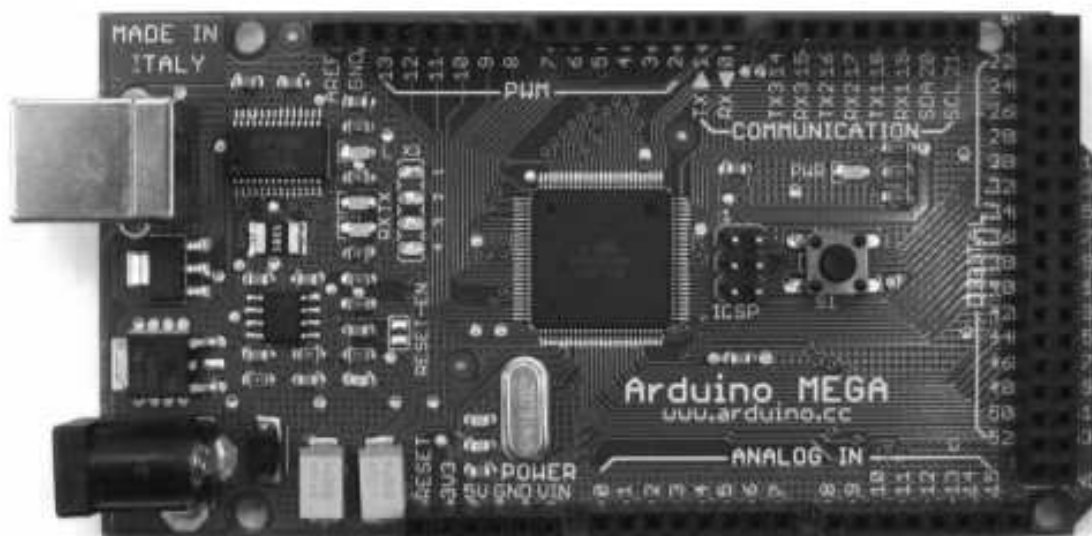
O controle do braço robótico utilizado nesse projeto pode ser classificado na categoria de automático. Esse braço automaticamente, após acionado, escaneia um obstáculo e vai em direção a ele. Quando ele terminar a tarefa o processo se repete até que o equipamento seja desligado.

2.2 Arduino

O Arduino é uma plataforma aberta que visa a união entre o hardware e o software. O hardware tem uma vasta variação em placas, tais como: Uno, Mega2560, Leonardo, Due, ADK, nano, Mini e Esplora. O tipo de placa a ser utilizada depende da necessidade do projeto pois cada um deles tem um tamanho específico assim como também atendem a

necessidades específicas (MCROBERTS, 2011). Na Figura 3, pode-se observar a estrutura física de um Arduino Mega que será utilizado nesse projeto.

Figura 3 – Estrutura de um Arduino Mega.



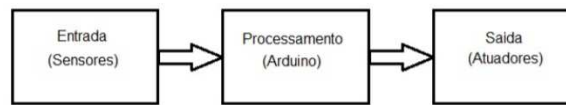
Fonte – (MCROBERTS, 2011)

O Arduino oferece uma série de vantagens aos seus usuários. Essa plataforma é utilizada pois possui baixo custo econômico, devido as placas custarem menos de 50 dólares, poder ser empregada em diversos sistemas operacionais, possuir uma linguagem de programação relativamente fácil quando comparada as outras linguagens (MCROBERTS, 2011), possuir uma plataforma aberta onde pode ser facilmente alterada pelos usuários. Assim, o Arduino se torna uma ferramenta muito desejada no ramo da engenharia e também na produção de novos projetos pelo fato da sua praticidade e economia.

Essa plataforma funciona com padrões de entrada, processamento e saída. A entrada na plataforma Arduino é feita a partir de sensores acoplados ao próprio Arduino, em seguida esse dispositivo processa essa informação e envia para os atuadores que são as saídas (RENNA et al., 2013). A Figura 4 demonstra um diagrama de representação de processos utilizando o Arduino.

Por outro lado, o software do Arduino é utilizado para responder a um conjunto de códigos, onde combinados de forma correta, gera uma ação física nas placas do Arduino. A programação do Arduino é considerada relativamente fácil quando comparada a outros

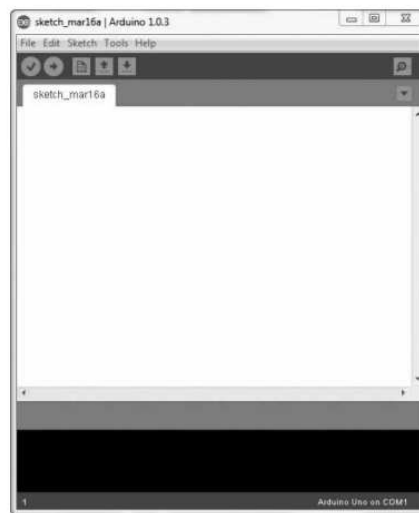
Figura 4 – Bloco de processamento de um Arduino.



Fonte – (RENNA et al., 2013)

tipos de linguagem de programação (MCROBERTS, 2011), tais como C e C++. A Figura 5 mostra a tela inicial de programação do software utilizado pelo Arduino.

Figura 5 – Exemplificação de um IDE.



Fonte – (MCROBERTS, 2011)

O design do IDE facilita a utilização do software do Arduino. O menu principal do IDE facilita a navegação e configuração do sistema de acordo com a necessidade do usuário. Logo, esse design interativo torna o software de fácil uso e mais apropriado para programadores iniciantes.

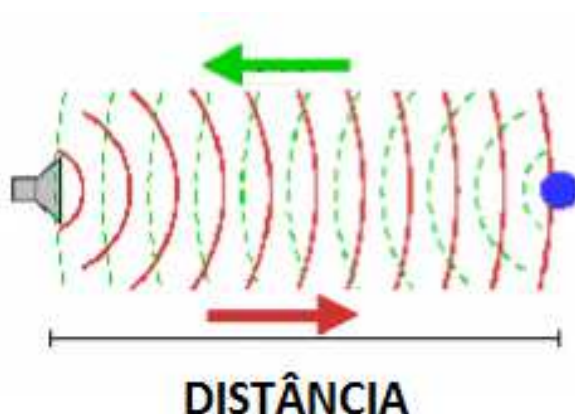
2.3 Sensor Ultrassônico

Uma grande variedade de sensores são encontradas no mercado. Os sensores ultrassônicos variam de acordo com os modelos e marcas. Esses sensores podem variar quanto a precisão, tamanho, formato, assim o usuário deve analisar qual o modelo se adequa melhor ao

projeto em desenvolvimento.

O objetivo principal do sensor ultrassônico é aferir uma determinada distância a um objeto. Esses sensores funcionam através da emissão de ondas ultrassônicas que variam em torno de 42kHz. O resultado é um comprimento de onda que é transformada para centímetros (WENDLING, 2010). A Figura 6 mostra um esquema de funcionamento do sensor ultrassônico.

Figura 6 – Esquema de funcionamento do sensor ultrassônico.



Fonte – (SILVA, 2013)

Outro aspecto importante desse sensor é a sua utilização na detecção de objetos. Esse sensor, através da detecção do bloqueio de onda ultrassônica, identifica que algum obstáculo está obstruindo o caminho dessa onda (WENDLING, 2010), em outras palavras, o sensor envia uma onda e avalia se a onda está voltando para o sensor e assim conclui-se que um objeto está obstruindo a passagem da onda, logo nessa área existe um objeto.

Algumas especificações desse sensor são de fundamental importância para o seu bom uso. De acordo com (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005), é necessária uma corrente de 2mA e uma alimentação de 5 volts em corrente contínua.

O sensor ultrassônico utilizado nesse projeto é um sensor ultrassônico de modelo HC-SR04. A Figura 7 representa um modelo de sensor ultrassônico geralmente comercializado e com possibilidade de integração com a plataforma Arduino. Esse sensor tem uma precisão padrão de 3mm, um alcance que pode variar entre 2 centímetros a 4 metros, além de um

ângulo de efeito de 15 graus.

Figura 7 – Sensor Ultrassônico.



Fonte – ([THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005](#))

Esse sensor se torna ideal para projetos de pequeno porte devido as suas especificações. Além de estar dentro de um alcance que não irá ultrapassar as medidas superiores a 4 metros ele ainda possui um erro irrisório para o caso de projetos como um braço robótico. Logo, espera-se que esse sensor não afete de forma significativa o desenvolvimento do trabalho.

2.4 Servomotor

Servomotores são máquinas que respondem a um sinal de controle. Essa categoria de motor é tipicamente utilizada com o objetivo de controle angular, sendo que esse ângulo pode ter uma variação entre 0 até 360 graus. De acordo com [Bajerski e Abella \(2010\)](#) os componentes presente nesse equipamentos são em geral: circuitos eletrônicos, engrenagens, motor DC (responsável pelo movimento e condutores). De acordo com a Figura 8, pode-se notar os componentes presentes em um servomotor.

Os servomotores uma vez alimentados acionam as engrenagens. A combinação do movimento dessas engrenagens provocam um torque responsável pelo movimento angular do equipamento. Devido as engrenagens serem redutoras, um torque maior é possível e assim um motor menor pode ser utilizado para rotacionar uma carga ([BAJERSKI; ABELLA, 2010](#)). Na Figura 9, é representado o esquema de funcionamento de um servomotor.

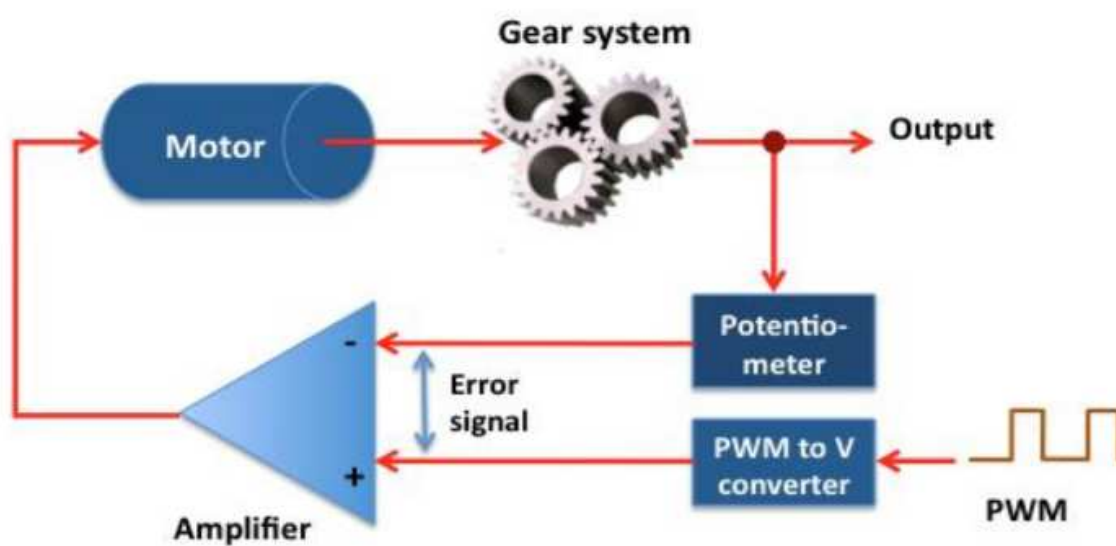
Segundo [Pin, Oliveira e Amaral \(2012\)](#), os servomotores podem ser utilizados em diversos tipos de projetos e não apenas a projetos de locomoção. Dentre as funcionalidades

Figura 8 – Exemplo de sevomotor.



Fonte – (BAJERSKI; ABELLA, 2010)

Figura 9 – Esquema de funcionamento de um servo motor.



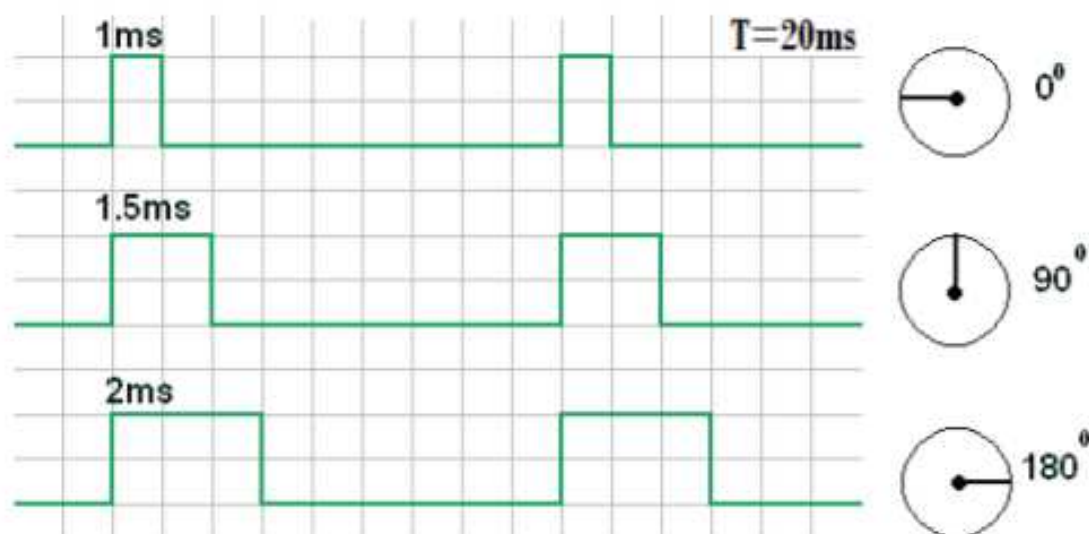
Fonte – (SILVA, 2013)

de um braço robótico, pode-se destacar a utilização dos servos em : aplicação em braços robóticos, acionamento de partes robóticas, posicionamento de sensores, impactos no meio ambiente. Logo, uma vasta utilidade desse equipamento pode ser aplicada dentro de diversas áreas.

O controle da angulação dos servomotores, dar-se através do tempo de duração que

o impulso é aplicado sobre o dispositivo. Um sinal PWM é aplicado sobre o dispositivo. Além disso, a variação máxima e mínima desse impulso varia de acordo com o tipo do motor. De acordo com a Figura 10, pode-se notar a resposta do servo para cada tipo de impulso gerado. [Silva \(2013\)](#), explica que a resposta do motor é dada da seguinte forma:

Figura 10 – Resposta do servomotor a um sinal PWM.



Fonte – ([SILVA, 2013](#))

- 1 ms, movimentação anti-horário do eixo, posicionando o eixo em 0 graus.
- 1,5 ms, movimentação anti-horário do eixo, posicionando o eixo em 90 graus.
- 2 ms, movimentação anti-horário do eixo, posicionando o eixo em 180 graus.

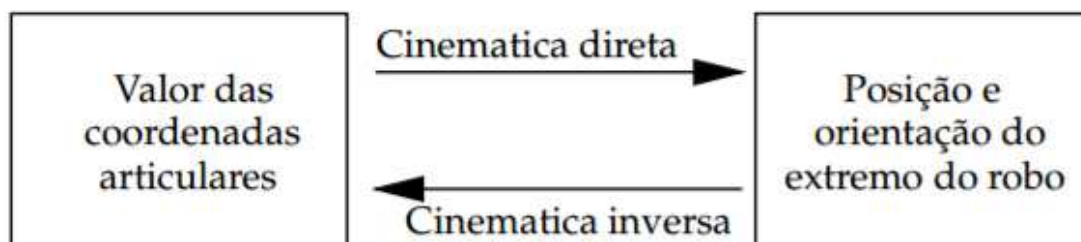
Para que os servos respondam de maneira correta algumas especificações devem ser seguidas. Primeiramente, a frequência dos impulsos devem ser de 50 Hz, ou seja os pulsos devem ser gerados em um intervalo de 20 ms ([SILVA, 2013](#)). Além disso, a tensão de operação deve variar em um intervalo entre 4,8 e 6 volts. Por último, a carga posicionada sobre o eixo do motor deve ser analisada de acordo com as especificações de torção do motor para que o dispositivo não venha a apresentar alterações na angulação.

2.5 Cinemática do Robô

A cinemática do robô é o estudo do movimento tendo em vista uma referência. Esse conceito se baseia na descrição analítica da movimentação de um robô em função do tempo, além de encontrar relações entre a velocidade de movimento das junções e das extremidades (PIERI, 2002).

Divide-se em dois estudos fundamentais a cinemática do robô. Primeiramente pode-se analisar a cinemática direta, que determina o posicionamento final de uma extremidade de um robô, como a posição da garra de um braço robótico por exemplo, de acordo com a angulação desempenhada pelas articulações (PIERI, 2002). O outro estudo é chamado cinemática inversa, onde dada uma determinada posição o mecanismo deve se direcionar para que chegue a determinado ponto de referência. Logo, a diferença entre esses dois estudos é que na cinemática direta é fornecido os ângulos das junções e assim a extremidade do dispositivo irá alcançar um alvo enquanto na inversa será o ângulo que será determinado. A Figura 11 representa um esquema entre a diferença dos tipos de cinemática.

Figura 11 – Esquema representativo entre a cinemática inversa e direta

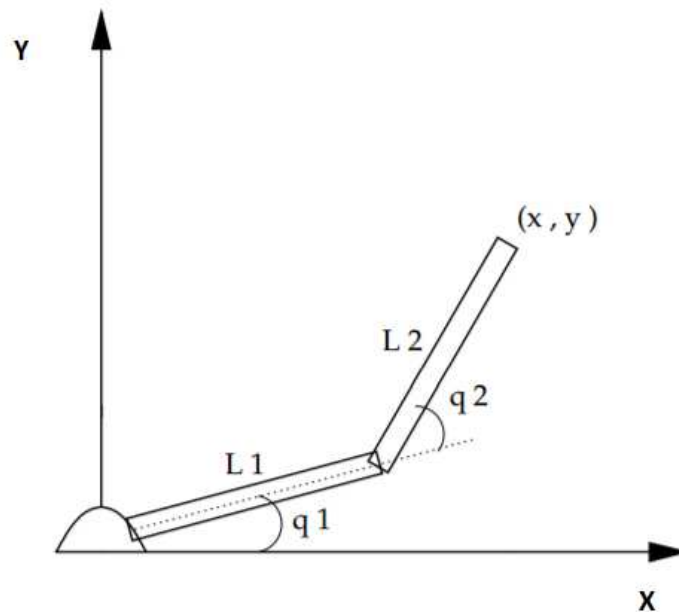


Fonte – (PIERI, 2002)

2.5.1 Cinemática direta

A cinemática direta baseia sua resolução no uso de álgebra vetorial e matricial. Para a solução da cinemática direta, utiliza-se basicamente dois tipos de solução que são as transformações homogêneas ou o uso de quartetos (PIERI, 2002). Dependendo da complexidade do mecanismo, ou seja, dos graus de liberdade uma representação matemática pode ser dada. A Figura 12 representa um esquema de um robô de baixa complexidade.

Figura 12 – Ilustração de braço robótico para um cálculo de cinemática direta



Fonte – (PIERI, 2002)

2.5.2 Cinemática Inversa

Atualmente a robótica busca por mecanismos que tenham uma inteligência artificial e consigam automaticamente capturar objetos sem a intervenção humana a todo instante. A cinemática inversa tem como objetivo determinar o ângulo entre as juntas de um robô sendo fornecida uma determinada posição espacial.

Para o cálculo da cinemática inversa, a configuração do robô é de extrema importância e pode modificar completamente a modelagem matemática (PIERI, 2002). Dentre os métodos de resolução para esse tipo de cinemática, pode-se destacar os seguintes métodos: geométrico e transformações homogêneas. Para o cálculo da cinemática inversa desse mecanismo representado na Figura 12 temos as seguintes equações 2.1 e 2.2 para as coordenadas em x e y :

$$x = L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) \quad (2.1)$$

$$y = L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (2.2)$$

Sendo, L tamanho dos braços e q o ângulo entre as juntas.

Método geométrico é geralmente utilizado em mecanismos de baixa complexidade (SCIAVICCO; SICILIANO, 1996). Baixa complexidade defini-se ao número de graus de liberdade de um robô, ou seja, quanto menor o grau de liberdade de um robô, menor será a sua complexidade. A utilização desse método basei-se unicamente em encontrar as relações das coordenadas com os ângulos. De acordo com as observações feita por Craig (2005), o desenvolvimento matemático para um braço robótico utilizando esse método é dado da seguinte forma:

Utilizando a Equação 2.3 pode-se calcular o ângulo da base do braço.

$$q_1 = \beta + \gamma \quad (2.3)$$

Sendo,

$$\beta = \text{atang2}(x, y) \quad (2.4)$$

$$\gamma = \frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (2.5)$$

Utilizando a Equação 2.6 pode-se calcular o ângulo superior do braço.

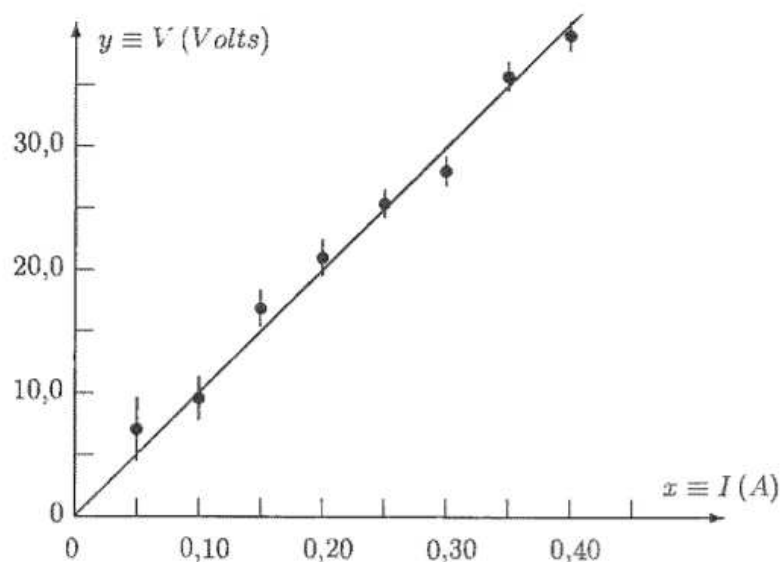
$$\cos(q_2) = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (2.6)$$

Método de transformações homogêneas é possível obter a representação matemática inversa de um sistema através da cinemática direta. De acordo com PIERI (2002), esse tipo de metodologia não é muito utilizada devido a sua complexidade pois para um sistema de seis GDI, necessita-se de doze equações tornando a modelagem matemática complexa.

2.6 Regressão Linear

A regressão linear é um modelo aplicado para o controle de processos a fim de comparar dois processos relacionados (MONTGOMERY, 2009). Em outras palavras, essa metodologia visa alinhar um conjunto de pontos a uma reta (VUOLO, 1996). A Figura 13 exemplifica um ajuste de pontos em uma reta utilizando a regressão linear. De acordo com Montgomery (2009), essa análise pode ser feita em uma vasta variação de processos, tais como: controle, predição e otimização.

Figura 13 – Ajuste da reta utilizando a regressão linear.



Fonte – (VUOLO, 1996)

Na Figura 13, pode-se notar que os pontos são os valores achados e a linha é uma delineação de acordo com esses pontos. A regressão linear é apenas uma forma de criar um padrão para estipular, através de uma média, qual o valor é para ser atingido. Por outro lado, esse tipo de metodologia não corrige completamente o erro na maioria das vezes, apenas reduz. Essa redução pode ser quantificada através de novos testes e assim havendo necessidade, efetua novamente o procedimento até que o erro encontrado seja aceitável.

Uma série de procedimentos devem ser seguidos para que a regressão linear possa ser efetiva. Primeiramente, a amostra deve ser feita de forma aleatória, ou seja, a sequência de testes feitos deve ser completamente ao acaso. Outro aspecto é o tamanho da amostra, sendo o desejável uma amostra de número considerável. De acordo com Vuolo (1996),

quanto maior a quantidade amostral melhor será o resultado para uma correção de erro. Assim, deve-se analisar a aleatoriedade e a o tamanho dos casos que foram verificados a fim de ter um melhor uso dessa ferrameta.

2.7 Teste t

O teste t é um estudo vindo da estatística com o intuito de análise de dados. De acordo com [Montgomery \(2009\)](#), essa metodologia testa hipóteses com base em conceitos estatísticos com a intenção de rejeitar ou não uma hipótese nula.

Existe dois tipos de análises sobre o teste t chamados unilateral ou bilateral. A metodologia unilateral visa ter apenas um ponto de análise, ou seja, para conclusões somente um ponto é analisada. Por outro lado, o teste bilateral analisa os dados dentro de um intervalo de confiança ([MONTGOMERY, 2009](#)).

Geralmente, o teste t baseia-se em duas hipóteses. A primeira é que os resultados não possuem diferença, sendo assim quando analisadas duas amostras infere-se que elas são iguais. O outro teste seria que os valores apresentam diferença nos testes ou seja, a modificação ou estudo possui uma diferença real e não apenas ao acaso. A representação simbólica dessas hipóteses são: H_0 representando a hipótese nula e H_1 representando a hipótese alternativa.

$$H_0 : u_1 = u_2 \quad (2.7)$$

Se o teste for bicaudal a hipótese alternativa será:

$$H_1 : u_1 \neq u_2 \quad (2.8)$$

Porém, o teste unilateral pode ser diferenciar em duas análises.

$$H_1 : u_1 - u_2 > 0 \quad (2.9)$$

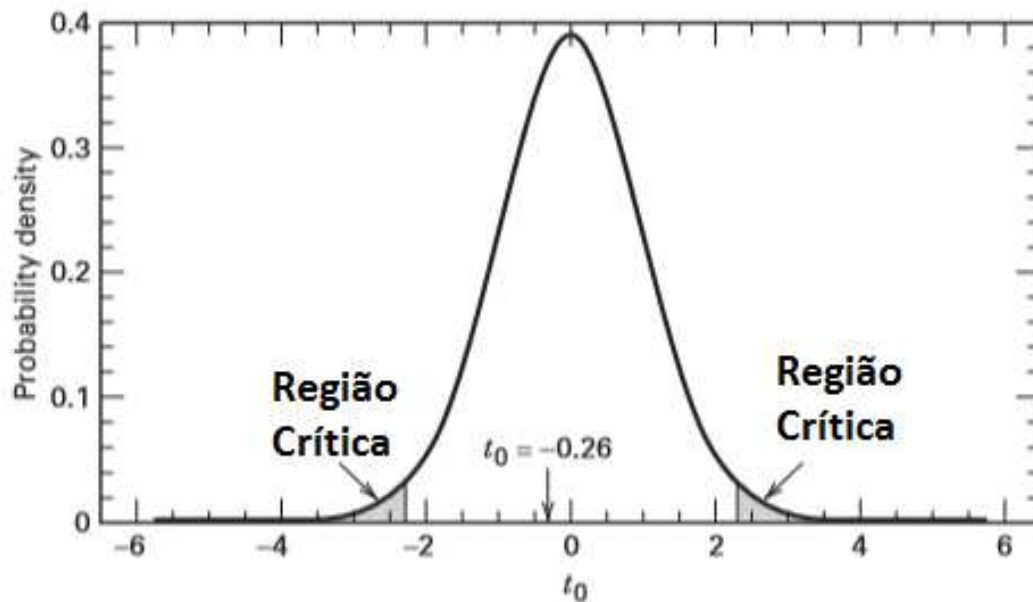
ou,

$$H_1 : u_1 - u_2 < 0 \quad (2.10)$$

Para os parâmetros de hipóteses devem ser estabelecidos intervalos de confiança. Dependendo do tipo de procedimento a ser analisado, deve-se estabelecer um nível de confiança aproximado a 100 %. Torna-se aceitável valores iguais ou menores a 5% de erro apenas para que a hipótese seja válida ou negada.

A Figura 14, demonstra um teste bicaudal. Pode-se analisar que entre os valores de 2 e -2 existe a defesa da hipótese H_0 enquanto valores fora desse intervalo são alocados a hipótese alternativa. Quanto maior a precisão exigida, menor será o intervalo de confiança e consequentemente mais precisão será necessária para que a hipótese seja aceita.

Figura 14 – Ilustração de um teste bicaudal



Fonte – (MONTGOMERY, 2009)

2.8 Teste Z

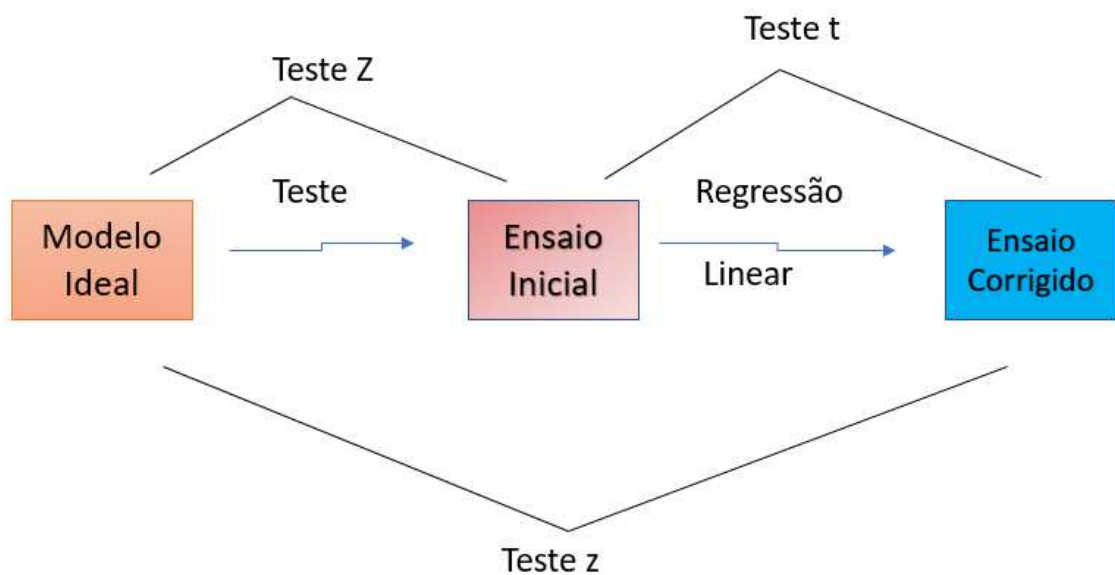
O teste Z é um teste utilizado com o intuito de aproximar uma distribuição estatística a uma distribuição normal. Em outras palavras, esse tipo de estudo é feito com o intuito de comparar duas amostras ou até mesmo uma população com uma amostra (MONTGOMERY, 2009).

Esse teste estatístico pode ser unilateral ou bicaudal. O teste unilateral igualmente ao teste t tem o intuito de realizar a análise a apenas maior ou menor do que um ponto de referência. Por outro lado, o bicaudal visa analisar a amostra com a população dentro de um limite superior e inferior.

3 Metodologia

A metodologia desse trabalho compõe-se em quatro etapas: obtenção de um modelo ideal, ensaio inicial, correção e análise dos resultados através de médias, teste t e Z. A Figura 15, demonstra as etapas que serão detalhadas nas seções seguintes. O modelo ideal serve de parâmetro para que os ensaios possam ser analisados e comparados. Primeiramente é calculado as faixas ideais de valores, em seguida são feitos ensaios iniciais, por fim é aplicada correção através de uma regressão linear.

Figura 15 – Ilustração da metodologia proposta



Fonte – Autor

De acordo com a Figura 15, pode-se notar a relação entre os processos. Primeiramente o modelo ideal é proposto, assim os primeiros testes são efetuados. Com os testes encontra-se o erro e é aplicada a regressão linear sobre esse erro. Esse erro é corrigido e assim encontrado novos valores em uma segunda bateria de ensaios. Em seguida, são comparados os dois testes com o modelo ideal para que se possa definir se houve ou não uma melhoria. Por último, analisa-se os dados encontrados através dos testes t comparando as amostras antes e após a correção e em seguida o teste Z compara a população ideal com os resultados

dos testes.

3.1 Material utilizado

Essa seção é utilizada especificamente para demonstrar os materiais que serão utilizados nesse trabalho. A seleção desses equipamentos é de fundamental importância para o projeto, pois cada dispositivo tem sua função específica. Além disso, é demonstrado como os sensores funcionam dentro do projeto a fim de poder otimizar os resultados.

Dentro desse projeto tem-se uma diversidade de equipamentos utilizados. Esses materiais são: arduino, servo motor, sensor ultrassônico, fonte de alimentação, protoboard e braço *meArm*.

Tabela 1 – Lista dos materiais utilizados

Equipamento	Modelo	Quantidade
Arduino	Mega2560	1
Servo motor	9g Tower Pro	4
Sensor Ultrassônico	HC-Se04	1
Fonte de alimentação	-	1
Protoboard	-	1
Estrutura do braço	<i>meArm</i>	1

A Tabela 1, demonstra uma lista com os principais equipamentos utilizados para o funcionamento do sistema. Porém, alguns itens não são citados acima tais como: cabos e notebook.

3.1.1 Sensor ultrassônico modelo HC-Sr04

O modelo ultrassônico utilizado nesse projeto é o sensor de modelo HC-Sr04. Esse sensor tem um alcance que varia entre 20 mm e 4000 mm e ainda possui uma precisão aproximada de 3 mm (NAKATANI; GUIMARÃES; NETO, 2013). Além disso, esse equipamento necessita de 5 volts de alimentação e produz 8 ciclos de pulsos a 40 kHz. A dimensão desse sensor é 45 x 20 x 15 (mm). Na Figura 16, pode-se perceber o funcionamento desse dispositivo.

Esse sensor é composto de quatro pinos principais que desempenham funções específicas. Esses pinos são divididos entre: Vcc (corrente), Trig (entrada), Echo (saída),

Figura 16 – Diagrama de funcionamento do sensor HC-SR04



Fonte – (NAKATANI; GUIMARÃES; NETO, 2013)

GND (terra) (FREAKS, 2016).

Figura 17 – Sensor HC-SR04



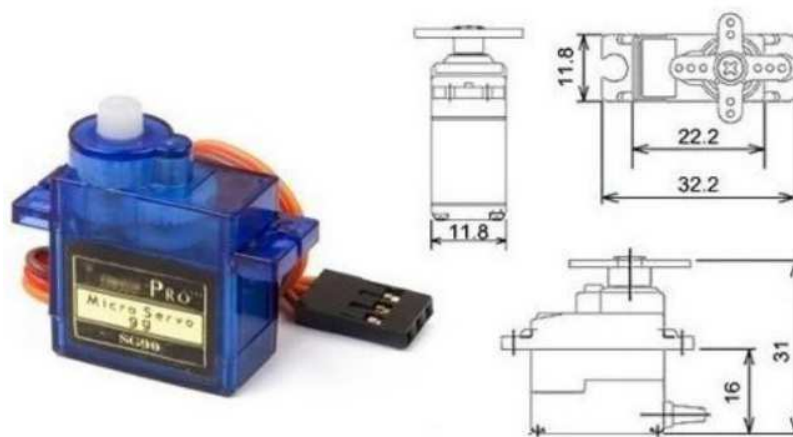
Fonte – (FREAKS, 2016)

A Figura 17 representa o modelo utilizado nesse projeto. Pode-se perceber na parte inferior os 4 pinos que serão utilizados e na parte superior as passagens de entrada e saída dos pulsos.

3.1.2 Servo motor modelo 9g Tower Pro

O modelo do servo motor utilizado nesse projeto é o servo motor 9g Tower Pro. De acordo com [BATISTA \(2011\)](#), esse servo possui um ângulo que varia de 0 a 180 graus. Porém, alguns testes feitos demonstra que o motor utilizado nesse projeto suporta uma variação entre 0 a 170 graus a fim de não danificar o equipamento. Sendo assim, é necessária uma análise mais precisa em prol de um bom funcionamento desse motor.

Figura 18 – Servo moto 9g Tower Pro



Fonte – ([ALBERNAZ, 2015](#))

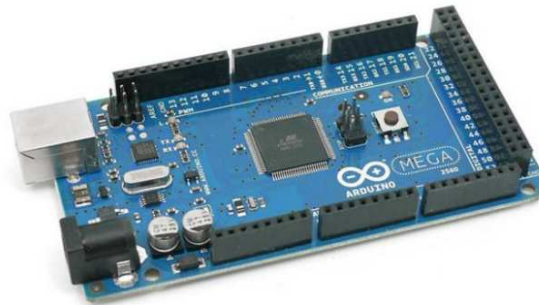
A Figura 18, representa o modelo do motor usado nesse projeto. Esse motor tem 3 finalidades nesse projeto: movimento da base, do braço e da garra.

3.1.3 Arduino modelo Mega 2560

A Figura 19, representa o modelo utilizado nesse trabalho. O modelo de arduino utilizado nesse sistema é o Arduino Mega2560.

Esse modelo possui 54 pinos para entradas e saídas e, além disso, este Arduino pode ser alimentado via USB ou por fonte de alimentação externa [Mega \(2011\)](#). Neste projeto, o Arduino recebeu alimentação via notebook, utilizando-se assim uma energia de 5V para alimentação.

Figura 19 – Arduino mega2560



Fonte – (MEGA, 2011)

3.1.4 Braço robótico modelo *meArm*

O modelo *meArm* é um modelo aberto de braço robótico onde todos os usuários podem ter acesso. Esse braço possui três divisões fundamentais que são: garra, braço e base. Além disso, esse dispositivo possui 4 GDL.

Figura 20 – Braço robótico *meArm*

Fonte – (SABO et al., 2016)

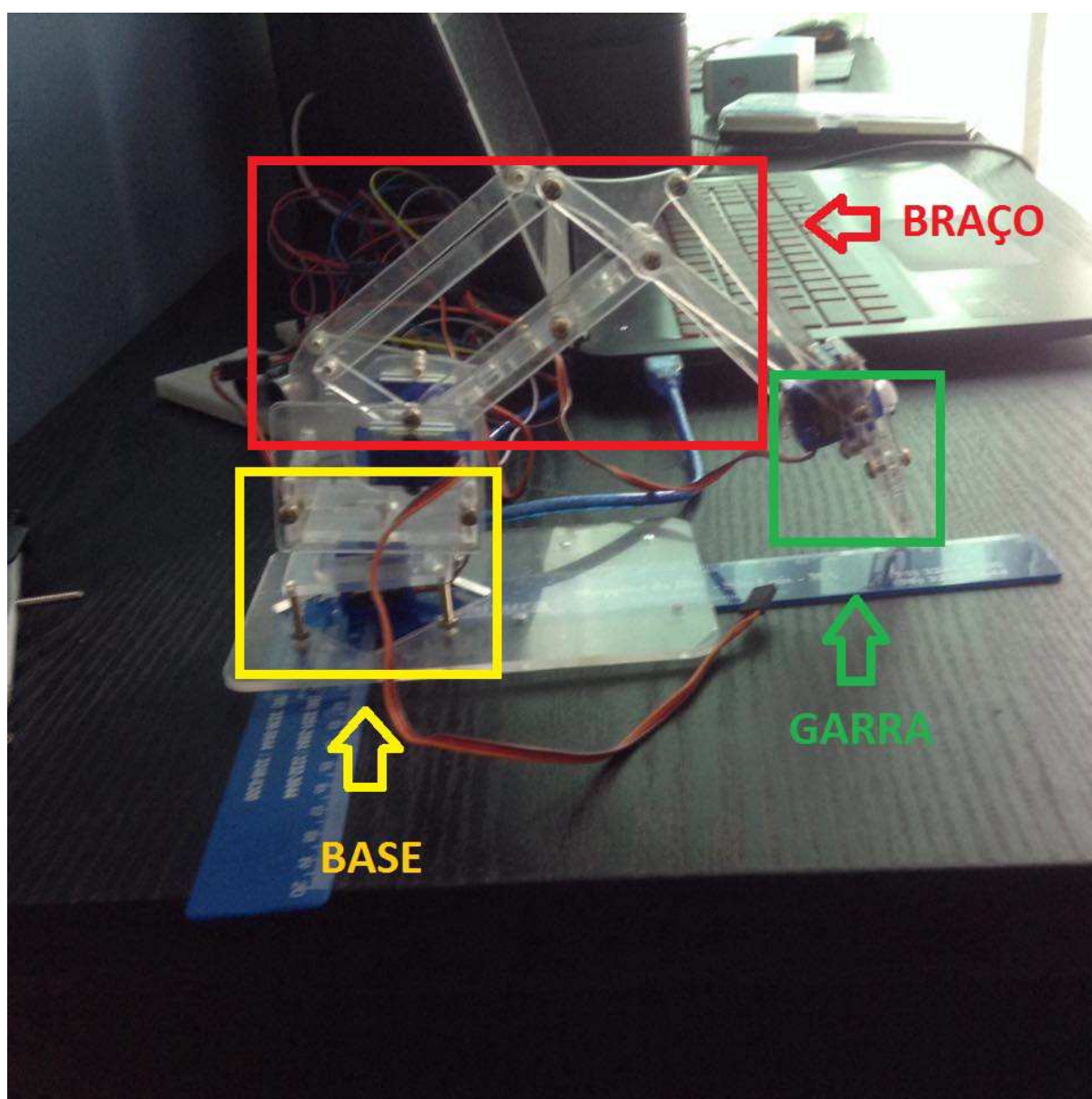
De acordo com a Figura 20, é possível notar que quatro motores são acoplados a esse equipamento. Esses servos possuem a funcionalidade de dar liberdade para que o braço tenha tanto um alcance na vertical como da horizontal.

Nesse projeto esse sistema possui medidas específicas. O braço possui uma altura

total de 40 mm, espessura de 3 mm e peso de 170 g, além de uma largura média de 40mm. A garra consegue ter uma abertura de até 55 mm. O alcance do braco chega em média até a 20 cm.

A fim de facilitar o entendimento das análises, a Figura 21, demonstra a divisão do braço robótico em três partes. De acordo com a Figura, em verde está representado a garra, em vermelho o braço e em amarelo a base.

Figura 21 – Representação da divisão dos pontos do braço



Fonte – Autor

3.2 Obtenção de um modelo ideal

Nessa parte da metodologia tem-se por objetivo em encontrar um modelo que sirva de base para os testes. Um ponto de referência se torna necessário quando buscamos melhoria de um sistema. Logo, utilizamos um modelo ideal para que seja possível encontrar a distorção entre o desejado e o real.

O primeiro passo feito nesse trabalho foi a escolha de um modelo ideal para que possa servir de parâmetro para o cálculo dos erros. Esses modelos dividem-se em um modelo ideal para : o sensor ultrassônico, a base e o braço.

3.2.1 Modelo ideal para o sensor ultrassônico

O projeto de um modelo ideal foi feito utilizando instrumentos de medição. Esse instrumento de medição é posicionado entre o sensor e o objeto a ser medido e assim, pode-se analisar a diferença de resultados entre o sensor e o instrumento de medição. O modelo ideal precisa ter uma precisão em milímetros e além disso, variar entre 40 mm e 20 mm pois seria um alcance dentro dos limites do braço robótico.

3.2.2 Modelo ideal para a base

O modelo ideal para a base tem o propósito de verificar o ângulo de toda a estrutura de 0 a 180 graus. Após enviado um comando, esse braço robótico deve girar em torno de 0 a 180 graus e assim posicionar toda a estrutura para que o objeto seja capturado. Porém, como a base é parada pelo sensor ultrassônico a correção sobre a base não é necessária. Esse estudo sobre a base pode servir de parâmetro para um futuro projeto onde seria aplicada a cinemática direta. Foi utilizado para calcular esse modelo um instrumento de medição circular para que os resultados pudessem ser comparados com os dados encontrados durante os testes.

3.2.3 Modelo ideal para o braço

Com o intuito de direcionar o braço até o objeto o modelo utilizado é o mesmo referente ao do sensor ultrassônico. É posicionada uma régua entre a base do braço e o objeto e assim acompanhado qual seria a posição que esse braço necessitaria atingir.

3.3 Aplicação da cinemática inversa

A cinemática inversa nesse trabalho tem a função de automatizar o processo do braço robótico. Essa ferramenta é utilizada sobre os servos responsáveis pela movimentação do braço e assim possibilitar que a garra alcance o objeto. As Equações 2.1 e 2.2 demonstram como foi feito o cálculo para essa cinemática inversa. Sendo que L_1 possui um valor de 87 mm e L_2 representa 180 mm (esse valor representa o *braço₂* e a garra). Além disso, o valor de y é equivalente a -70 mm pois o braço necessita descontar a altura entre o solo e os servos que movimentam os braços.

3.4 Ensaio inicial

Essa seção representa o erro encontrado nos sensores e motores do braço robótico. Tem-se a representação do erro do sensor ultrassônico, além da base e do braço. Segue também toda a ligação feita entre o Arduino e esses sensores para que todos os dados fossem gravados e posteriormente analisados.

3.4.1 Ensaio inicial para o sensor ultrassônico

O cálculo para o erro do sensor ultrassônico, baseia-se em comparar o valor ideal e o encontrado nos testes iniciais. Para esse teste o Arduino aciona o sensor ultrassônico e recebe a distância que esse sensor adquiriu até atingir um objeto. A Equação 3.1 foi utilizada para os experimentos iniciais.

$$distance = (0.17duration) - 4 \quad (3.1)$$

Sendo, *distance* a distância que desejamos encontrar é a *duration* que representa a duração do pulso. Além disso 0.17 representa o fator de correção necessário para transformar esse pulso em milímetros, pois a unidade de resposta do sensor ultrassônico é dada em outra unidade de medida. Por fim, a subtração de 4 no final da Equação 3.1 representa o espaço em branco do instrumento de medição, logo esse espaço deve ser removido.

O primeiro ensaio deve ser feito de forma aleatória para que possa ter um efeito real. Assim, de acordo com a Tabela 2, temos a representação de como foram executados esses testes.

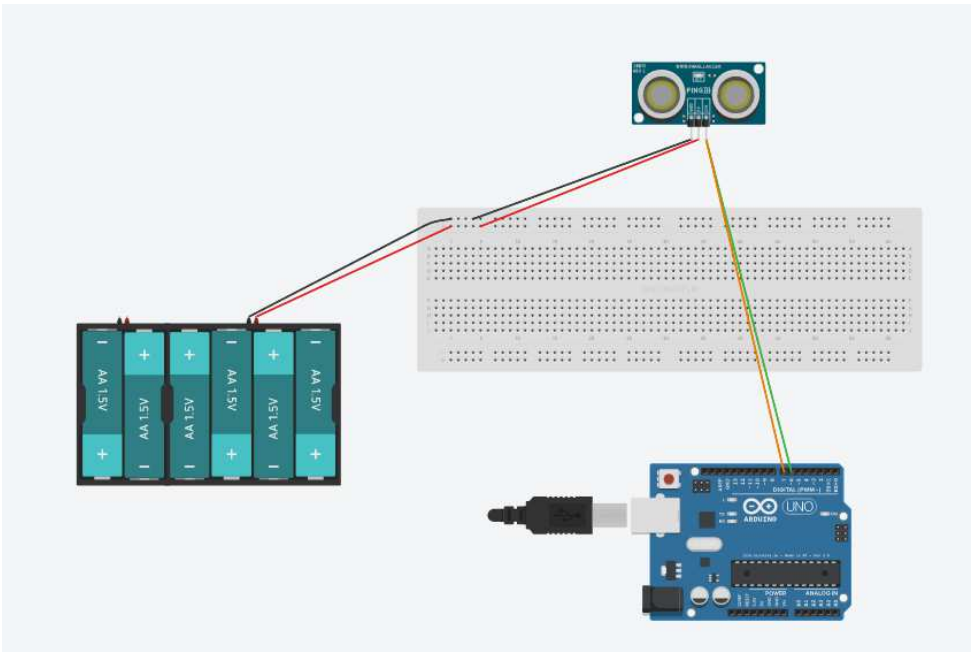
Tabela 2 – Tabela de aleatoriedade para o ensaio inicial do sensor ultrassônico

Bateria de teste	Sequência aleatória do sensor ultrassônico (mm)
1	4 - 12 - 9 - 7 - 10 - 14 - 6 - 15 - 5 - 13 - 11 - 8
2	15 - 5 - 13 - 12 - 10 - 8 - 14 - 11 - 6 - 7 - 4 - 9
3	7 - 10 - 9 - 11 - 13 - 6 - 14 - 4 - 8 - 15 - 5 - 12
4	8 - 11 - 4 - 10 - 14 - 15 - 6 - 9 - 13 - 5 - 7 - 2
5	14 - 12 - 13 - 5 - 9 - 7 - 10 - 8 - 11 - 4 - 6 - 15
6	7 - 8 - 11 - 12 - 15 - 5 - 10 - 14 - 6 - 13 - 4 - 9
7	14 - 9 - 4 - 6 - 7 - 5 - 12 - 15 - 8 - 11 - 13 - 10
8	4 - 7 - 14 - 12 - 9 - 8 - 15 - 11 - 10 - 5 - 6 - 13
9	4 - 9 - 11 - 5 - 13 - 6 - 15 - 7 - 10 - 12 - 8 - 12
10	8 - 15 - 7 - 6 - 9 - 13 - 14 - 11 - 5 - 12 - 4 - 10

De acordo com a Tabela 2, analisa-se o grupo amostral utilizado nesses testes. Como existe uma quantidade amostral significativa e de forma aleatória, logo esse teste pode ser considerado válido.

Pode-se notar na Figura 22, a montagem eletrônica do sensor ultrassônico. Esse sensor liga-se ao *Trig* na porta 6 e o *Echo* na porta 7. Além disso, a alimentação desse dispositivo foi feita por 6 pilhas AA de 1.5 V.

Figura 22 – Montagem eletrônica do sensor ultrassônico



Fonte – Autor

3.4.2 Cálculo do erro para a base

O cálculo do erro para a base basei-se na angulação desempenhada pela estrutura. Em outras palavras, o braço robótico gira com o intuito de posicionar o braço do robô na direção onde o objeto se encontra. Esse ângulo deve variar somente entre 15 a 160 graus pois o servo motor referente a base quando movido fora dessas faixa de valor pode ser danificado.

Tabela 3 – Tabela de aleatoriedade para o erro da base

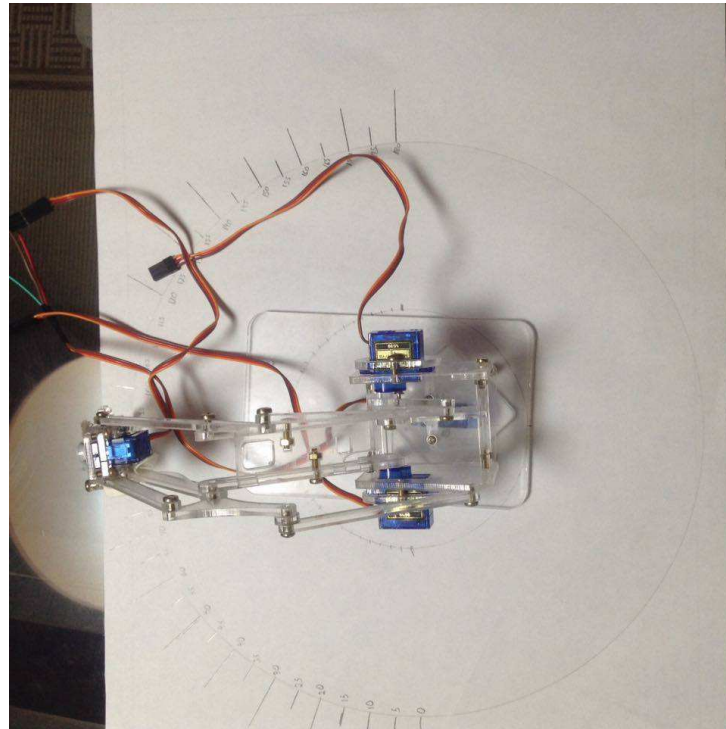
Bateria de teste	Sequência aleatória da base
1	110 - 120 - 20 - 155 - 105 - 60 - 50 - 75 - 100 - 90 - 30 - 150 - 70 - 45 - 73 - 85 - 145 - 135 - 40 - 125 - 80 - 35 - 95 - 25 - 115 - 65 - 80 - 65 - 160 - 55
2	105 - 140 - 45 - 75 - 55 - 135 - 85 - 15 - 155 - 150 - 130 - 100 - 65 - 35 - 75 - 50 - 90 - 60 - 135 - 110 - 80 - 85 - 40 - 105 - 90 - 20 - 30 - 145 - 25 - 50
3	120 - 110 - 55 - 125 - 115 - 95 - 35 - 65 - 105 - 130 - 70 - 60 - 100 - 40 - 30 - 75 - 50 - 135 - 115 - 95 - 15 - 90 - 145 - 85 - 45 - 140 - 150 - 20 - 145 - 160
4	153 - 107 - 37 - 62 - 145 - 64 - 160 - 39 - 41 - 50 - 86 - 122 - 120 - 157 - 77 - 104 - 25 - 150 - 116 - 35 - 85 - 139 - 21 - 71 - 60 - 83 - 81 - 151 - 75 - 28
5	56 - 80 - 30 - 41 - 90 - 113 - 15 - 160 - 93 - 144 - 91 - 141 - 108 - 42 - 135 - 158 - 138 - 106 - 62 - 123 - 54 - 60 - 16 - 45 - 128 - 70 - 145 - 23 - 58 - 79
6	44 - 140 - 65 - 103 - 99 - 31 - 123 - 80 - 135 - 24 - 25 - 22 - 137 - 85 - 106 - 149 - 20 - 115 - 32 - 156 - 23 - 150 - 89 - 61 - 37 - 100 - 38 - 29 - 129 - 59
7	110 - 151 - 147 - 46 - 21 - 110 - 112 - 142 - 119 - 123 - 150 - 95 - 47 - 84 - 53 - 49 - 101 - 48 - 57 - 91 - 122 - 104 - 37 - 145 - 43 - 60 - 160 - 157 - 146 - 58

Como identificado na Tabela 3, os valores demonstram ângulos entre 15 a 160 graus. Esses valores são aproximados para valores múltiplos de 5, ou seja, uma valor encontrar como 99 pode ser testado como 100 ou 95.

Ao fazer o teste é importante ressaltar a representação desse ângulo para o funcionamento da estrutura. O ângulo encontrado não representa diretamente o ponto central da garra e sim o ponto lateral da mesma. Para um ajuste mais preciso é necessário que seja somado as laterais da garra até o seu centro e assim o braço robótico será posicionado exatamente no ponto central de abertura do pegador.

Os testes foram feitos com uma quantidade amostral de 210 experimentos. Esses experimentos foram feitos em momentos diferentes para que o equipamento pudesse ser conectado e desconectado, ou seja, cada bateria de testes foi feita separadamente.

Figura 23 – Representação do teste da base



Fonte – Autor

Para esse teste foi utilizada uma circunferência. O raio desse círculo foi feito de acordo com a abertura do braço robótico. Os valores representados foram de 0 a 180 graus a fim de evitar que o mecanismo apresentasse algum erro fora da faixa de 15 a 160 graus. O ponto central dessa circunferência foi fixada sobre o eixo do servomotor responsável por movimentar a base como visto na Figura 23.

3.4.3 Ensaio inicial para o braço

Primeiramente, para a análise do ensaio inicial do braço é necessária uma tabela de ajustes para o cálculo da movimentação do mesmo. Esta adaptação representa uma relação entre o ângulo responsável por mover a garra em direção ao objeto e a distância, ou seja quanto variaria a distância dependendo do ângulo. Para essa análise o fator importante é a distância em milímetros que será percorrida pelo braço e não o ângulo. A Tabela 4 representa essa conversão.

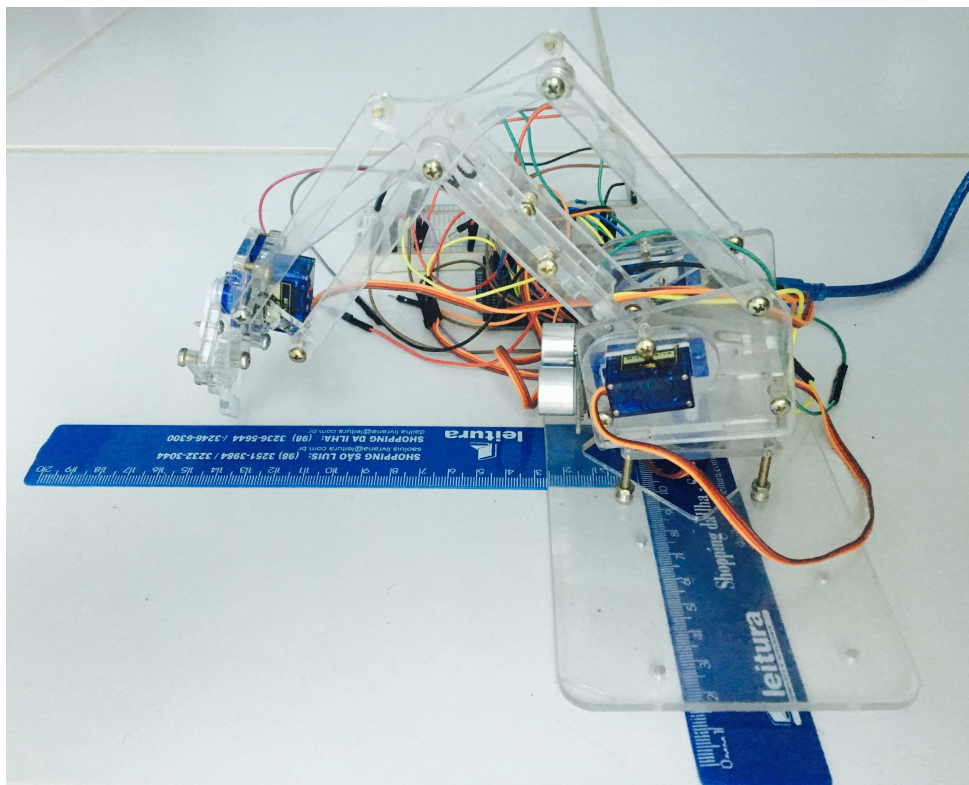
Ainda na Tabela 4, é possível identificar que a faixa de testes variam entre 60 mm e 140 mm. Esses testes possuem essa escala para que os valores permaneçam dentro dos

Tabela 4 – Tabela dos valores de referência para o ensaio do braço

Ângulo (em graus)	Distância (mm)
60	134
70	128
80	122
90	114
100	106
110	95
120	83
130	68
140	48

limites alcançado pelo braço robótico sem que nenhum dos sensores funcione de forma irregular dos padrões exigidos.

Figura 24 – Representação do teste do braço



Fonte – Autor

Os testes utilizaram duas réguas para identificar a posição final da garra como demonstrado na Figura 24. Além disso, a base permanecia sempre na mesma posição para que não houvesse uma angulação e assim alterasse o resultado encontrado.

Valores de distância foram selecionados entre 6 a 14 aleatoriamente como demonstrados na Tabela 5. Esses valores eram multiplicados por 10 e em seguida comparados com os valores de ângulos encontrados na Tabela 4. Esse teste utilizou uma quantidade amostral de 88 experimentos dividido em 8 baterias de 9 testes cada.

Tabela 5 – Tabela de aleatoriedade para o braço

Bateria de teste	Sequência aleatória do braço
1	13 - 8 - 10 - 9 - 14 - 12 - 6 - 7 - 11
2	11 - 13 - 8 - 9 - 7 - 12 - 10 - 6 - 14
3	11 - 8 - 13 - 14 - 7 - 12 - 9 - 6 - 10
4	13 - 12 - 11 - 8 - 10 - 7 - 9 - 14 - 6
5	8 - 7 - 10 - 12 - 9 - 13 - 6 - 14 - 11
6	8 - 10 - 9 - 13 - 7 - 14 - 11 - 6 - 12
7	8 - 13 - 10 - 9 - 14 - 12 - 7 - 6 - 11
8	14 - 6 - 11 - 7 - 9 - 10 - 12 - 8 - 13

3.5 Aplicação da Regressão Linear

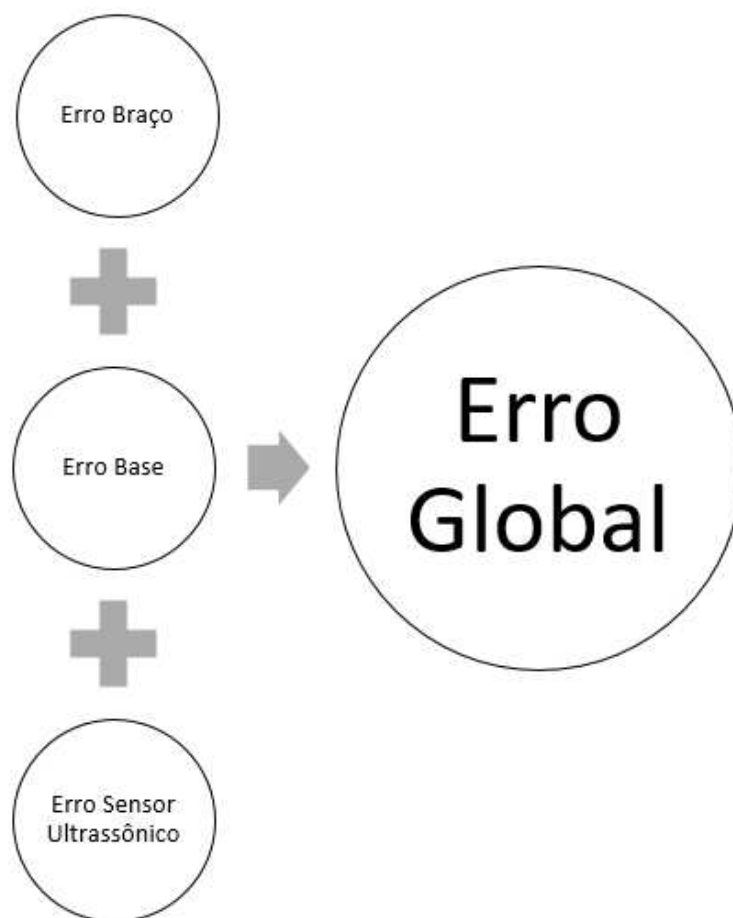
Todos os testes feitos nesse projeto utilizaram a regressão linear para que o erro pudesse ser analisado. Todos os dados foram divididos em x e em y , sendo o primeiro referente ao valor desejado e o outro ao valor encontrado em cada teste. Com isso, usando as ferramentas de análise do *Excel* versão 2016, foi gerado gráficos dessa regressão.

Após aplicado a regressão linear, uma fórmula linear é gerada com seus coeficientes. Esses dados são aplicados para um segundo teste e assim compara-se os valores encontrados com os valores do ensaio inicial e do modelo ideal.

Os testes de regressão foram aplicados nas duas principais partes do mecanismo. Primeiramente a regressão visa corrigir o sensor ultrassônico, pois é de fundamental importância que a distância adquirida por esse dispositivo não interfira nos outros testes. Em seguida, o braço que é a parte onde é aplicada a cinemática inversa também recebe a aplicação da regressão linear. As aplicações feitas nesse projeto são individuais, porém o impacto gerado individualmente gera uma modificação global.

Observando a Figura 25, é possível notar que o erro global teria grande impacto sobre o projeto. Esse impacto poderia acontecer devido aos somatório do erro de todos os sensores utilizados nesse projeto.

Figura 25 – Exemplificação do erro global



Fonte – Autor

3.6 Correção do sistema

O cálculo da correção, baseia-se na análise da regressão linear. Após ser encontrada a representação linear referente ao erro nos testes iniciais, ela é aplicada sobre o algoritmo na plataforma Arduino e novos valores serão encontrados para o mesmo teste. Assim, uma média aritmética é tirada tanto do erro quanto da correção com o intuito de comparar os resultados obtidos. Além disso, uma representação feita através de um gráfico *box plot* é utilizada com o intuito de facilitar a análise representada através da diferença ao ponto que deveria está posicionada a garra.

3.7 Utilização do teste t

O intuito de utilizar o teste t nesse experimente é de confirmar que existe uma melhora no sistema e que essa melhora não é ao acaso. Primeiramente busca-se aplicar o teste t para comparar os valores dos ensaios iniciais e os testes após a correção, verificando se eles são iguais ou se a média dos erros nos primeiros ensaios são superiores aos dos testes corrigidos.

Essa comparação será feita através da utilização dos valores encontrados no testes sem nenhum ajuste e depois nos ensaios ajustados. Assim, será verificado se os valores iniciais realmente diferem dos valores corrigidos e além disso se as médias realmente são maiores antes do ajuste. Em outras palavras, essa metodologia será utilizada para comparar as duas amostras a fim de concluir se houve uma melhoria ou não, se a amostra final estiver menor do que a inicial, logo existe uma melhoria.

O teste t possui duas hipóteses a fim de definir se houve ou não uma melhor performance. Primeiramente, a hipótese nula representará se as duas amostras tem o mesmo valor e que a diferença das médias pode ter sido ocasionada pelo acaso. Em seguida a hipótese 1, ou hipótese alternativa visa analisar se o ensaio inicial tem média maior do que os testes corrigidos. A hipótese nula será considerada se o valor de P-valor for igual ou superior a 0.05, onde representa um intervalo de confiança maior ou igual a 95 %. Por outro lado, para valores inferiores a 0.05, a hipótese 1 é considerada correta.

As formulação das hipóteses baseia-se nas seguintes equações:

$$H_0 : média_{inicial} = média_{corrigida} \quad (3.2)$$

$$H_1 : média_{inicial} - média_{corrigida} > 0 \quad (3.3)$$

Por último, esse teste t tem algumas especificidades. Primeiramente é utilizada um teste unicaudal, ou seja, é analisado se o teste é maior ou menor do que um ponto de confiança. Por último, essa ferramenta utilizada é chamada pareada, onde procura encontrar semelhança entre duas amostras em dois instantes diferentes, com condições diferentes.

3.8 Utilização do teste Z

O teste Z nesse experimento visa comparar uma população com uma amostra. As populações nesse caso são os valores ideais de cada medida desejada enquanto que as amostras são os valores dos ensaios iniciais e dos testes corrigidos encontrados para cada bateria de experimento.

O teste Z se baseia em duas hipóteses. A primeira hipótese é chamada de hipótese nula e para esse caso ela considerará os valores entre população e amostra iguais. A segunda, é a hipótese 1 ou hipótese alternativa que será utilizada para representar valores entre população e amostra divergentes. Esse modelo utiliza o teste bicaudal.

A formulação das hipóteses para o teste Z pode ser representado da seguinte forma para o ensaio inicial:

$$H_0 : \textit{ensaio}_{inicial} = \textit{ensaio}_{ideal} \quad (3.4)$$

$$H_1 : \textit{ensaio}_{inicial} \neq \textit{ensaio}_{ideal} \quad (3.5)$$

A formulação das hipóteses para o teste Z pode ser representado da seguinte forma para o ensaio corrigido:

$$H_0 : \textit{ensaio}_{corrigido} = \textit{ensaio}_{ideal} \quad (3.6)$$

$$H_1 : \textit{ensaio}_{corrigido} \neq \textit{ensaio}_{ideal} \quad (3.7)$$

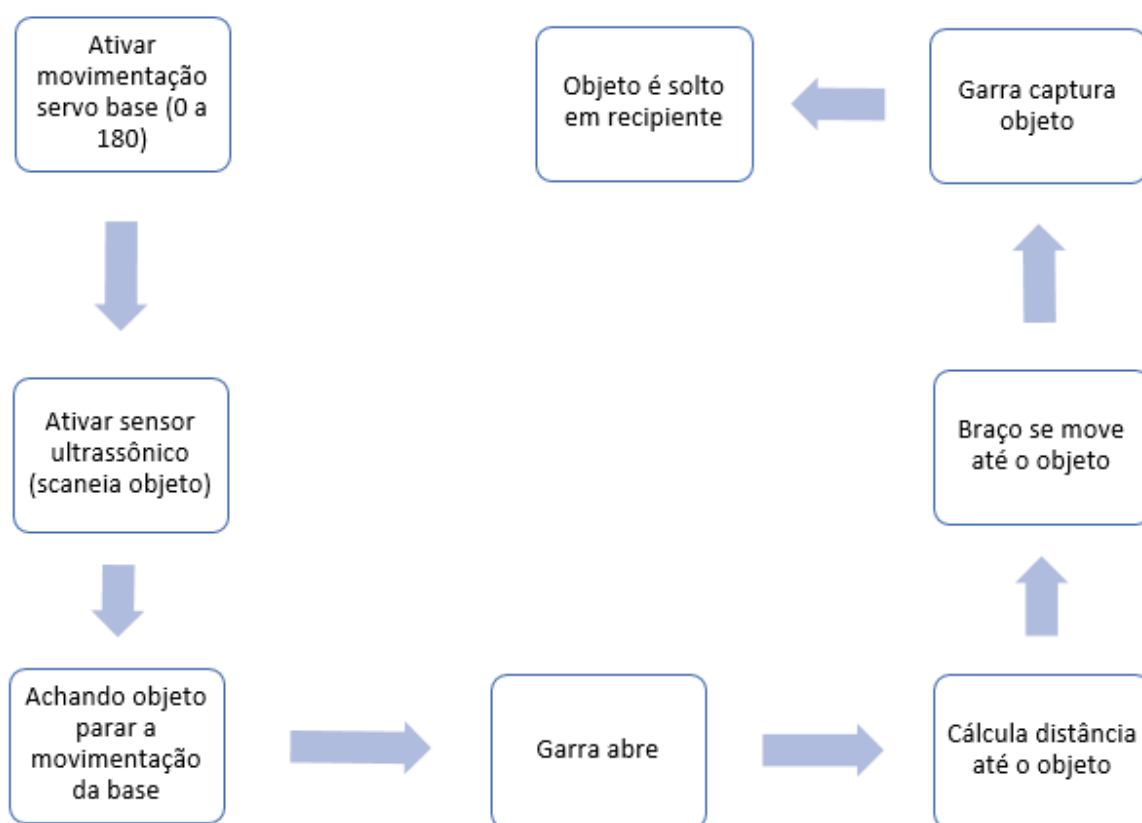
Os testes foram desenvolvidos comparando separadamente os valores ideais com os ensaios iniciais e os corrigidos. Para valores de Z encontrados acima de 0.05 será determinado que os testes não diferem do valor ideal, ou seja, a população e a amostra representa o mesmo valor (hipótese nula H_0). Por outro lado, se esse valor de Z for menor do que 0.05 isso representa que os valores encontrados estão fora do intervalo de confiança de 95 %, logo os valores encontrados são diferente dos desejados (hipótese alternativa H_1).

3.9 Funcionamento da estrutura

O braço robótico baseia o seu funcionamento em uma estrutura lógica de ações. A Figura 26, representa como é feita a movimentação do braço robótico até que o objeto seja capturado e solto em um recipiente.

Como visto, a base trava logo ao encontrar o objeto. Com isso pode ser feita uma análise sobre a base. Um estudo sobre a base é importante, porém não é necessária uma correção de erro. Torna-se desnecessária uma análise já que nenhum comando é dado diretamente a angulação do servo motor da base na estrutura. Essa parte do dispositivo responde diretamente ao sensor ultrassônico que identifica um objeto e faz a base parar.

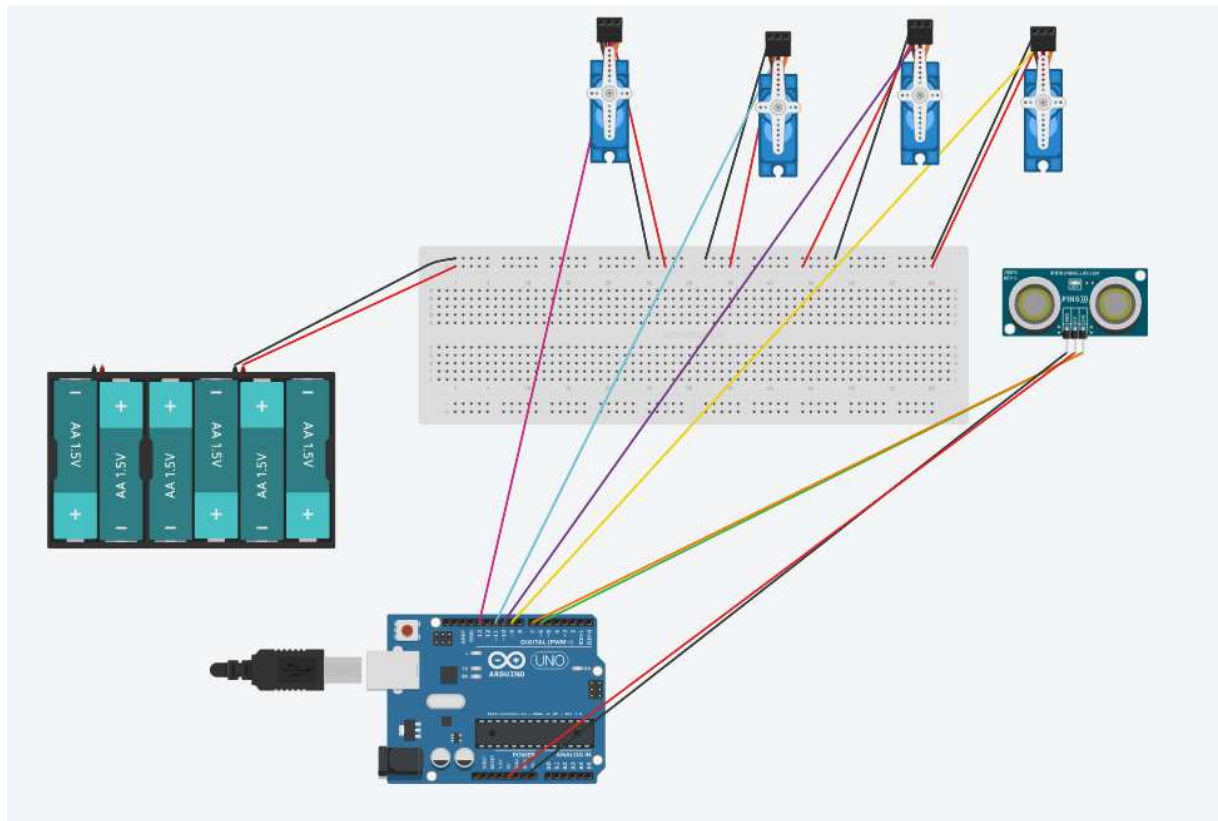
Figura 26 – Ordem lógica do funcionamento da estrutura



Fonte – Autor

Esta ordem lógica representada na Figura 26, é de fundamental importância para a funcionalidade do sistema. Através dessa estrutura não é necessário que todos os servos e sensores trabalhem ao mesmo tempo, facilitando assim o processamento de dados.

Figura 27 – Montagem eletrônica do sistema

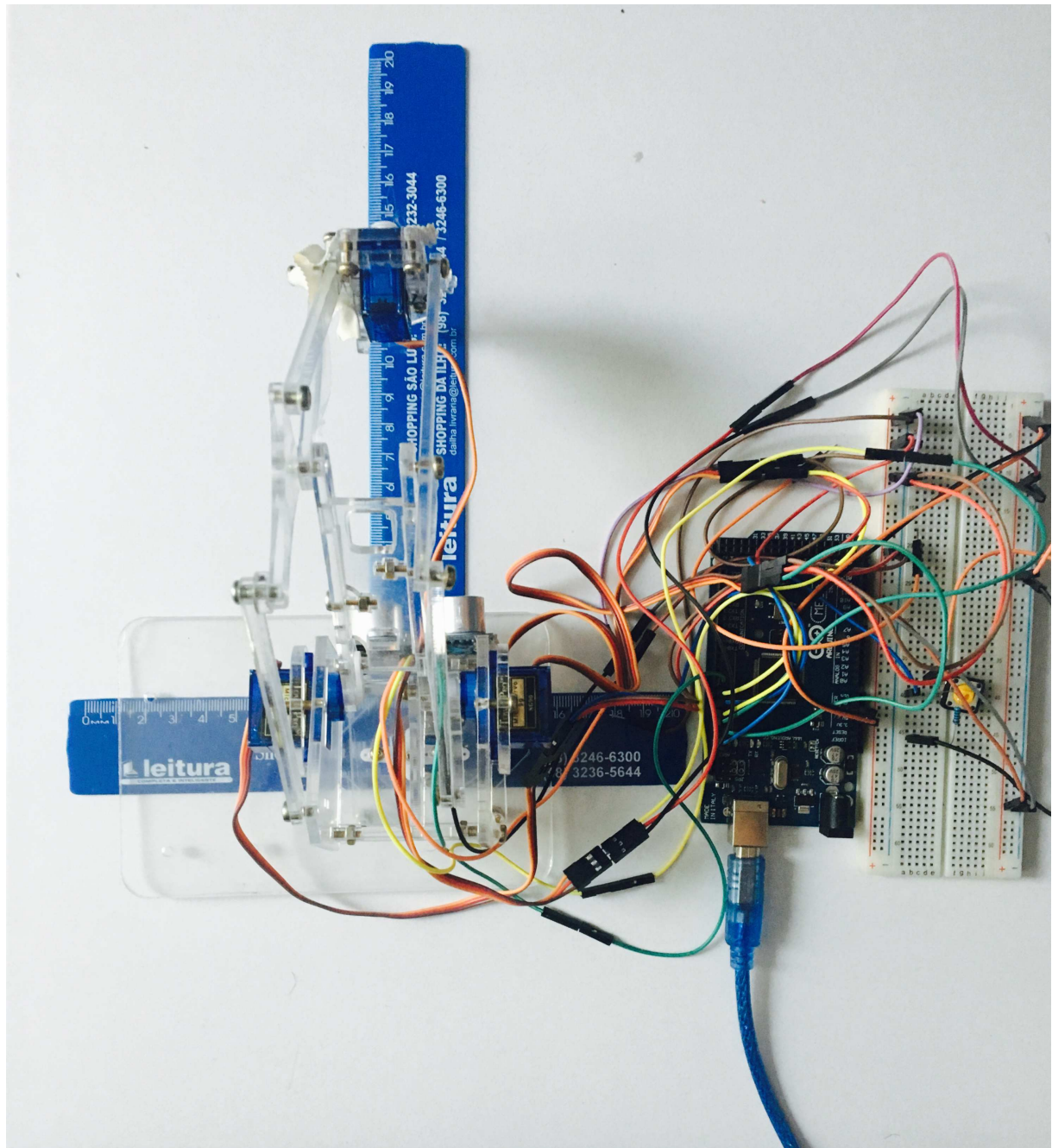


Fonte – Autor

Para o funcionamento completo da estrutura foram utilizados uma série de dispositivos eletrônicos. Esses equipamentos são: 6 pilhas AA de 1.5V para alimentação, 4 servo motores conforme especificados anteriormente, 1 sensor ultrassônico e 1 Arduino. Esses itens são demonstrados na Figura 27.

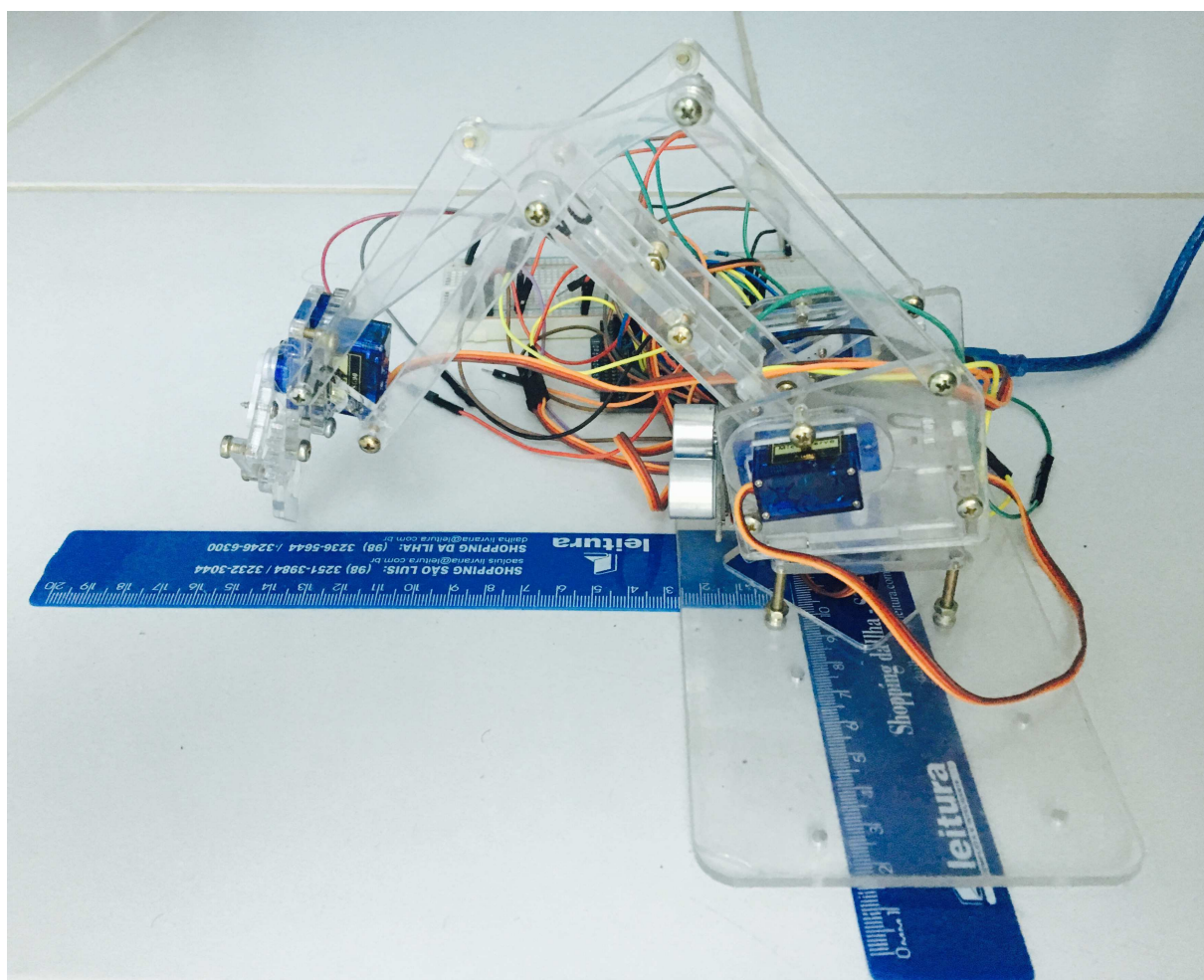
Uma serie de ligações são necessárias para o funcionamento correto do braço robótico. Assim, o servo da garra, do braço (lado direito e esquerdo) e da base são ligados especificamente nos pinos 10, 11, 8, 9. Além disso, para a ligação geral do sistema o sensor ultrassônico é ligado nos pinos 6 e 7.

As imagens 28 e 29 , representam a montagem do equipamento incluindo sensores e atuadores.

Figura 28 – Foto superior do braço *meArm*

Fonte – Autor

Figura 29 – Foto Lateral do braço meArm



Fonte – Autor

4 Resultados

Nesse capítulo são demonstrados os resultados encontrados de acordo com a metodologia proposta nesse trabalho. O principal objetivo é analisar os erros encontrados nas principais junções desse braço robótico que são : sensor ultrassônico, a base e o braço. É feita uma comparação entre os valores sem correção (testes iniciais) e os valores corrigidos afim de analisar se houve uma mudança e se ela teve um impacto positivo ou negativo no sistema.

4.1 Resultados: Sensor ultrassônico

O estudo do sensor ultrassônico baseou-se em um parâmetro ideal com o intuito de mensurar o erro encontrado e assim corrigi-lo. Tendo como base a Tabela 6, podemos analisar os valores encontrados para a bateria de 10 testes.

4.1.1 Resultados: Erro do Sensor ultrassônico

Uma análise que pode ser feita nessa primeira fase de testes é que os mesmos aparentam não ter uma repetibilidade. Os valores demonstram falta de controle pois não há uma constância nos ensaios. Isso pode ocorrer tanto devido a fatores externos quanto a uma falta de calibração apropriada do sensor ultrassônico. A falta de repetibilidade desse dispositivo pode ser analisada tendo como base a Tabela 6.

Através dos resultados encontrados na Tabela 6, pode ser analisado um erro médio para cada um dos valores ensaiados no intervalo entre 40 mm a 150 mm. Esses valores médios estão representados na Tabela 7. Pode-se concluir que, o valor que mais distorce do valor esperado é no ponto de 80 mm com um erro de aproximadamente 11,93 %. Além disso, o que menos distorce é o de 150 mm com um erro aproximado de 0,51 %. Logo, pode-se perceber que há uma variação desproporcional nos resultados.

As cores verde e amarelo representam valores de melhoria nas tabelas quando se compara os valores corrigidos com os ensaios iniciais. O valor verde representa melhorias significativas enquanto o valor amarelo representa uma melhoria razoável.

Com o intuito de analisar o desvio padrão em todos os parâmetros, pode-se analisar a

Tabela 6 – Tabela de resultado do ensaio inicial do sensor ultrassônico

Valor esperado (mm)	Valor encontrado em cada teste (mm)
40	43.62 - 42.58 - 43.6 - 42.07 - 43.09 - 42.75 - 40.54 - 40.54 - 41.05 - 41.22
50	56.69 - 52.44 - 51.93 - 55.5 - 55.5 - 57.03 - 50.4 - 54.99 - 49.21 - 54.48
60	61.79 - 66.38 - 65.87 - 60.77 - 61.79 - 64.85 - 67.4 - 63.83 - 67.91 - 65.36
70	73.69 - 74.2 - 79.47 - 74.71 - 74.2 - 78.28 - 76.7 - 80.83 - 76.75 - 77.77
80	89.16 - 92.22 - 96.81 - 88.14 - 92.22 - 92.22 - 89.16 - 86.61 - 90.69 - 91.2
90	94.26 - 99.02 - 97.49 - 93.24 - 107.86 - 102.08 - 95.96 - 95.79 - 91.71 - 100.55
100	108.37 - 112.96 - 108.2 - 107.69 - 111.94 - 116.02 - 106.67 - 109.9 - 105.65 - 109.15
110	113.98 - 117.55 - 117.04 - 118.06 - 113.47 - 118.57 - 112.45 - 111.94 - 111.94 - 116.02
120	127.43 - 126.9 - 127.41 - 126.9 - 126.9 - 127.41 - 120.27 - 120.61 - 121.12 - 122.14
130	132 - 136.76 - 132.51 - 132.68 - 132.68 - 133.7 - 130.47 - 130.47 - 134.55 - 130.98
140	141.86 - 143.56 - 141.86 - 143.05 - 142.54 - 143.39 - 140.33 - 139.82 - 140.67 - 140.16
150	152.23 - 157.33 - 149.17 - 148.15 - 152.74 - 151.72 - 144.92 - 152.5 - 149.51 - 149.51

Tabela 7 – Tabela dos valores de erro médio do sensor ultrassônico (fase inicial)

Valor esperado (mm)	Erro médio (mm)	Erro médio (%)
40	2.11	5.01 %
50	3.22	7.09 %
60	4.60	7.11 %
70	6.66	8.68 %
80	10.84	11.93 %
90	7.80	7.97 %
100	9.65	8.80 %
110	5.10	4.43 %
120	4.70	3.77 %
130	2.68	2.01 %
140	1.72	1.21 %
150	0.78	0.51 %
Erro médio total		5.71 %

Tabela 8. Essa Tabela, demonstra o desvio e a variância de acordo com cada ponto. Através dela, pode-se notar que os pontos de 90 mm e de 150 mm possuem os maiores índices

de desvio padrão enquanto que as medidas de 40 mm e 140 mm possuem os menores. Utilizando as informações das Tabelas 7 e 8, nota-se que os valores de 80 mm, 90 mm e 100 mm podem apresentar um erro aproximadamente de 10 mm tornando assim a precisão do sensor ultrassônico insuficiente para o projeto.

Tabela 8 – Tabela dos valores de desvio padrão do sensor ultrassônico na fase inicial tendo como base o erro absoluto

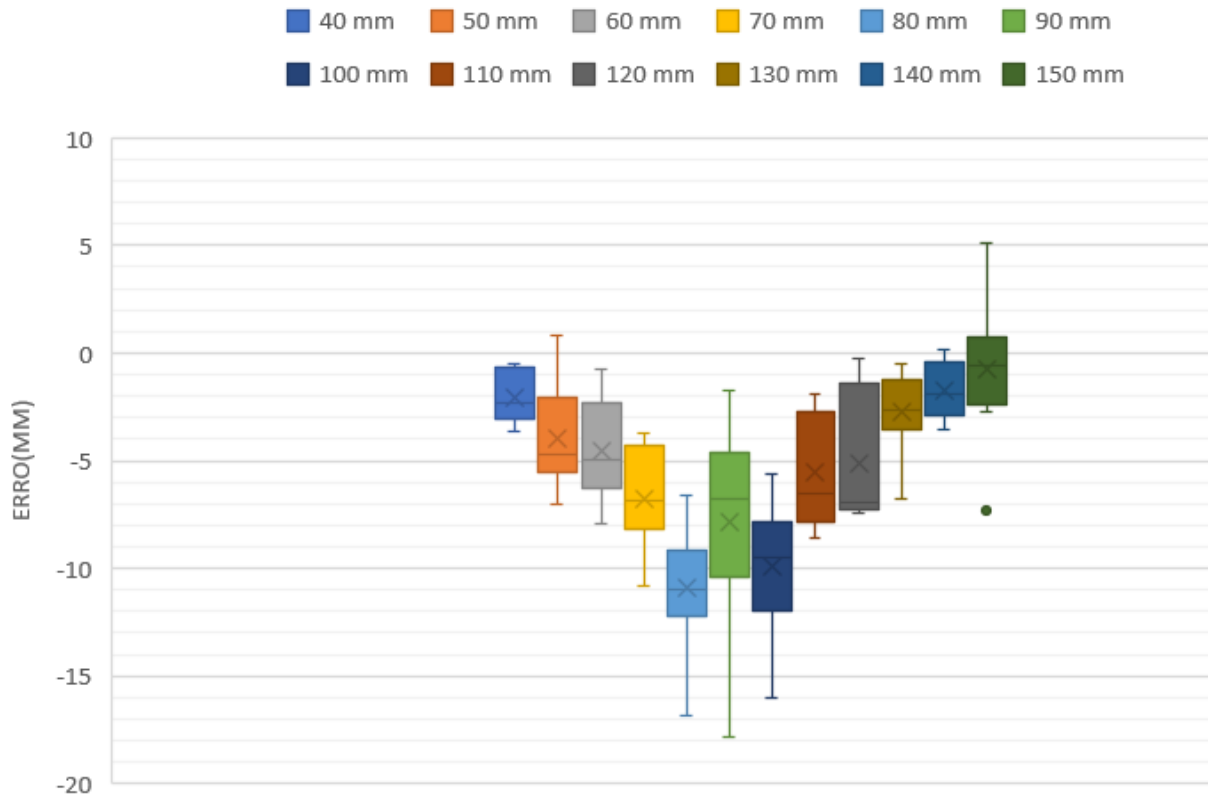
Valor referência (mm)	Variância	Desvio padrão
40	1.43	1.20
50	7.11	2.66
60	6.14	2.48
70	5.98	2.44
80	8.03	2.83
90	22.94	4.79
100	9.95	3.15
110	6.92	2.63
120	10.26	3.20
130	3.81	1.95
140	1.97	1.40
150	11.08	3.33

O sensor ultrassônico não deve ser utilizado sem um ajuste ideal. Esse dispositivo, nas fases iniciais dos testes, demonstrou-se impróprio para atender as necessidades exigidas nesse projeto. Da Tabela 7, é adquirido que no ponto de 80 mm há um erro médio de aproximadamente 11 mm enquanto em 150 mm possui uma diferença apenas de 0.78 mm. Portanto, os valores aparentam estar desordenados dificultando que a garra pudesse distinguir a distância até o objeto e tornando todo o mecanismo sem precisão.

A Figura 30, nos permite visualizar com maior precisão o erro obtido na primeira etapa de testes sem correção. Quanto maior os pontos superiores e inferiores, maiores são as distorções de valores encontrados dentro de cada faixa de medida. Nesse caso, analisa-se que nos testes de 80 mm, 90 mm e 100 mm, representados pela Tabela 6, foram os que apresentaram maior erro em distância tomando como parâmetro o modelo ideal. Por outro lado, as outras sete medias apresentaram valores mais consistentes entre 5 mm e -10 mm de erro tendo como base padrão ideal de 0 mm.

Com o intuito de corrigir esse erro, foi aplicada a cinemática inversa sobre os resultados do primeiro ensaio. Essa correção foi feita com base nos valores encontrados na Tabela 6. A aplicação dessa ferramenta torna-se importante devido ao sensor não possuir

Figura 30 – Gráfico Box Plot ensaio inicial do sensor ultrassônico



Fonte – Autor

uma sequência linear de erros. O intuito da aplicação desse sistema é tornar os valores do sensor ultrassônico mais previsíveis e mais próximos aos valores ideais. Assim, os erros podem ser controlados e o sistema pode agir de forma precisa.

Após a aplicação da cinemática inversa, foi gerado a Equação 4.1 de correção para a Equação 3.1 com o intuito de aplicar a correção sobre o sensor ultrassônico:

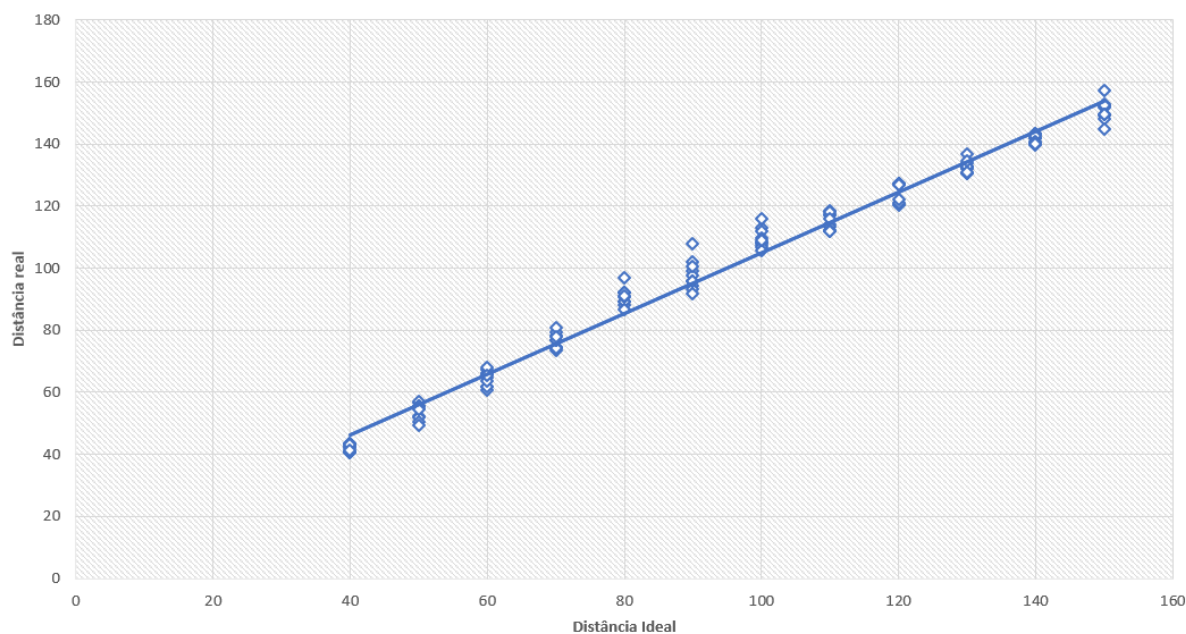
$$distancia_{corrigida} = \frac{distance - 7.43}{0.975} \quad (4.1)$$

Essa Equação é aplicada com o intuito de reconfigurar a forma como age o sensor e assim permitir uma melhor desempenho do mesmo. A regressão linear gerou coeficientes de 7.43 no eixo y e 0.975 no eixo x , sendo que o nosso eixo de interesse é o eixo y que representa a distância.

Ainda tendo em vista a aplicação linear sobre o ensaio inicial do sensor ultrassônico,

obtem-se o gráfico de correção, representado pela Figura 31, transformando os pontos encontrados na Tabela 6 em uma linha contínua.

Figura 31 – Gráfico de regressão linear para o sensor ultrassônico com distâncias dada em milímetros



Fonte – Autor

Na segunda bateria de resultados, após a correção, novos valores foram obtidos. Nessa etapa, 120 amostras foram analisadas como demonstrado na Tabela 9.

4.1.2 Resultados: ensaios pós correção do Sensor ultrassônico

O estudo do sensor ultrassônico baseou-se em um modelo ideal para que fosse possível analisar o erro e assim corrigi-lo. Tendo como base a Tabela 9, podemos analisar os valores encontrados para a bateria de 10 ensaios.

Os valores encontrados, mesmo após corrigidos, ainda apresentam erros, porém majoritariamente mais próximo do desejado. Analisando a Tabela 10, constata-se que a faixa de medida que mais se aproxima ao esperado é o de 140 mm com um erro médio de 0.023 % e a que mais diverge é a de 70 mm com erro de 10.33 % . Valores em azul e verde nas tabelas representam respectivamente pontos de melhoria razoável e melhoria significativa.

Tabela 9 – Tabela de resultado da correção do sensor ultrassônico

Valor esperado (mm)	Valor encontrado em cada teste (mm)
40	35.71 - 35.01 - 35.01 - 38.15 - 38.67 - 37.1 - 36.93 - 38.33 - 38.33 - 38.15
50	50.36 - 45.65 - 43.38 - 47.74 - 46.17 - 46.7 - 46.7 - 47.22 - 47.22 - 47.22
60	59.43 - 58.38 - 62.74 - 66.4 - 60.47 - 56.81 - 56.81 - 56.81 - 55.59 - 59.95
70	81.22 - 73.2 - 76.34 - 75.3 - 79.66 - 79.66 - 79.48 - 73.73 - 74.25 - 79.48
80	88.55 - 86.98 - 88.2 - 88.55 - 88.55 - 88.03 - 84.36 - 85.41 - 89.6 - 85.41
90	92.91 - 94 - 93.26 - 99.19 - 98.66 - 95 - 95 - 95.52 - 93.95 - 99.71
100	102.5 - 99.19 - 103.37 - 103.9 - 104.42 - 105.12 - 105.64 - 105.64 - 103.37 - 105.12
110	108.25 - 108.08 - 108.78 - 114.01 - 114.01 - 109.82 - 114.53 - 110.87 - 114.01 - 115.06
120	113.49 - 119.42 - 117.67 - 120.46 - 119.94 - 124.12 - 121.51 - 119.94 - 124.12 - 120.46
130	127.96 - 124.65 - 129.36 - 129.36 - 129.36 - 130.05 - 129.36 - 130.58 - 129.88 - 134.76
140	137.9 - 137.38 - 137.9 - 143.66 - 143.66 - 139.99 - 140.52 - 139.47 - 139.55 - 139.64
150	144.88 - 147.49 - 146.45 - 149.58 - 150.11 - 149.58 - 149.58 - 149.58 - 149.06 - 149.58

A Tabela 11, tem por intuito analisar a variância e o desvio padrão após a correção dos valores. Quando analisamos o desvio padrão, o valor máximo encontrado de distorção é de 3.29 mm nos testes de 60 mm enquanto que o menor valor é de 1.43 mm nos ensaios de 40 mm. Visando o erro médio da Tabela 10, pode-se perceber que apenas o valor de 110 mm pode chegar a um valor superior a 10 mm tanto em base a análise de um erro médio. Logo, quando comparado esses resultados com os valores dos experimentos iniciais,

Tabela 10 – Tabela dos valores de erro médio do sensor ultrassônico pós correção

Valor esperado (mm)	Erro médio (mm)	Erro médio (%)
40	-2.86	7.15 %
50	-3.16	6.33 %
60	-0.66	1.10 %
70	7.23	10.33 %
80	7.36	9.20 %
90	5.72	6.35 %
100	3.83	3.82 %
110	1.74	1.58 %
120	0.11	0.09 %
130	-0.47	0.36 %
140	0.04	0.023 %
150	-1.41	0.94 %
Erro médio total		3.67%

percebe-se que ocorreu uma redução de pontos que poderiam apresentar uma medição errônea superior a 10 mm.

Outra análise que pode-se notar é que o desvio padrão dos ensaios iniciais é menor do que os encontrados após a correção. Anteriormente o desvio era menor, porém os valores também eram mais afastados dos valores ideais. Por outro lado, os novos valores são mais próximos mesmo com um desvio padrão maior. Logo, percebe-se que apenas os valores absolutos de desvio padrão não podem ser utilizados como parâmetro para julgar uma melhoria sobre o sensor ultrassônico levando em consideração que a garra necessita atingir um ponto específico.

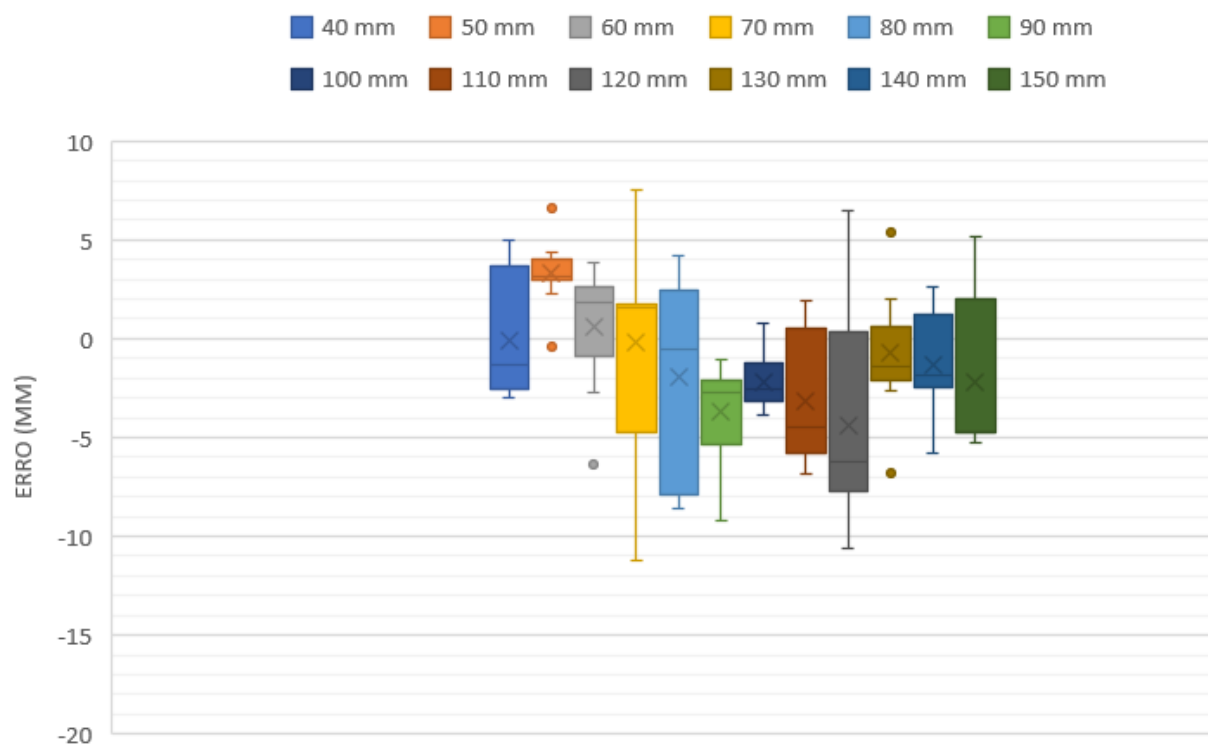
Tabela 11 – Tabela dos valores de desvio padrão do sensor ultrassônico pós correção

Valor referência (mm)	Variância	Desvio padrão
40	2.04	1.43
50	3.06	1.75
60	10.81	3.29
70	8.86	2.98
80	3.02	1.74
90	6.41	2.53
100	3.77	1.94
110	8.12	2.85
120	9.41	3.07
130	6.14	2.48
140	4.82	2.19
150	3.00	1.73

O gráfico *box plot* na Figura 32, demonstra a distorção encontrada no ensaio pós

correção quando comparado com as faixas de valores ideais. Analisando esse gráfico conclui-se que os testes encontram-se em uma margem de erro, dada em milímetros, entre 8 mm e -12 mm tendo como padrão ideal 0 mm.

Figura 32 – Gráfico Box Plot correção do sensor ultrassônico



Fonte – Autor

Ainda na Figura 32, algumas melhorias podem ser notadas. Os erros máximos encontrados estão entre as séries 70 mm, 80 mm e 120 mm porém a variância desse erro é bem menor quando comparada aos testes do erro anterior. Os valores máximos e mínimos encontrados são em torno de 15 % melhores após a aplicação da regressão linear.

Outro ponto a ser analisado é quanto a melhoria individual em cada posição. Entre as faixas de 40 mm até 150 mm, aproximadamente 67 % dessas faixas apresentou um valor mais próximo ao ponto ideal, após a correção, utilizando a regressão linear.

Além das melhorias citadas acima, um aprimoramento quanto a repetibilidade pode ser verificado. Os valores se apresentam bem mais próximos do ponto 0 e somente o ensaio de 50 mm não tocou o gráfico nesse ponto. Isso facilita a controlar o sistema pois os valores começam a se repetir, dando assim uma maior precisão para a garra alcançar o seu alvo.

4.1.3 Analisando o Teste t e Z para o sensor ultrassônico

Dois testes estatísticos são utilizados para analisar se os valores realmente diferem um dos outros ou se a diferença ocorreu apenas por uma ocasionalidade. Os teste utilizados nesse projeto foram os experimentos t e Z como demonstrados respectivamente nas Tabelas 12 e 13.

Primeiramente, o teste t foi aplicado para comparar duas amostras. As amostras comparadas nessa estatística foram as encontradas nos ensaios iniciais e na correção com o intuito de verificar se houve uma melhoria após a correção ou se elas possuem os mesmos valores.

De acordo com a Tabela 12, é possível analisar que, na grande maioria, os valores antes de serem corrigidos e após serem modificados divergem. Para essa analisar é preciso relembrar que o teste t utilizado foi o unicaudal, pareado e com um intervalo de confiança de 95%, assim todos os valores de t maiores do que esse valor deve ser enquadrado na hipótese nula (os valores são iguais) e todos os valores menores do que 95% se enquadram na hipótese 1 (a amostra final tem média de erro menor do que a inicial).

Percebe-se que, aproximadamente 25 % dos valores representam uma similaridade. Analisando a Tabela 12, nota-se que os valores de 70 mm, 90 mm e 150 mm são os únicos que atendem a hipótese nula, ou seja, são iguais. Logo, demonstram que após a correção 75 % dos valores obtiveram uma melhoria atendendo a hipótese alternativa. Valores em amarelo representam os pontos que não apresentaram melhoria de acordo com o teste t pois, os valores da média são iguais.

A Tabela 13, representa os resultados encontrados no teste Z. Esses teste visa comparar uma população com uma amostra. A população nesse caso seria a dos valores ideais enquanto a amostra seria dos valores no ensaio inicial e correção.

Primeiramente, pode-se analisar a similaridade entre os valores ideais e os valores antes da correção. De acordo com a Tabela 13, apenas um dos valores atinge o intervalo de confiança de 95 % que é o de 150 mm. Logo, pode-se afirmar que antes da correção somente 8.33 % dos valores (que seria um dos pontos) seria igual ao valor ideal e as outras medidas se afastam do ponto desejado.

Por outro lado, quando comparamos os valores de Z para a amostra de correção e

Tabela 12 – Tabela dos valores dos resultados de teste t para o sensor ultrassônico comparando ensaio inicial e correção

Valor referencia (mm)	P-valor comparando teste inicial e correção
40	4.10e-05
50	8.97e-05
60	0.0054
70	0.34
80	0.00179
90	0.08739
100	0.00055
110	0.02115
120	0.01095
130	0.01786
140	0.0305
150	0.0644

os valores de referência obteve-se aproximadamente 42 % de similaridade. Os valores de 60 mm, 110 mm, 120 mm, 130 mm e 140 mm demonstraram serem iguais aos valores desejados, ou seja cinco vezes maior do que o encontrado anteriormente na análise do erro. Assim, essa análise serve de parâmetro para reafirmar que os valores de correção e de erro são diferentes e que após os ajustes houve uma melhoria nos resultados encontrados a ponto que 42 % dos valores tornaram-se iguais aos de referência. Os valores em verde representam os pontos que se apresentaram igual ao valor de referência.

Tabela 13 – Tabela dos valores dos resultados de teste Z para o sensor ultrassônico comparando com os valores ideais

Valor referencia (mm)	P-valor para o ensaio inicial	P-valor para a correção
40	2.78e-08	2.45e-10
50	1.30e-04	1.05e-08
60	4.54e-09	0.52
70	7.45e-18	1.55e-14
80	1.12e-33	5.83e-41
90	2.65e-07	9.16e-13
100	3.70e-22	4.64e-10
110	8.72e-10	0.053
120	3.3e-06	0.90
130	1.43e-05	0.55
140	1.02e-04	0.96
150	0.46	0.01

Ainda na Tabela 13, pode-se comparar os valores de Z para o erro e para a correção. Através dessa análise percebe-se que aproximadamente 58 % das vezes os resultados

corrigidos obtiveram uma maior proximidade dos valores ideais do que os encontrados nos testes do erro.

4.2 Resultados: Base

A configuração da base visa eliminar distorções no giro da base. Com o intuito de analisar o correto funcionamento do motor da base e verificar se o mesmo não apresenta erro foram feitos os testes iniciais. Porém, nenhum tipo de comando angular é aplicado diretamente para a base desse braço. Logo, o intuito principal desse estudo é servir de parâmetro para aplicações futuras no equipamento.

4.2.1 Resultados: Erro da base

Os ensaios para o erro da base basearam-se em sete testes com 30 amostras em cada, totalizando 208 experimentos. Os resultados podem ser encontrados na Tabela 14 e 15 .

Tabela 14 – Tabela de resultado do testes da base parte 1

Valor esperado (mm)	Valor encontrado em cada teste (mm)
15	22.5 - 19 - 23 - 23 - 20 - 18 - 17
20	29 - 30 - 25.5 - 26 - 26 - 28 - 28
25	34 - 32 - 35 - 36 - 31 - 29 - 26
30	39.5 - 40 - 39 - 39 - 37 - 39 - 29
35	41 - 41 - 41.5 - 42 - 42 - 42 - 46
40	51 - 47 - 48 - 50 - 48 - 46 - 51
45	52 - 54 - 58.5 - 54.5 - 51 - 49 - 54
50	60.5 - 63 - 59 - 61 - 58 - 62 - 56
55	64.5 - 67.5 - 63 - 64 - 66 - 60 - 63
60	67 - 69 - 74 - 68 - 68 - 68 - 67
65	76.5 - 75 - 76 - 76 - 72.5 - 77 - 72
70	77 - 82 - 76 - 81 - 83 - 76 - 74
75	84.5 - 87 - 84 - 82 - 84 - 80 - 87
80	86 - 86 - 86.5 - 89.5 - 89 - 86 - 89
85	97 - 89.5 - 93 - 91 - 96 - 90 - 96

De acordo com os resultados encontrados, é possível notar que o braço apresenta uma maior repetibilidade do que o teste encontrado no sensor ultrassônico. Isso ocorre devido a sensibilidade do sensor ser bem maior do que a do servo motor da base.

Através do gráfico representado na Figura 33, é possível analisar a repetibilidade. Esses ensaios demonstraram uma repetibilidade satisfatória nos pontos de 60 mm , 65 mm, 80 mm mesmo com valores distorcidos dos ideais. Porém, os pontos de 25 mm e de 140 mm não possuem uma constância nos valores obtidos.

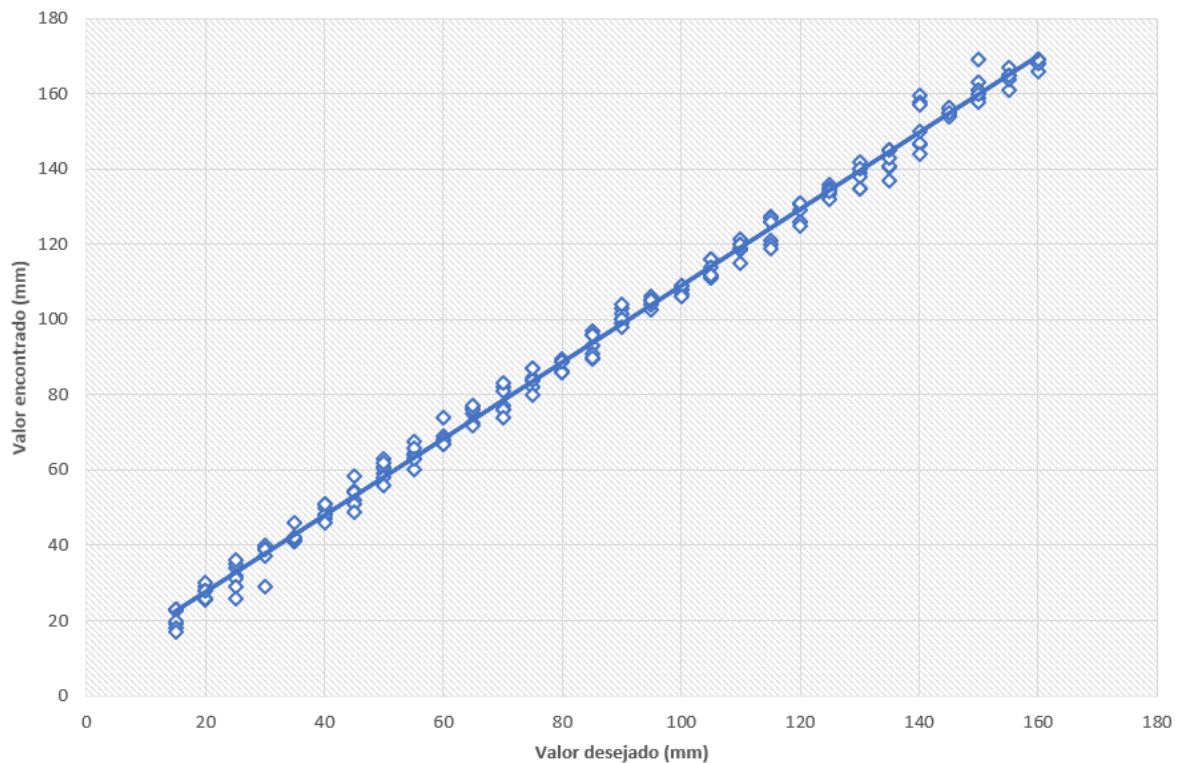
Outro ponto a ser verificado é que quando dois valores muito próximos são analisados o erro aumenta, por exemplo, ao testar 35 graus e em seguida 40 graus. Além disso, valores muito espaçados demonstraram possuir comportamento similar que intensifica o erro, como valores de 15 graus e 150 graus.

O peso da estrutura pode ser uma das razões que está influenciando no erro. Primeiramente o peso pode está travando o servo da base a ponto de quando valores de mudança muito pequenos são enviados para a estrutura, a estrutura praticamente não realiza o movimento rotacional. Por outro lado, quando valores muito espaçados são enviados ao motor e o mesmo atinge a sua trajetória final, o servomotor trava, porém o braço robótico força a base a ponto de ir além do limite desejado.

Tabela 15 – Tabela de resultado do testes da base parte 2

Valor esperado (mm)	Valor encontrado em cada teste (mm)
90	103 - 101.5 - 100 - 99 - 100 - 98 - 104
95	106 - 102.5 - 104 - 104 - 105 - 105 - 105
100	108 - 109 - 109 - 108 - 107 - 109 - 106
105	111 - 116 - 116 - 112 - 111 - 114 - 112
110	118.5 - 119 - 121.5 - 119 - 120 - 120 - 115
115	127.5 - 126 - 127 - 121 - 126 - 120 - 119
120	126 - 131 - 129 - 130.5 - 131 - 126 - 125
125	133.5 - 135 - 136 - 132 - 135 - 135 - 134
130	139 - 140 - 138 - 135 - 142 - 135 - 140
135	140.5 - 141 - 145 - 145 - 143 - 145 - 137
140	146.5 - 159.5 - 158 - 147 - 150 - 144 - 157
145	154.8 - 156 - 155 - 154 - 156 - 156.5 - 155
150	159 - 163 - 161 - 169 - 161 - 158 - 160
155	165 - 165 - 161 - 167 - 165 - 164 - 165
160	168 - 168 - 166 - 169 - 169 - 168 - 169

Figura 33 – Gráfico de regressão linear da base



Fonte – Autor

4.3 Resultados: Braço

Essa seção descreve os resultados encontrados sobre a junta do braço robótico responsável por locomover a garra até o objeto. Os testes foram analisados primeiramente sem nenhum tipo de correção, logo a cinemática inversa aplicada era considerada como a ideal. Em seguida foi corrigido o erro com o intuito de movimentar o mecanismo a fim de que o mesmo atingisse o ponto específico que seria a localização do objeto. Essa bateria de ensaios torna-se fundamental para o ensaio devido ser a responsável pela locomoção da garra até o ponto desejado.

4.3.1 Resultados: Ensaio inicial do Braço

Esse mecanismo permite um movimento linear da garra. Essa movimentação aproxima a garra do objeto, porém a altura entre garra e o solo não foi levada em consideração. Quanto mais próximo da base estiver o ponto final do braço, maior será a diferença de

altura. Logo, o erro a ser analisado nesse ponto não leva em consideração a distância a garra e o solo, mas sim, entre a base e o objeto.

Nos experimentos iniciais do braço robótico, dividiu-se o teste em dez baterias. A quantidade amostral foi de 90, sendo que cada valor esperado foi testado unitariamente 10 vezes. Os números foram testados com aleatoriedade de acordo com a Tabela 5. Os valores encontrados estão representados na Tabela 16.

Tabela 16 – Tabela de resultado do ensaio inicial do braço

Valor esperado (mm)	Valor encontrado em cada teste (mm)
60	47 - 45 - 48 - 48 - 50 - 49 - 47 - 47 - 46 - 47
70	62 - 55 - 60 - 56 - 59 - 61 - 57 - 52 - 53 - 58
80	66 - 70 - 69 - 69 - 67 - 65 - 68 - 64 - 62 - 64
90	80 - 85 - 79 - 79 - 80 - 80.5 - 84 - 87 - 74 - 82
100	101 - 95 - 100 - 98 - 101.5 - 101 - 99 - 95 - 99 - 98
110	115 - 120 - 125 - 127 - 122 - 123 - 123 - 117 - 118 - 122
120	140 - 144 - 135 - 137 - 138 - 139 - 138 - 133 - 132 - 134
130	160 - 157 - 160 - 156 - 158 - 158 - 159 - 150 - 158.5 - 150
140	160 - 157 - 160 - 156 - 158 - 158 - 159 - 150 - 158.5 - 150

Ao analisarmos o erro do braço, pode-se perceber que o mesmo não possui uma constância de resultados. Primeiramente, observa-se que os resultados demonstram uma variação grande quanto aos valores ideais nos pontos de 60 mm e de 140 mm atingindo respectivamente os valores de 26.58 % e 22.26% , ou seja, no ponto mínimo e máximo onde a garra deveria alcançar há a maior falha.

Por outro lado, em pontos médios como os de 90 mm e 110 mm esse erro é reduzido aproximadamente pela metade representando valores de 11.04 % e 9.24 % para os valores citados. Por último, percebe-se que exatamente no ponto médio de 100 mm esse erro é de apenas 1.26 %. Logo, nota-se que não existe um padrão onde esse braço possa ser simplesmente modificado a fim de funcionar adequadamente sem uma análise mais aprofundada. A Tabela 17, demonstra a comparação entre o valor esperado e o encontrado nos ensaios iniciais.

Através da Tabela 18, analisa-se a variância e o desvio padrão. Percebe-se que os valores de desvio padrão variam entre 1.43 mm e 3.71 mm, ou seja, alguns pontos possuem uma variação superior a 3 mm impactando diretamente na precisão do sistema. Ainda sobre o desvio padrão, deve-se analisar que os pontos estão distantes dos valores ideais, então esse erro aumenta para uma diferença que se torna em alguns pontos maior do que

Tabela 17 – Tabela dos valores de erro médio do braço na fase inicial

Valor esperado (mm)	Erro médio (mm)	Erro médio (%)
60	-12.6	26.58 %
70	-12.7	22.16 %
80	-13.6	20.48 %
90	-8.95	11.04 %
100	-1.25	1.26 %
110	11.2	9.24 %
120	17	12.41 %
130	26.85	17.01 %
140	40.1	22.26%
Erro médio total		16 %

10 mm de distância como nos pontos de 60 mm, 70mm, 80 mm, 110 mm 120 mm, 130 mm e 140 mm. Assim, percebe-se que 77 % dos valores apresentam uma distorção considerável acima de 10 mm.

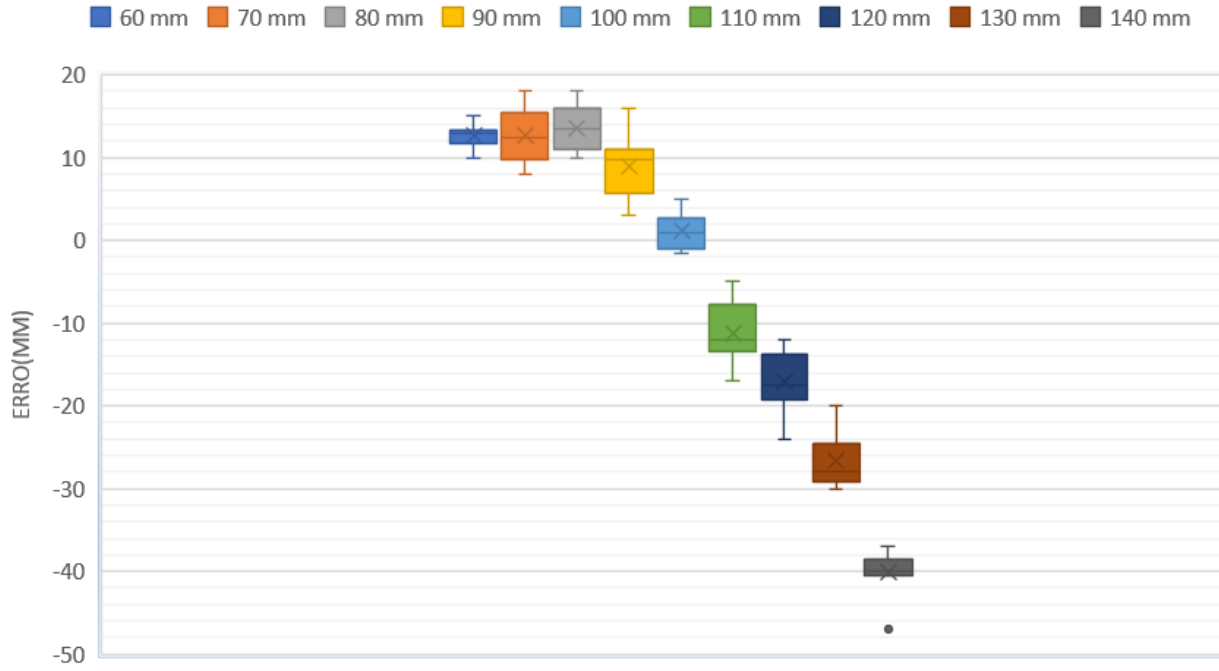
Tabela 18 – Tabela dos valores de desvio padrão do braço no ensaio inicial

Valor referência (mm)	Variância	Desvio padrão
60	2.04	1.43
70	11.12	3.33
80	6.93	2.63
90	13.47	3.67
100	5.40	2.32
110	13.73	3.71
120	13.11	3.62
130	14.33	3.78
140	7.60	2.76

De acordo com a Figura 34, pode-se analisar a amplitude gerada pelo erro em função dos valores ideais. Os resultados apresentam um aumento de erro nos primeiros ensaios entre 60 mm até 90 mm, em seguida apresenta-se próximo ao valor ideal em 100 mm e volta a se distanciar desse valor gradativamente entre os valores de 110 mm a 140 mm.

Com a finalidade de diminuir os erros, foi executada uma regressão linear como demonstrado na Figura 35. Através desse gráfico, pode-se notar que há uma repetibilidade de valores, porém distante do desejado. Sendo assim, uma melhoria é necessária para que o braço venha atender as necessidades desejadas.

Figura 34 – Gráfico Box Plot para o ensaio inicial do braço



Fonte – Autor

4.3.2 Resultados: Correção do Braço

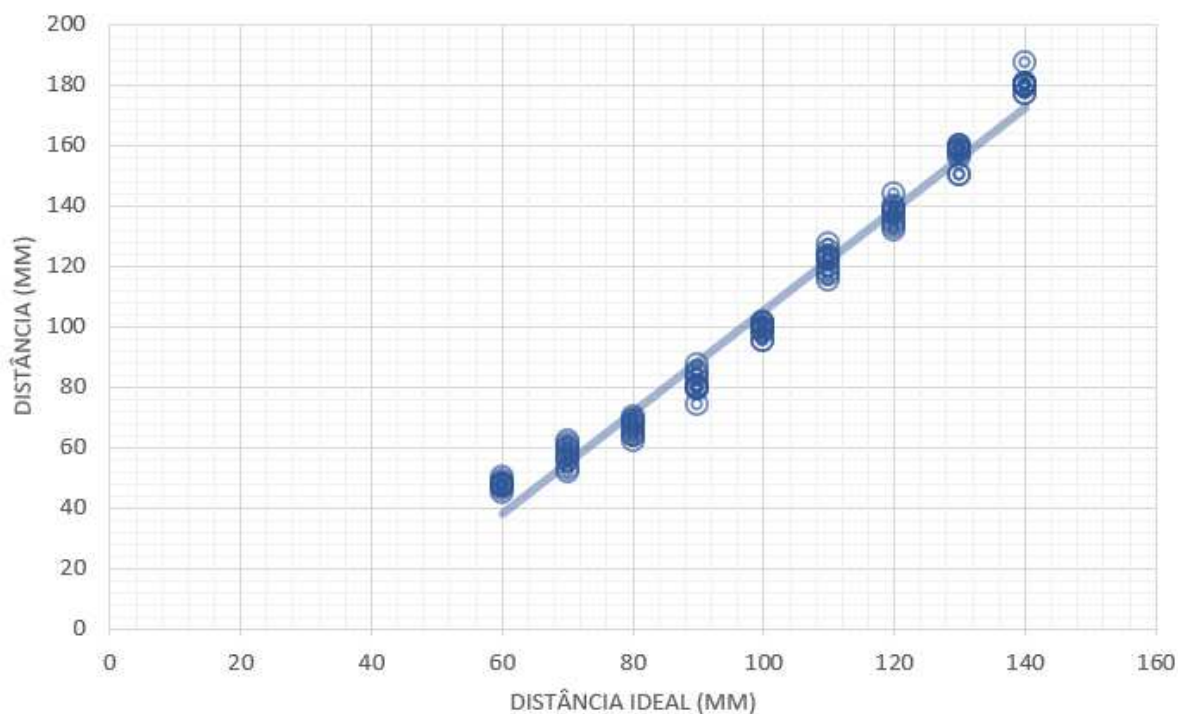
Para a correção do braço, os valores utilizados precisam ser ajustados. Em outras palavras, a cinemática inversa tem que ser modelada de acordo com os valores encontrados através da regressão linear.

Com a finalidade de diminuir os erros, foi aplicada a regressão linear como demonstrado na Figura 35. Através desse gráfico, pode-se notar que há uma repetibilidade de valores, porém distante do desejado. Sendo assim, uma melhoria é necessária para que o braço venha atender as necessidades desejadas.

Uma nova equação é gerada com base nos erros encontrados. A Equação 4.2, representa o ajuste feito a fim de aprimorar os resultados encontrados na fase de testes iniciais e aproximar os mesmos aos valores ideais.

$$\theta_{(corrigido)} = \frac{\theta + 63.27}{1.68} \quad (4.2)$$

Figura 35 – Gráfico de regressão linear para os ensaios iniciais do braço com distâncias dada em milímetros



Fonte – Autor

Com base na Equação 4.2, novos ensaios foram realizados. Esses experimentos apresentaram valores mais precisos do que nos ensaios anteriores. Uma nova bateria de experimentos foi executada e o resultado encontrado está demonstrado na Tabela 19.

Tendo em vista os dados da Tabela 16 e 19, algumas análises podem ser feitas. Primeiramente, é possível identificar que os valores da correção em todos os pontos apresentaram melhores resultados do que os valores anteriores. Os resultados esperados de 60 mm, 130 mm e 140 mm são os que expressam uma melhoria considerável, pois as suas variações atingiram um máximo de 70 mm, 135 mm e 150 mm respectivamente enquanto em experimentos anteriores foram 45 mm, 144 mm e 187 mm.

Analisando a repetibilidade, é possível constatar valores mais constantes. Nos testes com os valores de 70 mm, 90 mm, 100 mm é contabilizado uma repetição dos mesmos valores de 50 %, 30 % e 50 % respectivamente. Por outro lado, nos experimentos iniciais obteve-se uma constância de 0 %, 20 % e 20 %. Além disso, também existiram valores que permaneceram com a mesma quantidade de repetições tal como 60 mm, porém vale

ressaltar que a amplitude de erro era maior.

Tabela 19 – Tabela de resultado da correção do braço

Valor esperado (mm)	Valor encontrado em cada teste (mm)
60	64 - 65 - 68 - 64 - 70 - 62 - 64 - 64 - 63 - 65
70	70 - 82 - 73 - 71 - 73 - 73 - 73 - 71 - 73 - 77
80	88 - 78 - 80 - 77 - 80 - 80 - 76 - 77 - 77 - 78
90	98 - 88 - 91 - 88 - 93 - 96 - 88 - 90 - 97 - 92
100	100 - 103 - 95 - 102 - 100 - 103 - 98 - 100 - 100 - 100
110	109 - 112 - 113 - 113 - 112 - 110 - 112 - 110 - 110 - 108
120	122 - 120 - 120 - 121 - 122 - 123 - 121 - 123 - 120 - 123
130	134 135 134 131 133 135 133 132 133 133
140	145 150 142 147 148 148 148 145 148 146

A Tabela 20 representa os valores dos erros médios quando comparado com os valores ideais. Através do erro médio, comparando as Tabelas 17 e 20, pode-se perceber que todos os valores de erro médio apresentaram uma porcentagem de erro inferior. Os valores que mais se destacam são os de 60 mm, 70 mm, 80 mm e 140 mm. Assim, demonstra-se que a correção expressou um resultado mais satisfatório do que anteriormente demonstrando a importância dessas correções sobre essa junta do braço robótico.

Ainda na Tabela 20, quando comparamos os valores das correções com os testes temos uma precisão em milímetros maior. Os valores de 60 mm, 70 mm, 80 mm e 140 mm apresentaram para a correção uma distorção média de apenas 4.9 mm 3.6 mm, -0.9 mm e 6.7 mm enquanto os experimentos iniciais obtiveram uma diferença de 12.6 mm, 12.7mm, 13.6 mm e 40.1 mm.

Tabela 20 – Tabela dos valores de erro médio após correção do braço

Valor esperado (mm)	Erro médio (mm)	Erro médio (%)
60	4.9	7.55 %
70	3.6	4.89 %
80	-0.9	1.13%
90	2.1	2.28%
100	0.1	0.09 %
110	0.9	0.81 %
120	1.5	1.23%
130	3.3	2.47%
140	6.7	4.56%
Erro médio total		2.8 %

A Tabela 21, demonstra a variância e o desvio padrão. Os pontos de 120 mm e 130mm são os que apresentam menor desvio padrão enquanto que os pontos de 70 mm e

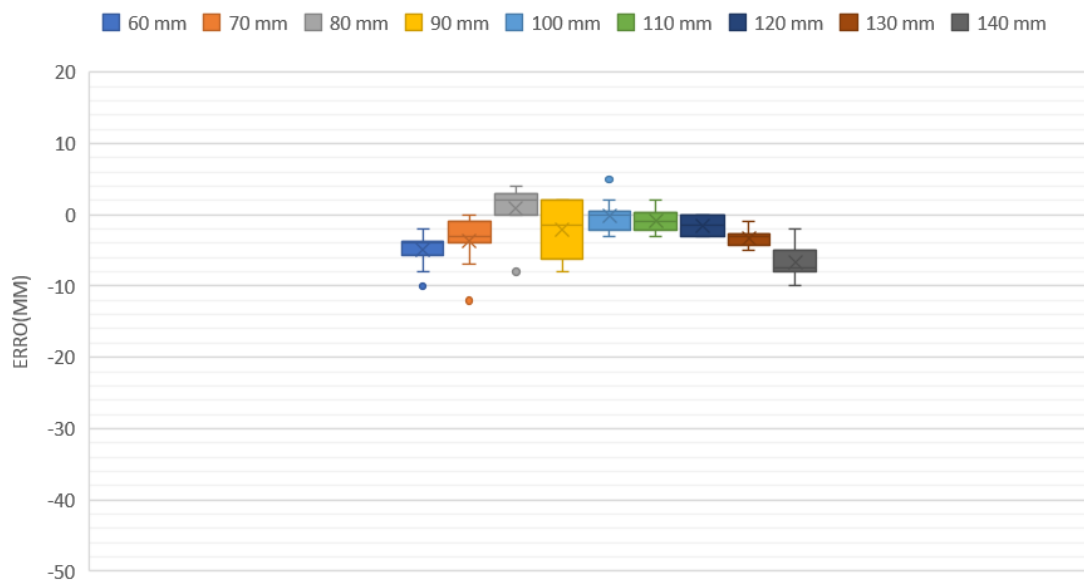
90 mm apresentam os maiores níveis. Tendo em vista o erro médio, percebe-se que nenhum dos pontos possui um erro maior do que 10 mm. Logo, há uma redução entre o erro e a correção para valores que atingem mais de 10 mm de 77 % para aproximadamente 0 % .

Tabela 21 – Tabela dos valores de desvio padrão do braço pós correção

Valor referência (mm)	Variância	Desvio padrão
60	5.65	2.38
70	12.26	3.50
80	11.87	3.44
90	14.54	3.81
100	5.65	2.37
110	2.98	1.72
120	1.61	1.26
130	1.56	1.25
140	5.12	2.26

A Figura 36, representa as amplitudes encontradas após os testes de correção. Pode-se perceber, através desse gráfico, que o valor da série 90 mm é o que apresenta maior amplitude enquanto os outros e aparentam estar mais controlados e próximos aos pontos desejados.

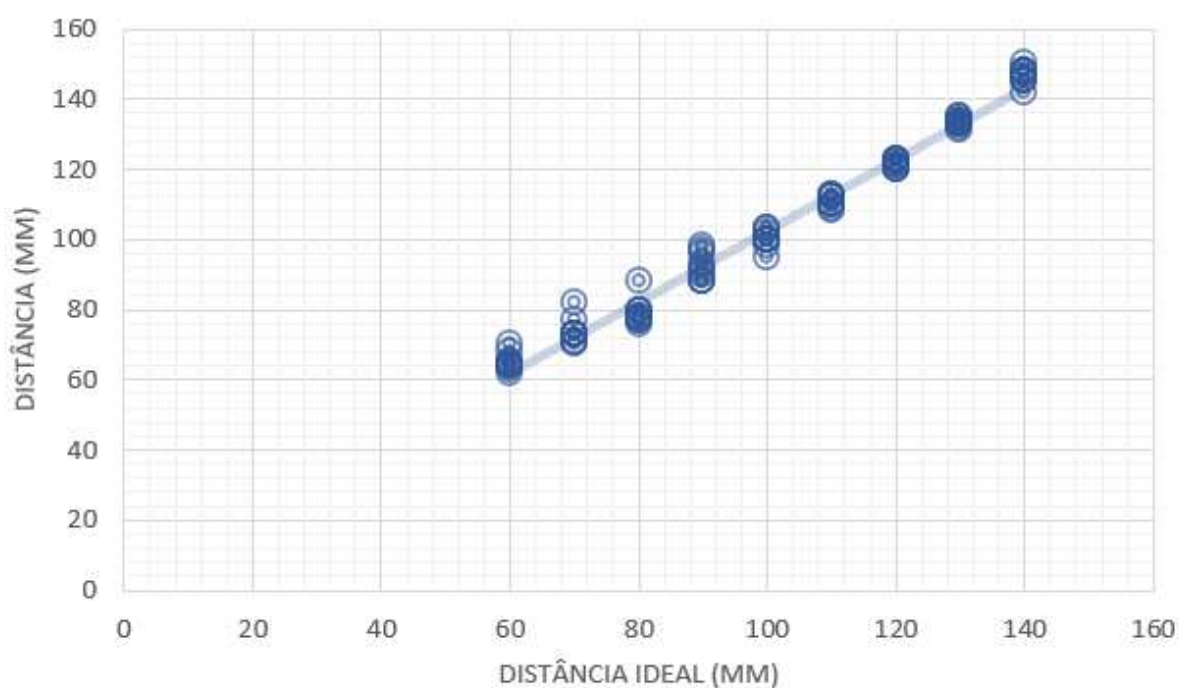
Figura 36 – Gráfico Box Plot correção do braço



Fonte – Autor

Comparando as Figuras 34 e 36, pode-se verificar algumas melhorias. O primeiro ponto é quanto a amplitude máxima e mínima. No gráfico *Box Plot* dos experimentos iniciais temos o maior ponto em 18 mm e o menor de 41 mm, enquanto após a correção obteve-se máxima de 4 mm e mínima de 10 mm. Além disso, todos os pontos, após aplicada a regressão linear, obtiveram valores correspondentes aos desejado enquanto nos testes iniciais 30 % dos valores não alcançaram esse valor.

Figura 37 – Gráfico de regressão linear para a correção do braço com distâncias dada em milímetros



Fonte – Autor

A Figura 37 representa o gráfico da regressão após a regressão. Com base nesse gráfico, podemos reafirmar que os valores apresentam-se mais constantes sobre a linha de regressão. Esse fator demonstra a necessidade de utilizar a regressão linear a fim de corrigir e aprimorar falhas encontradas nesse mecanismo.

4.3.3 Analisando o Teste t e Z para o braço

Essa seção tem como objetivo analisar os testes encontrados no teste t e Z para o braço. O teste t irá comparar os valores do ensaio inicial e correção para todas as amostras

obtidas. A probabilidade encontrada no teste Z representa a comparação entre o valor ideal e dos valores nos experimentos iniciais e ensaios após o ajuste.

O teste t tem como o objetivo, no experimento do braço, comparar as médias dos experimentos iniciais e os testes pós ajuste. Esse experimento está representado através da Tabela 22. A primeira análise que pode ser inferida dessa tabela é que as médias encontrados para essas duas amostras são majoritariamente diferentes. Além disso, a média nos testes iniciais é maior do que as médias pós correção. Apenas o valor de 100 mm demonstra uma medida acima do intervalo de confiança de 95% sendo enquadrado assim na hipótese nula (os valores das amostras são iguais). Logo, infere-se que os valores encontrados após a correção apresentam, em sua maioria, médias menores do que as médias nos ensaios iniciais.

Tabela 22 – Tabela dos valores dos resultados de teste t para o braço comparando fase inicial e correção

Valor referencia (mm)	P-valor para comparação entre fase inicial e correção
60	5.34e-10
70	2.08e-06
80	3.28e-06
90	0.00026
100	0.14079
110	7.70e-06
120	3.26e-07
130	1.72e-09
140	8.29e-11

Analisando o teste Z, obtém-se que apenas apenas 11 % dos valores se assemelham ao valor ideal. Na Tabela 23, inferi-se que apenas o teste de 100 mm demonstrou que a população e a amostra desse intervalo são iguais enquanto todos os outros valores se distanciam de forma significante demonstrando pouco ou nenhuma relação com a medida. Logo, essa analisa reforça a ideia de que é necessário um ajuste a fim de utilizar esse equipamento de forma eficiente.

Os pontos em verde na Tabela 23, demonstram os pontos os ensaios representam igualdade ao valor desejado.

Ainda na Tabela 23, obtém-se que os valores ajustados representam majoritariamente resultados mais próximos dos ideais do que os encontrados em testes iniciais. O ajuste demonstra que aproximadamente 44,45 % dos valores são iguais aos valores desejados

Tabela 23 – Tabela dos valores dos resultados de teste Z para o braço comparando com os valores ideais

Valor referencia (mm)	P-valor para ensaio inicial	P-valor para a correção
60	0	7.23e-11
70	0	1.15e-03
80	0	0.41
90	1.24e-14	0.08
100	0.08	0.89
110	1.21e-21	0.09
120	7.31e-50	1.86-04
130	0	7.60e-17
140	0	7.86e-21

obtendo-se uma melhoria de quatro vezes mais do que os valores encontrados posteriormente. Além disso, todos os valores de correção apresentaram resultados mais próximo do ideal quando comparados com a amostra do erro.

5 Conclusão

Esse trabalho apresentou a análise do uso da cinemática inversa em um braço robótico visando comparar os resultados esperados com os encontrados e assim aplicar uma melhoria sobre o mesmo. Ainda, essa melhoria foi aplicada através do uso de regressão linear e de baterias de testes aleatórios. Os ensaios foram executados no sensor e nas articulações do mecanismo que dividiu-se em: sensor ultrassônico, base e braço.

Com exceção da base, que não foi necessária a execução de testes de correção por basear-se no sensor ultrassônico para seu controle, todos os outros mecânicos (sensor ultrassônico e base) demonstraram a necessidade de ajuste a fim de que executassem de forma precisa a função desempenhada. Todos os mecanismos respondiam ao Arduino, porém, os valores encontrados apresentavam uma aleatoriedade nas fases iniciais dificultando o controle do braço robótico.

Os resultados obtido no sensor ultrassônico demonstraram que esse sensor pode ser utilizado nesse projeto. Isso corre pois o ajuste feito reduziu uma diferença máxima de 18 mm para 11 mm, e além disso diminui o erro médio de 5.71 % de erro para 3.67 %. Como trata-se de um projeto de precisão, esse valores apresentam grande impacto em uma escala global do projeto. A correção do sensor ultrassônico é de fundamental importância já que tem influência direta sobre a movimentação da base.

Ainda sobre o sensor ultrassônico, o mesmo controla a base. Como dito na metodologia desse trabalho, a base apresenta um funcionamento que responde ao sensor ultrassônico, ou seja, quando a estrutura movimenta e o sensor identifica algo em sua direção, o Arduino envia uma mensagem para a base a fim de travar a movimentação rotacional do mecanismo.

Outro aspecto que é diretamente influenciado pelo sensor ultrassônico é a movimentação da garra até o objeto. Esse sensor é o responsável pela identificação da distância até o objeto, então esse metragem é aplicada a cinemática inversa utilizada pelos servos do braço a fim de movimenta-lo até o objeto desejado. Logo, uma melhoria de 2.04 % é uma melhoria satisfatória para esse sistema.

Outra aspecto de melhoria encontrado após os ensaios foi o da articulação do braço responsável por fazer a garra alcançar o seu destino. Nos resultados iniciais obteve-se um

erro médio geral de 15.83 mm enquanto após a correção esse erro diminuiu para 2.66 mm. Quando trata-se de porcentagem obteve-se primeiramente resultados que distorciam do resultado esperado em 16 % e após a aplicação da regressão linear isso foi reduzido para aproximadamente 2.8 % em uma escala geral dos experimentos. Logo, pode-se perceber uma melhoria de 13.2 % com os ajustes necessários.

Esses ajustes respondem em uma escala geral. Em outras palavras, após o ajuste do braço e do sensor ultrassônico, não é apenas uma melhoria de 2.04 % ou de 13.2 % que representa a melhoria do sistema em si. Uma combinação dessas melhorias seria a representação de uma correção geral para todo o sistema pois os sensores tem impacto direto em cada parte do mecanismo completo.

Os experimentos t e Z visam reforçar que houve uma melhoria entre o erro e a correção de modo estatístico. Primeiramente fica comprovado que os valores entre essas duas amostras são majoritariamente diferentes e não ocorreu ao acaso através do teste t. Além disso, o erro das medias dos testes pós correção são considerados menores do que nos ensaios iniciais. Quanto ao teste Z é possível notar que o teste de erro apresentou similaridade inferior quando comparado com a correção, pois o erro se igualou aos testes ideais em apenas 11 % enquanto o a correção obteve 44.45 % de semelhança.

Assim, conclui-se que os testes de regressão linear, t e Z são fundamentais na aplicação da cinemática inversa desse braço robótico. Sem essas aplicações não seria possível controlar o braço de forma que os objetos pudessem ser coletados com precisão. Logo, as correções tornaram o mecanismo mais previsível e com controle acessível.

5.1 Trabalhos Futuros

Com resultados satisfatórios, esse trabalho abre espaço para a evolução desse trabalho em termos de maior autonomia ou de um controle manual. Para a autonomia sugere-se o uso de outros sensores, tais como, acelerômetros, motores de corrente contínua, coleta de dados para futuras melhorias. Com o intuito de um controle manual pode-se utilizar sensores *bluetooth* e uma programação via Android onde o mecanismo possa ser controlado via tablets, celulares ou computadores. Além disso deve-se utilizar a cinemática direta para esse controle.

Os resultados encontrados no sensor ultrassônico e na base servem de parâmetro pra o cálculo da cinemática inversa. Esses ensaios foram feitos utilizando todo o peso da estrutura e além disso demonstram valores reais. Logo, para a aplicação dessa nova metodologia é necessária apenas baterias de testes de correção utilizando a regressão linear para a base e para o sensor ultrassônico os mesmos valores podem ser repetidos.

Referências

- ALBERNAZ, D. *MANIPULADOR ROBÓTICO DE ACIONAMENTO REMOTO*. Tese (Doutorado) — Universidade do Vale do Paraíba, 2015. Citado na página 37.
- BAIK, S. H.; LEE, W. J.; RHA, K. H.; KIM, N. K.; SOHN, S. K.; CHI, H. S.; CHO, C. H.; LEE, S. K.; CHEON, J. H.; AHN, J. B. et al. Robotic total mesorectal excision for rectal cancer using four robotic arms. *Surgical endoscopy*, Springer, v. 22, n. 3, p. 792–797, 2008. Citado na página 16.
- BAJERSKI, I.; ABELLA, V. D. B. Braço robótico com controle remoto bluetooth. *Revista da Graduação*, v. 3, n. 2, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- BATISTA, J. C. *ROBOTOTY: FERRAMENTA PARA ENSINO DE PROGRAMAÇÃO PARA CRIANÇAS USANDO ROBÔS ARDUINO*. Monografia — Universidade do Vale do Paraíba, 2011. Citado na página 37.
- CRAIG, J. J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 29.
- FILHO, T. F. B.; FERRARI, A. F. Aplicação de robôs nas indústrias. *Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria, ES. Disponível em:* < <http://www2.ele.ufes.br/~tfbastos/RobMov/robosindustriais.pdf> >. Acesso em 25 de Março de 2017, v. 7, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 16, 18 e 19.
- FREAKS, E. Ultrasonic ranging module hc-sr04. *linea*]. Disponível em: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>. Acessado. Acesso em 20 de Março de 2017, 2016. Citado na página 36.
- HANLY, E. J.; TALAMINI, M. A. Robotic abdominal surgery. *The American journal of surgery*, Elsevier, v. 188, n. 4, p. 19–26, 2004. Citado na página 16.
- JUNG, Y. W.; LEE, D. W.; KIM, S. W.; NAM, E. J.; KIM, J. H.; KIM, J. W.; KIM, Y. T. Robot-assisted staging using three robotic arms for endometrial cancer: Comparison to laparoscopy and laparotomy at a single institution. *Journal of surgical oncology*, Wiley Online Library, v. 101, n. 2, p. 116–121, 2010. Citado na página 16.
- KADIR, W. M. H. W.; SAMIN, R. E.; IBRAHIM, B. S. K. Internet controlled robotic arm. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 41, p. 1065–1071, 2012. Citado na página 16.
- KEATING, S.; OXMAN, N. Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 29, n. 6, p. 439–448, 2013. Citado na página 16.
- MCROBERTS, M. *Arduino básico*. São Paulo: Novatec, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- MEGA, A. 2560. <http://www.projetoarduino.com.br/arduinomega-2560-p19> >. Acesso em 01 de Abril de 2017, v. 20, p. 05–14, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

- MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 8. ed. [S.l.]: Wiley, London, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.
- NAKATANI, A. M.; GUIMARÃES, A. V.; NETO, V. M. Medição com sensor ultrassônico hc-sr04. UTFPR, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- NUNES, W. M. et al. *Desenvolvimento de uma estrutura robótica atuada por cabos para reabilitação/recuperação dos movimentos do ombro humano*. Tese (Monografia) — Universidade Federal de Uberlândia, 2012. Citado na página 13.
- PIERI, E. R. D. *Curso de Robótica Móvel*. Tese (Mestrado) — Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 16, 27, 28 e 29.
- PIN, L. B.; OLIVEIRA, D. F. de; AMARAL, E. M. Ludebot: Uma plataforma com servomotores e sensoramento utilizando a placa arduino e controle externo. *Proceedings of IEEE ARSO*, 2012. Citado na página 24.
- RENNA, R. B. D.; BRASIL, R. D.; CUNHA, T. E.; BEPPU, M. M.; FONSECA, E. G. *Introdução ao kit de desenvolvimento Arduino*. Relatório — Universidade Federal Fluminense, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- SABO, A.; LÁBADI, H.; SZAKÁLL, T.; KUKLA, A. Controlling robotic arms using raspberry pi through the internet. *International conference on Applied Internet and Information Technologies - AIIT*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 38.
- SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. *Modeling and control of robot manipulators*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1996. v. 8. Citado na página 29.
- SHHEIBIA, T. A. A. E. *Controle de um Braço Robótico utilizando uma Abordagem de Agente Inteligente*. Tese (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2001. Citado na página 13.
- SILVA, J. A. M. d. *Projeto, desenvolvimento e implementação de um robô nadador de inspiração biológica*. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 26.
- SPONG, M. W.; VIDYASAGAR, M.; POTA, H.; ALBERTS, T. Robot dynamics and control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1963-, v. 39, n. 8, p. 1774–1775, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- SZABÓ, R.; LIE, I. Automated colored object sorting application for robotic arms. In: IEEE. *Electronics and Telecommunications (ISETC), 2012 10th International Symposium on*. [S.l.], 2012. p. 95–98. Citado na página 16.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Érica, 2005. v. 3. 32 p. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- VUOLO, J. H. *Fundamentos da teoria dos erros*. [S.l.]: E. Blucher, 1996. Citado na página 30.
- WENDLING, M. *Sensores*. Relatório — Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2010. Citado na página 23.

YUSOFF, M. A. K.; SAMIN, R. E.; IBRAHIM, B. S. K. Wireless mobile robotic arm. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 41, p. 1072–1078, 2012. Citado 2 vezes nas páginas [14](#) e [18](#).