

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Graduação em Engenharia Mecânica com linha de formação em**  
**Mecatrônica**

Felipe Vital Cacique  
Maressa Silva Fidelis de Oliveira  
Murillo de Oliveira Gonçalves Germano

**CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM SENSOR DE FORÇA**

**Belo Horizonte**  
**2017**



Felipe Vital Cacique  
Maressa Silva Fidelis de Oliveira  
Murillo de Oliveira Gonçalves Germano

## **CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM SENSOR DE FORÇA**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica com linha de formação em Mecatrônica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Sady Antônio dos Santos Filho

Área de concentração: Robótica e Eletrônica

Belo Horizonte

2017



Felipe Vital Cacique  
Maressa Silva Fidelis de Oliveira  
Murillo de Oliveira Gonçalves Germano

## **CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM SENSOR DE FORÇA**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica com linha de formação em Mecatrônica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Me. Nilson de Figueiredo Filho – PUC Minas (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Denilson Laudares Rodrigues – PUC Minas (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Sady Antônio dos Santos Filho – PUC Minas (Orientador)

Belo Horizonte, 21 de junho de 2017



*Dedicado a Deus*





## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Deus, às nossas famílias, ao professor Sady, e a todas as pessoas que nos apoiaram, ajudaram e inspiraram a realizar este trabalho.



*“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo” (Nelson Mandela)*



## RESUMO

A robótica é uma ferramenta essencial para suprir a necessidade do homem em melhorar seus processos e otimizar o tempo. O presente projeto visou a aplicação da robótica no desenvolvimento do controle de posição e força de um manipulador, explorando os conceitos de cinemáticas direta e inversa, e a sensação de força baseado no método de Reflexão Direta de Força (DFR), implementados em linguagens de programação Python e Arduino. O sensor de força do manipulador robótico foi construído utilizando o sensor óptico TCRT 5000 posicionado nas extremidades de um tubo de silicone. Ele funciona a partir da atenuação de luz que ocorre devido à sua deformação mecânica, gerando um sinal de tensão elétrica relacionado à força atuante. Para a construção dos dispositivos de controle de posição e feedback de força, foram utilizados potenciômetros, acelerômetro e um mini servomotor acoplado ao eixo de uma tesoura. A comunicação entre o manipulador e usuário foi realizada através do protocolo de comunicação serial RS-232 entre dois Arduinos e um computador. Os resultados mostraram o satisfatório funcionamento e performance das técnicas de controle utilizadas. Este projeto apresentou um manipulador que, com os ajustes e materiais adequados, poderá ser utilizado em aplicações como processos de manufatura industrial, realização de tarefas em espaço confinado e perigosos ao homem, e inclusive em operações cirúrgicas.

Palavras-chave: Manipulador Robótico. Cinemática Direta e Inversa. Sensor de força. Servomotor. Denavit-Hartenberg. Reflexão Direta de Força.



## **ABSTRACT**

Robotics are essential tools to supply the man needs for improving his processes and optimizing time. This project apply the knowledge of robotics developing the position and force control of a manipulator, exploring the concepts of forward and inverse kinematics, and the force sensation based on the method of Direct Force Reflection (DFR), implemented in the programming languages Python and Arduino. The force sensor of the robotic arm was built using the optic sensor TCRT 5000, fixed on a silicon tube ends. It works by the light attenuation that happen due its mechanical deformation, generating a voltage signal related to the acting force. For the construction of the position and force feedback devices, were used potentiometers, an accelerometer and a mini servomotor linked to a scissors axis. The communication between manipulator and user was done through the RS-232 serial protocol between two Arduino and a computer. The results showed the satisfactory operation and control performance through the techniques implemented. This project presented a manipulator that, with the adjustments and suitable materials, can be applied to industrial manufacturing processes, doing tasks in confined and dangerous place, and even to surgical operation.

Keywords: Robotic Manipulator. Forward and Inverse kinematics. Force Sensor. Servomotor. Denavit-Hartenberg. Direct Force Reflection.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descrição simplificada de um sistema de controle .....	27
Figura 2 - Posicionamentos dos eixos no braço planar de 3 links .....	30
Figura 3 - Parâmetros de Denavit-Hartenberg do braço planar de 3 links .....	30
Figura 4 - Manipulador de três links .....	33
Figura 5 – Análise presença de obstáculos .....	33
Figura 6 - Plano de geometria associado ao robô planar de três links .....	34
Figura 7 - Arquitetura Reflexão Direta da Força .....	38
Figura 8 - Arquitetura Posição Baseada no Erro .....	38
Figura 9 - Detalhes construtivos de um extensômetro .....	40
Figura 10 - Princípio de funcionamento de um extensômetro .....	41
Figura 11 - Sensores flex mais comuns .....	42
Figura 12 - Esquema do sensor ótico desenvolvido .....	43
Figura 13 - Montagem do sensor ótico desenvolvido .....	43
Figura 14 - Servomotor .....	44
Figura 15 - Constituintes do servo motor .....	45
Figura 16 - Microcontrolador .....	46
Figura 17 - Arduino Uno .....	47
Figura 18 - Diagrama do funcionamento do sistema .....	49
Figura 19 - Fluxograma das cinemáticas e sensação de força .....	50
Figura 20 - Dispositivo PIG .....	54
Figura 21 - Braço Mecânico desenhado no Solid Works .....	55
Figura 22 - Braço Mecânico .....	56
Figura 23 - Modelo Manipulador Robótico .....	57
Figura 24 - Modelo braço Robótico .....	63
Figura 25 - Esquema Montagem Dispositivo de Feedback de Força .....	64
Figura 26 - Mecanismo de controle da garra e sensação força .....	65
Figura 27 - Sensor de Força .....	66
Figura 28 - Sensor de Força .....	66
Figura 29 - Circuito elétrico para acionamento do Sensor .....	67
Figura 30 - Procedimento de Calibração do Sensor .....	67
Figura 31 - Teste de posição 1 .....	76
Figura 32 - Teste de posição 2 .....	76



<b>Figura 33 - Teste de posição 3 .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 34 – Material Rígido.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 35 – Material Macio.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 36 - Animação quadro a quadro .....</b>	<b>82</b>



## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Sinal original x Sinal tratado .....	53
GRÁFICO 2 – Calibração do sensor de força .....	68
GRÁFICO 3 - Teste de força .....	78
GRÁFICO 4 - Teste de força material rígido .....	79
GRÁFICO 5 - Teste força objeto macio.....	79
GRÁFICO 6 - Gráfico hipotético da força gerada pelo Servomotor.....	81



## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – Parâmetros de Denavit Hatenberg .....	57
TABELA 2 - Experimento de sensibilidade de força com diferentes objetos.....	80





## **LISTA DE ESQUEMAS**

ESQUEMA 1 – Comunicação Serial .....	71
ESQUEMA 2 – Algoritmo de recebimento de dados no Arduino Due .....	72
ESQUEMA 3 – Validação Cinemática Inversa .....	75



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 Objetivo .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1.1 Objetivos Específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
<b>3 CONCEITUAÇÃO TEORICA .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Controle e Automação .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Cinemática Direta.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Cinemática Inversa .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.1 Solubilidade .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.2 Existência de soluções .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.3 Múltiplas Soluções .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.4 Método de solução .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.5 Solução geométrica.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.6 Solução algébrica .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 Feedback de Forças .....</b>	<b>36</b>
<b>3.5 Sensores.....</b>	<b>39</b>
<b>3.5.1 Sensor de Força.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.2 Sensores Óticos de Flexão .....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 Servomotor .....</b>	<b>44</b>
<b>3.7 Microcontrolador .....</b>	<b>45</b>
<b>5 METODOLOGIA .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 Controle de Posição.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.1 Master.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.1.1 Acelerômetro.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.1.2 Dispositivo PIG.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1.2 Slave.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.2.1 Braço Robótico.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.3 Controle .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.3.1 Cinemática Direta e Inversa .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.3.2 Cinemática Direta.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.3.3 Cinemática Inversa .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.3.4 Escolha do conjunto de ângulos ideal.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1.3.5 Simulação .....</b>	<b>63</b>



<b>4.2 Sensação de Força</b>	<b>64</b>
<b>4.2.1 Mestre</b>	<b>64</b>
<b>4.2.2 Slave</b>	<b>65</b>
<b>4.2.3 Controle</b>	<b>68</b>
4.2.3.1 Importância do ganho	69
4.2.3.2 Consideração feitas no Código	69
<b>4.3 Python</b>	<b>70</b>
<b>4.3.1 Comunicação Serial</b>	<b>70</b>
<b>4.4 Automação</b>	<b>72</b>
<b>4.5 Lista de materiais</b>	<b>73</b>
<b>5 TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>75</b>
<b>5.1 Posição</b>	<b>75</b>
<b>5.2 Força</b>	<b>78</b>
<b>5.3 Automação</b>	<b>82</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>85</b>



## **1 INTRODUÇÃO**

No decorrer dos anos, com o desenvolvimento tecnológico, surgiu a necessidade do homem melhorar seus processos e otimizar o tempo. A robótica é uma ferramenta essencial para suprir a necessidade do homem, com uma área ampla de aplicações: industriais, medicinais, espaciais e em ambientes diversos. Em meados do século XX, começou o surgimento de transistores e circuitos integrados, como microprocessadores, que forneceram as condições necessárias para o surgimento de robôs voltados para automação.

A construção de manipuladores robóticos, que podem ser definidos como dispositivos mecânicos controlados por software, teve um papel fundamental para evolução da robótica, principalmente nas áreas de aplicação, como, automatização de processos, realização de intervenções médicas e/ou industriais a longa distância, segurança do operador em manipular matérias tóxicos e radioativos.

De acordo com Chua (2001) e Pande (2014), existem várias técnicas para identificar movimentos de um manipulador robótico: rastreamento óptico por câmeras, captação de movimentos com acelerômetros, potenciômetros e/ou sensores flexíveis, determinação da posição utilizando fibra ótica e determinação da posição utilizando métodos matemáticos e cinemática direta e inversa. Além de manipular os movimentos, é possível implementar sensores que são sensíveis ao reconhecimento de forças aplicadas, conhecidos como sensores de força.

Este trabalho discorre na construção de um manipulador robótico com um sensor de força, de acordo com os métodos matemáticos cinemática direta e inversa para a determinação da posição e orientação e implementação de um sensor de força para avaliar a força aplicada na manipulação de um objeto.

### **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo principal o controle e automação de um manipulador robótico com sensor de força, onde usuário deverá ser capaz de sentir e controlar a força atuante na garra do manipulador.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- Estudar e aplicar os conhecimentos de robótica, como cinemática direta e inversa, e sensação de força;
- Aplicar o sensor de flexão desenvolvido por Machado e outros (2016) em uma nova configuração, capaz de mensurar força aplicada;
- Confeccionar um dispositivo para controlar a posição espacial do manipulador;
- Aprimorar habilidades de programação em Python;



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da robótica trouxe ações e benefícios que antes eram considerados impossíveis para o homem. De acordo com Narayan (2014), o uso de robôs proporciona muitas vantagens como o aumento da produtividade, segurança, eficiência, qualidade na fabricação de produtos, capacidade de trabalhar em ambientes prejudiciais à saúde humana, precisão mili ou micrométrica, execução de várias tarefas simultaneamente, capacidade de trabalhar sem descaso, entre outros. Devido às suas vantagens, os robôs são largamente utilizados na área industrial, aplicados para executar tarefas que incluem soldagem, pintura a spray, corte de metal, polimento, inspeção e manipulação de objetos (Narayan, 2014). Os robôs também estão presentes na indústria nuclear, realizando trabalhos repetitivos e automatizados em ambientes radioativos. Esse uso foi impulsionado não só pela lucratividade do sistema automatizado, mas principalmente pela segurança do trabalhador e as rigorosas legislações de segurança do trabalho (Narayan, 2014).

Atualmente, os robôs possuem um papel de extrema importância na área medicinal e fisioterapêutica, no qual muitos projetos têm sido desenvolvidos. Bôrtol e Filho (2001), por exemplo, desenvolveram uma tecnologia que auxilia na mobilidade de pessoas com deficiências graves. Essa tecnologia consta em um sensor híbrido que pode ser instalado em um boné ou no antebraço de uma criança, e que com o piscar dos olhos, movimentação da cabeça ou de outras partes do corpo é enviado um sinal a um manipulador robótico equipado com garras fazendo-o se movimentar.

Uma das etapas fundamentais no controle de um manipulador robótico é o desenvolvimento da sua cinemática inversa. De acordo com Craig (2005), dada uma posição e orientação desejada do efetuador ou ferramenta em relação à base, a cinemática inversa é capaz de computar um conjunto de ângulos que faça o manipulador atingir a posição desejada.

Existem inúmeras abordagens para a resolução da cinemática inversa em robôs manipuladores, incluindo os métodos tradicionais, como o analítico e geométrico, bem como os métodos que se utilizam de algoritmos de inteligência computacional.

Por ser um método intuitivo, o algoritmo tradicional de cinemática inversa, baseado nos parâmetros de Denavit-Hartenberg (DH), são largamente utilizados. Ilie

(2015) realizou um estudo da cinemática direta e inversa aplicado em robôs industriais. Neste estudo foi realizado um modelamento analítico, levando em consideração todos os parâmetros funcionais e de construção de dois diferentes modelos industriais (ABB IRB6620 e Fanuc m2000iA 900L). Para validar analiticamente os resultados da cinemática inversa, o valor das juntas determinados para uma específica posição do manipulador deve corresponder com o valor das juntas dos ângulos provenientes da cinemática inversa. Também foi feita uma verificação geométrica, através da criação de um modelo 3D em CAD, comprovando que a posição desejada é alcançada, pois a ponta do robô coincide com o ponto definido. Ilie também utilizou-se dos programas de simulação *Unified System for Automation and Robot Simulator* (USARSim), *Robo-analyzer*. Ainda para a análise dos resultados da cinemática direta, inversa, workspace, acelerações, velocidades, foram utilizados os programas *Kawasaki PC Roset Offline* e *Mixcrosoft Robotics Developer Studio*.

O inconveniente do método tradicional é a necessidade de se trabalhar com a matriz de transformação homogênea  $4 \times 4$ , resultando em um processo complexo e lento, podendo não cumprir eficientemente demandas de aplicação em tempo real (Chen *et al.*, 2015). Chen *et al.*(2015) realizaram uma melhoria no algoritmo de cinemática inversa utilizando uma inovadora teoria: "Screw Threory". Esse método reduz o problema da cinemática inversa em problemas menores no qual as soluções já são conhecidas. A solução do problema pelo método Screw apresenta vantagens como a eficiência computacional, a descrição do corpo rígido de movimento não sofrer de singularidades e simplificada análise dos mecanismos utilizando uma descrição geométrica do manipulador. Além disso, pode-se evitar a necessidade de trabalhar com um grande número de multiplicação de matrizes. Os autores realizaram um teste comparativo entre o método Screw e o método tradicional da cinemática inversa no que diz respeito ao tempo de processamento. O Screw e o método tradicional gastaram 4.151 microssegundos e 11.683 microssegundos respectivamente. Concluiu-se que o método proposto possui grande performance para aplicações em tempo real.

Existem ainda outras abordagens para realização da cinemática inversa, como as utilizações de algoritmos de inteligência computacional. Exemplo disso, é a abordagem realizada por Köker et al.(2013), utilizando redes neurais (RN). Em seu estudo, Köker criou 10 RN com diferentes especificações (coeficientes e número de

neurônios na camada escondida), sendo que o conjunto de dados (data sets) foram preparados usando um software de simulação que inclui um modelo de cinemática do robô. A solução para cada RN é avaliada utilizando as equações de cinemática direta do robô, a fim de se escolher a RN de melhor performance. Esse tipo de solução possui um rápido processamento, no entanto, necessita de melhorias pois atualmente ele não apresenta uma boa precisão (erro em torno de 0.5mm). Pode se aumentar sua precisão utilizando algoritmos como algoritmos genéticos, colônia de formigas (Ant Colony), que aumentam o tempo de processamento significativamente.

Um dos componentes muito utilizados em manipuladores robóticos é o controle de força. A utilização de sensores de força é essencial na manipulação precisa de objetos frágeis ou deformáveis, bem como para a proteção das pessoas e de equipamentos industriais (KIM *et al.*, 2010). Strain-gauges ou extensômeros são largamente utilizados para essa finalidade. Estes transdutores variam sua resistência elétrica proporcionalmente à deformação mecânica do objeto ao qual são fixados. KIM *et al.* (2010) propõem a utilização de três extensômeros juntamente com o filtro de Kalman, com o objetivo de maximizar a precisão e permitir sua utilização em micro sistemas.

Backman *et al.* (2017) realizaram uma outra abordagem, desenvolvendo um sensor de força de alta sensibilidade baseado no Efeito-Hall. Este sensor é constituído por um sensor de Efeito-Hall posicionado na ponta de uma barra de alumínio que está em contato com o material. O sensor fica imerso em um campo magnético gerado por quatro ímãs. Através dessa configuração, o sensor de Efeito-Hall mede a deformação da barra metálica encontrando, a partir de uma calibração, a força atuante. O sensor foi utilizado para medir propriedades mecânicas de materiais biológicos, apresentando uma larga faixa de operação, fácil fabricação e baixo custo.



### 3 CONCEITUAÇÃO TEORICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica que foi utilizada como base para o desenvolvimento do trabalho. Conceitos fundamentais de engenharia, definição e aplicação de sensores, bem como as características da cinemática direta e inversa, utilizadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

#### 3.1 Controle e Automação

A engenharia está diretamente relacionada a manipulação de materiais e forças na natureza em prol da humanidade, visando sempre dotá-la de produtos que melhorem a qualidade de vida da forma mais econômica e segura possível. Aos engenheiros de controle e automação está condicionada a responsabilidade pela modelagem e o controle de sistemas modernos, complexos e interligados, tais como automatização de processos industriais, sistemas mecatrônicos e sistemas robóticos (Dorf e Bishop, 2001).

De acordo com Nise (2002), um sistema de controle consiste em subsistemas e processos reunidos com o propósito de controlar as saídas dos processos. Por exemplo, uma caldeira produz calor como resultado do fluxo de combustível. Na sua forma mais simples, um sistema de controle fornece uma saída ou resposta para uma dada entrada ou estímulo. A Figura 1 apresenta de forma adaptada, o esquema de um sistema de controle elaborado por Nise (2002).

**Figura 1 - Descrição simplificada de um sistema de controle**



Fonte: (Nise, 2002)

O controle de um processo de forma automática, em vez de manual, é chamado frequentemente de automação, ou seja, um sistema automático é um mecanismo que funciona totalmente, ou em parte, por si só; tendo como objetivo evitar

que seja necessária a atuação do homem para o seu funcionamento. Sistemas de controle e automação são amplamente aplicados em sistemas industriais como de manufatura e produção, na indústria química, na indústria de energia, sistemas baseados em controle de nível, pressão de vapor e temperatura, controle de velocidade, estabilidade, estabilização e condução, dentre diversos outros sistemas. Atualmente, os sistemas de controle encontram aplicação ampla na direção, navegação e controle de mísseis e de naves espaciais, bem como aviões e navios. Nise (2002) afirma que ônibus espaciais são constituídos de numerosos sistemas de controle operados por um computador de bordo compartilhado no tempo. Sem sistemas de controle seria impossível guiar tais ônibus a partir da Terra para órbita terrestre e vice-versa.

A teoria de controle contemporânea trabalha sistemas que possuem como atributos auto-organização, serem adaptativos, serem robustos, com aprendizado e eficazes. Em suma, a engenharia de controle e automação diz respeito a análise e projeto de sistemas orientados para objetivos. Assim sendo, a mecanização das doutrinas orientadas a objetivos tem crescido na hierarquia dos sistemas de controle orientados.

### **3.2 Cinemática Direta**

A cinemática é entendida como o estudo do movimento dos corpos, sem levar em consideração as forças que causaram tal movimento. Nos campos da cinemática são estudados a posição, a velocidade, a aceleração e todas as derivadas de ordem superior da variável posição (em relação ao tempo ou a qualquer outra variável). Portanto, o estudo da cinemática de manipuladores refere-se a todas as propriedades geométricas e de base temporal do movimento (Craig, 2005).

Um manipulador consiste basicamente de uma série de corpos rígidos, também chamado de links, conectados entre si por articulações. Segundo Craig (2005), o objetivo do estudo da cinemática do manipulador é descrever a posição e orientação do efetuador, relativo a base do manipulador, como função das variáveis estabelecidas em cada uma das junções. Geralmente, em um manipulador, todas as juntas possuem apenas um grau de liberdade, sendo as juntas rotacionais ou juntas deslizantes as mais comuns.

De acordo com Craig (2005) qualquer robô pode ser descrito cinematicamente por 4 parâmetros para cada link, nomeados como parâmetros de Denavit-Hartenberg. Dois deles descrevem o próprio link, enquanto os outros dois descrevem a relação entre o link e o seu vizinho. Os parâmetros e o seu método de obtenção são:

$a_i = \text{distância de } Z_i \text{ a } Z_{i+1} \text{ medida ao longo de } X_i$

$\alpha_i = \text{ângulo de } Z_i \text{ a } Z_{i+1} \text{ medida em torno de } X_i$

$d_i = \text{distância de } X_{i-1} \text{ a } X_i \text{ medida ao longo de } Z_i$

$\theta_i = \text{ângulo de } X_{i-1} \text{ a } X_i \text{ medida em torno de } Z_i$

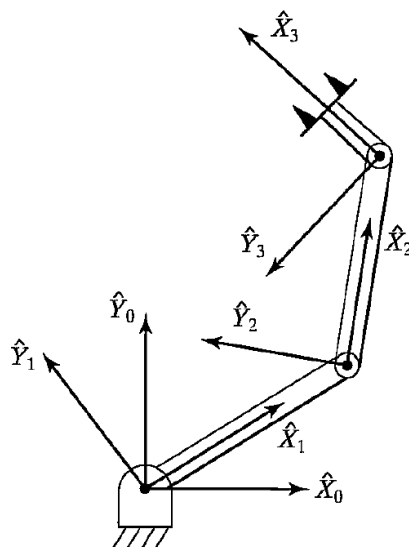
Para que os parâmetros sejam válidos, os eixos cartesianos devem ter sido fixados de acordo com convenção estabelecida.

Craig (2005) sintetizou um resumo para o posicionamento dos eixos cartesianos sobre os links de acordo com a convenção:

- 1) Identificar as juntas e desenhar uma longa linha sobre elas.
- 2) Identificar a perpendicular comum entre elas ou o ponto de interseção. A origem do plano cartesiano deverá ser posicionada no ponto de interseção ou onde a perpendicular comum encontra com eixo  $i$ .
- 3) Posiciona-se o eixo  $Z_i$  apontando ao longo do eixo da junta  $i$ .
- 4) Posiciona-se o eixo  $X_i$  apontando ao longo da perpendicular comum ou normal ao plano contendo os dois eixos (no caso em que os eixos se interceptam).
- 5) Posiciona-se o  $Y_i$  de forma a completar a regra da mão direita.
- 6) Posiciona-se o eixo  $\{1\}$  sobre o eixo  $\{0\}$  quando a variável da junta inicial for zero.

Para ilustrar o processo, a Figura 2 representa um braço planar de 3 links, onde os eixos cartesianos foram posicionados de acordo com a convenção estabelecida.

**Figura 2 - Posicionamentos dos eixos no braço planar de 3 links**



Fonte: Craig, 2005

Através do modelo, obteve-se os parâmetros de Denavit-Hartenberg seguindo o passo a passo descrito por Craig (2005), figura 3.

**Figura 3 - Parâmetros de Denavit-Hartenberg do braço planar de 3 links**

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	$L_1$	0	$\theta_2$
3	0	$L_2$	0	$\theta_3$

Fonte: Craig, 2005

É desejável obter uma transformada que defina o eixo  $\{i\}$  em relação ao eixo  $\{i-1\}$ . Essa transformada é uma função dos 4 parâmetros de Denavit-Hartenberg. Craig (2005) realiza uma dedução encontrando a fórmula geral, representada pela matriz da Equação 1, válida para qualquer Robô



$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Essa formula representa eixo  $i$  em relação ao seu eixo anterior  $i - 1$ . Uma vez que se tenha definido a relação entre todos os links e seus anteriores, o cálculo da transformação no eixo  $\{N\}$  em relação ao eixo  $\{0\}$  pode ser encontrado pela multiplicação concatenada de todas as transformadas, como mostrado na Equação 2.

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \dots {}^{N-1}_N T. \quad (2)$$

O resultado da transformada é expressada pela Equação 3:

$${}^1_6 T = {}^1_3 T {}^3_6 T = \begin{bmatrix} {}^1r_{11} & {}^1r_{12} & {}^1r_{13} & {}^1p_x \\ {}^1r_{21} & {}^1r_{22} & {}^1r_{23} & {}^1p_y \\ {}^1r_{31} & {}^1r_{32} & {}^1r_{33} & {}^1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Onde  $p_x$ ,  $p_y$  e  $p_z$  são as coordenadas espaciais do plano  $\{N\}$  em relação a  $\{0\}$ .

Um exemplo detalhado da aplicação da cinemática inversa pode ser visto na seção 3.3, aplicada ao manipulador robótico do projeto.

### 3.3 Cinemática Inversa

Dada uma posição e orientação desejada do efetuador ou ferramenta em relação à base, a cinemática inversa é capaz de computar um conjunto de ângulos que faça o manipulador atingir a posição desejada. A solução para o problema de se encontrar os ângulos pode ser dividida em duas partes. A primeira é realizar transformadas espaciais do plano da ferramenta  $\{W\}$  em relação ao plano da base  $\{B\}$ , assim como foi realizada para a cinemática direta. Em seguida, a cinemática inversa é usada para resolver as equações para os ângulos das juntas (Craig, 2005).

### **3.3.1 Solubilidade**

A intenção é resolver as equações não lineares e transcendentais do manipulador. Dada a transformada  ${}^0_N T$  tenta-se encontrar  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ , como foi discutido na seção 3.2. A matriz  ${}^0_N T$  possui 12 equações no total, sendo que 9 delas vêm da porção das matrizes de rotação, e apenas 3 são independentes, representando as coordenadas espaciais. Como qualquer equação não linear, deve-se preocupar com a existência de múltiplas equações e soluções. Para resolver as equações existem vários métodos de solução (Craig, 2005).

### **3.3.2 Existência de soluções**

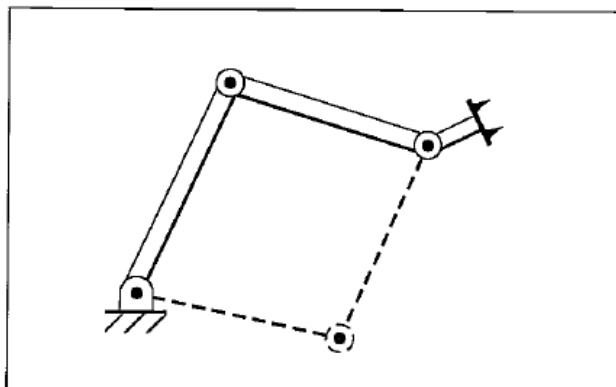
A existência de soluções depende do campo de trabalho ou “workspace” do manipulador, isto é o volume de espaço que o a ferramenta do manipulador pode alcançar (Craig, 2015). Pode-se definir o workspace como:

Dextrous workspace: volume espacial que a ferramenta pode alcançar com qualquer orientação.

Reachable workspace: volume espacial que o robô pode alcançar com pelo menos uma orientação.

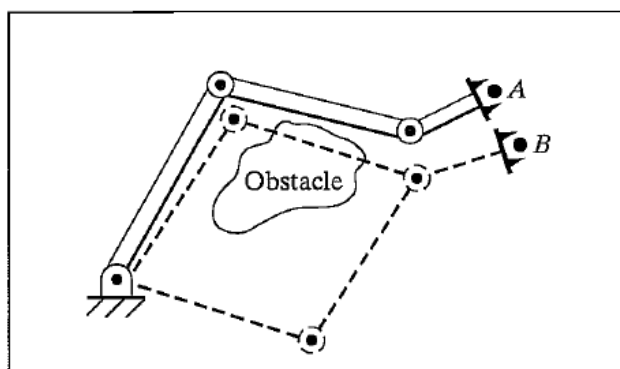
### **3.3.3 Múltiplas Soluções**

A resolução das equações de cinemática envolve múltiplas soluções. Como se pode ver na Figura 4, existem duas maneiras para um manipulador de três links atingir uma certa posição.

**Figura 4 - Manipulador de três links**

Fonte: Craig, 2005

Por haver várias soluções, o sistema deve ser capaz de escolher uma. O critério de escolha pode mudar, mas uma escolha razoável seria a solução mais próxima (Craig, 2015). Por exemplo, o manipulador está na posição A e deve-se mover para a posição B. Os ângulos para B devem ser escolhidos de forma que eles sejam o mais próximo possível dos ângulos em A. Em outras palavras, a solução deve minimizar o quanto cada junta deve mover. No entanto a noção de solução mais próxima pode mudar. Por exemplo, os robôs possuem geralmente juntas longas e juntas mais curtas. É preferível movimentar as juntas menores, do que as maiores. Para isso pode ser usado um sistema de “pesos” aplicada ao cálculo da escolha da solução (Craig, 2005). Outro ponto a analisar é a presença de obstáculos (Figura 55). Portanto, às vezes pode ser necessário escolher uma solução “mais longe” do que uma solução “mais perto”.

**Figura 5 – Análise presença de obstáculos**

Fonte: Craig, 2005

De acordo com Craig (2005), para um manipulador de juntas rotacionais com seis graus de liberdade, existem até dezesseis soluções.

### 3.3.4 Método de solução

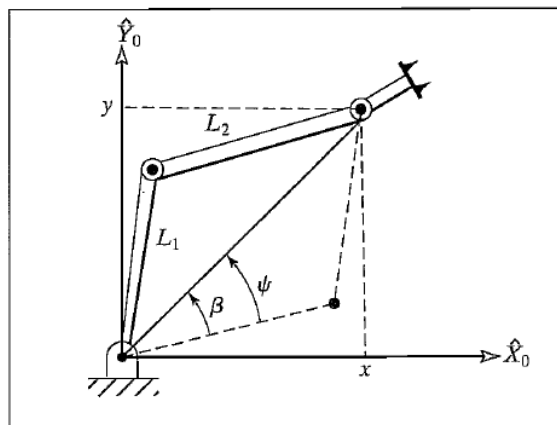
Existem duas estratégias de solução: soluções por fórmulas analíticas e soluções numéricas. Devido à interatividade, a forma numérica é geralmente muito lenta, não sendo uma solução interessante, apesar da sua generalidade (Craig, 2005).

Dentro da classe de solução analítica existem dois métodos de solução: algébrico e o geométrico. Segundo Craig (2015), existe uma condição para que um manipulador com seis juntas rotacionais tenha solução analítica. A condição é de que os três eixos das juntas vizinhas interceptem em um único ponto. Essa solução é mais rápida em comparação com as soluções numéricas, mas dependem do modelo do manipulador.

### 3.3.5 Solução geométrica

Na abordagem geométrica decompõe-se a geometria espacial do manipulador em diversos planos geométricos e resolve cada um deles. De acordo com Craig (2015), para o braço planar de três degraus de liberdade (Figura 6) pode-se encontrar a solução da maneira descrita a seguir.

**Figura 6 - Plano de geometria associado ao robô planar de três links**



Fonte: Craig, 2005

Utilizando a “lei dos cossenos” para os triângulos na imagem, obtém-se a Equação 4:

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(180 + \theta_2). \quad (4)$$

Sabe-se que  $\cos(180 + \theta_2) = -\cos(\theta_2)$ , então tem-se a Equação 5:

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}. \quad (5)$$

Para que o triângulo exista, a distância da origem ao ponto  $(x, y)$  deve ser menor ou igual à soma do comprimento dos links  $L_1 + L_2$ . Uma outra solução possível, representado pela linha pontilhada, é  $\theta_2' = -\theta_2$ .

Para encontrar  $\theta_1$ , primeiro encontra-se as expressões para os ângulos  $\beta$  e  $\Psi$ , por meio das Equações 6 e 7, respectivamente.

$$\beta = \text{Atan2}(y, x). \quad (6)$$

Aplicando a lei dos cossenos para encontrar  $\Psi$ .

$$\cos \psi = \frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (7)$$

O arco-cosseno deve ser resolvido para  $0 \leq \psi \leq 180$  com a intenção de preservar a geometria. Tem-se a Equação 8:

$$\theta_1 = \beta \pm \psi, \quad (8)$$

Onde é usado sinal positivo para  $\theta_2 < 0$ , e negativo para  $\theta_2 > 0$ .

Sabe-se que a soma dos três ângulos deve ser igual à orientação do último link, como apresentado na Equação 9:

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \phi. \quad (9)$$

Através dessa equação encontra-se  $\theta_3$ . Vale lembrar que no método geométrico várias considerações devem ser realizadas para preservar a geometria.

### 3.3.6 Solução algébrica

A solução algébrica segue inicialmente a método desenvolvido na seção de Cinemática Direta para se obter a matriz de transformação do plano da ferramenta em relação ao da base, como apresentado na Equação 10.

$${}^1_6T = {}^1_3T {}^3_6T = \begin{bmatrix} {}^1r_{11} & {}^1r_{12} & {}^1r_{13} & {}^1p_x \\ {}^1r_{21} & {}^1r_{22} & {}^1r_{23} & {}^1p_y \\ {}^1r_{31} & {}^1r_{32} & {}^1r_{33} & {}^1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

Onde as coordenadas espaciais  $p_x$ ,  $p_y$  e  $p_z$  são equações encontradas em função dos ângulos. Resolvendo esse sistema de equações transcendentais, encontra-se os ângulos das juntas do manipulador robótico em qualquer quadrante do plano, diferentemente do método geométrico.

O método algébrico foi o método utilizado no presente trabalho para um manipulador com cinco graus de liberdade. O passo-a-passo da sua resolução pode ser encontrado na Seção 4.1.3.1.

## 3.4 Feedback de Forças

Os robôs da primeira geração foram concebidos como dispositivos de posicionamento com "circuito aberto"; ou seja, operavam com pouco ou nenhum feedback de todo o processo em que participavam. Para ambientes de montagem industrial, isso implica que todas as peças ou subconjuntos devem ser preposicionados com uma alta precisão, o que requer equipamentos periféricos caros e bastante inflexíveis. Fornecer robôs com capacidade de detecção pode reduzir consideravelmente esses requisitos de precisão. Em particular, para a montagem industrial, o feedback da força é extremamente útil. Mas também para outras tarefas, em que uma ferramenta mantida pelo robô tem que fazer contato controlado com uma peça de trabalho, como na rebarbação, polimento ou limpeza, também não é uma boa ideia confiar totalmente na precisão de posicionamento de um robô e, portanto, o feedback de força ou controle de força torna-se obrigatório, Levine (1995).

De acordo com Prats, Pobil e Sanz (2006), quando um robô está em contato com o ambiente, mesmo um pequeno erro de posicionamento pode implicar em danos a estrutura do robô ou dos objetos que o mesmo manipula. Na ausência de um feedback de força, forças de contato geradas pelo manipulador, ou robô, durante a interação com o ambiente não podem ser medidas. Isso implica que, para que haja sucesso na realização da tarefa do robô, é necessário um plano de trajetória precisamente elaborado, baseado no ambiente de trabalho do robô, além de um conhecimento prévio sobre esse ambiente no qual será colocado.

Levine (1995) classifica o feedback de força como em duas categorias:

- Feedback de força passivo: A trajetória da pinça (ou dedos) do robô é modificada pelas forças de interação devido à conformidade inerente do robô. No feedback de força passivo, não há medição de força real, e a trajetória pré-programada da pinça do robô nunca é alterada no tempo de execução.
- Feedback de força ativo, as forças de interação são medidas, retornadas ao controlador e usadas para modificar, ou mesmo gerar on-line, a trajetória desejada da pinça do robô.

Para se obter uma estabilidade, várias arquiteturas de controle e de feedback de força foram desenvolvidas, desde o surgimento dos manipuladores, tais como o controle de posição-força (em que o controle de posição permanece no lado do Master e o controle de força no lado do Slave), controle força-posição, controle posição-posição e controle força-força.

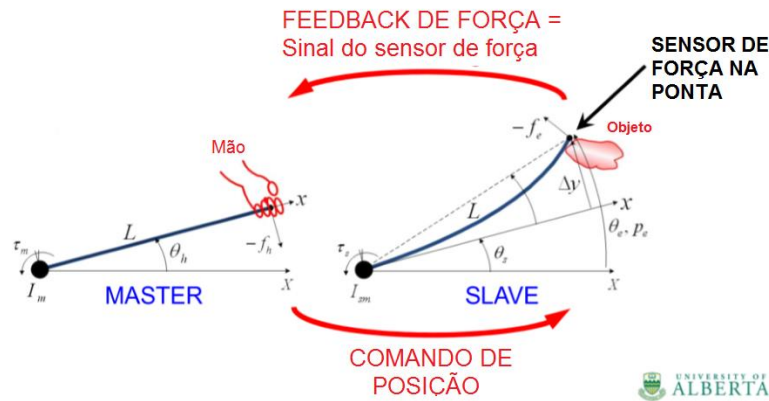
Quando se tratando de um sistema Slave rígido, é mais interessante ter o Slave sob o controle de posição, de tal forma que apenas as arquiteturas de controle dos tipos força-posição (também chamado Reflexão Direta da Força, do inglês Direct Force Reflection DFR) e posição-posição (também chamado Posição Baseada no Erro, do inglês Position Error Based) podem ser consideradas para este trabalho.

A arquitetura do tipo Reflexão Direta da Força possui as seguintes características de funcionamento:

- O Slave segue a posição do Master
- Um sensor de força fornece o feedback
- Um método mais caro e mais frágil devido ao sensor de força
- Possui boa eficiência

A Figura 7 apresenta o esquema de funcionamento da arquitetura de controle Reflexão Direta da Força.

**Figura 7 - Arquitetura Reflexão Direta da Força**



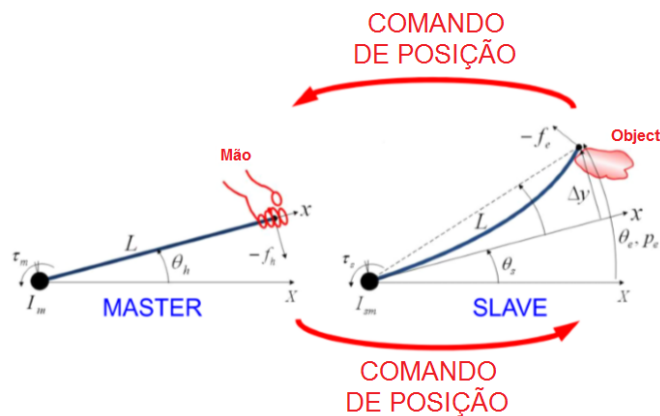
Fonte: University of Alberta (adaptado)

A arquitetura do tipo Posição Baseada no Erro possui as seguintes características de funcionamento:

- Não faz uso de sensores de força
- O Slave segue a posição do master e vice-versa
- Feedback de força é fornecido simplesmente pelo fato do Master seguir a posição do Slave.
- Baixa eficiência

A Figura 8 apresenta o esquema de funcionamento da arquitetura de controle Posição Baseada no Erro:

**Figura 8 - Arquitetura Posição Baseada no Erro**



Fonte: University of Alberta (adaptado).



### 3.5 Sensores

Sensores são dispositivos sensíveis a uma grandeza física de qualquer espécie (que pode ser térmica, luminosa, cinética, mecânica, etc.), bem como a variação dessa grandeza, e, com o auxílio dos transdutores, convertê-la em outra. De acordo com Patsko (2006), dentro da eletrônica, um sensor é qualquer componente ou circuito eletrônico que permita a análise de uma determinada condição do ambiente, podendo ela ser algo simples como a temperatura ou luminosidade; uma medida mais complexa como a rotação de um motor ou a distância de um carro até algum obstáculo próximo.

Os sensores tornaram-se muito importantes na indústria, dada a grande necessidade que os processos automatizados têm, de obter dados sobre eventos que podem ocorrer durante o processo. O desenvolvimento de sensores e a sua aplicação trouxe como consequência inúmeras vantagens e comodidades para a vida moderna. Apesar de ser imensa a variedade de sensores eletrônicos, eles podem ser divididos basicamente em dois tipos: sensores analógicos e sensores digitais (MENDES E FILHO, 2013).

Thomazini (2005) classifica sensores analógicos como um tipo de sensor que pode assumir qualquer valor no seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro da sua faixa de operação. Algumas das grandezas físicas que podem assumir qualquer valor ao longo do tempo são: pressão, temperatura, velocidade, umidade, vazão, força, ângulo, distância, torque, luminosidade. Essas variáveis são mensuradas por elementos sensíveis com circuitos eletrônicos não digitais.

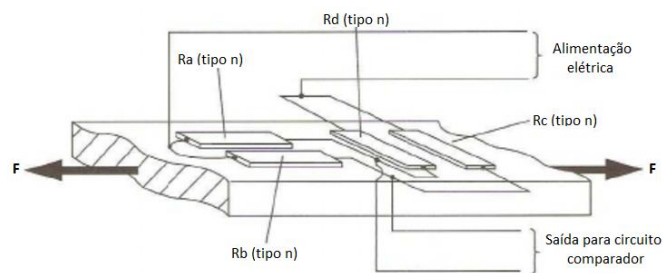
Quanto aos sensores digitais, Thomazini (2005) classifica-os como um tipo de sensor que pode assumir apenas dois valores no seu sinal de saída ao longo do tempo, que podem ser interpretados como zero ou um. Não existem naturalmente grandezas físicas que assumam esses valores, mas eles são assim mostrados ao sistema de controle após serem convertidos pelo circuito eletrônico do transdutor. É utilizado, por exemplo, em detecção de passagem de objetos, encoders na determinação de distância ou velocidade, etc.

### 3.5.1 Sensor de Força

Os sensores de pressão são dispositivos destinados a reagirem quando submetidos a ação de uma carga que promova sua deformação. São estruturas mecânicas, planejadas para trabalharem dentro do seu regime elástico e que geram um sinal de saída linear e compatível com a carga que provoca a deformação.

Thomazini (2005) explica que o princípio de funcionamento das células de carga é baseado na variação da resistência ôhmica de um extensômetro, decorrente do estreitamento da seção transversal do extensômetro quando submetido a uma deformação, isto é, a célula de carga mede a deformação da peça a ser medida pela sua própria deformação e traduz em variação de resistência ôhmica. A Figura 9 mostra o esquema construtivo de um extensômetro.

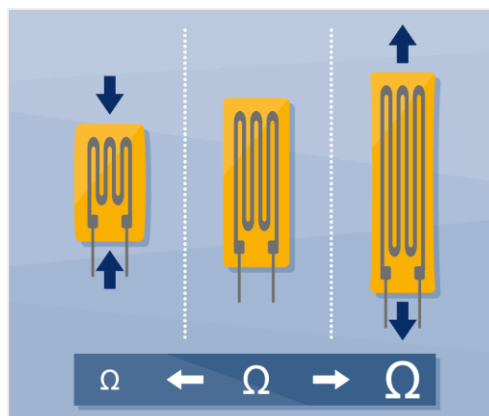
**Figura 9 - Detalhes construtivos de um extensômetro**



**Fonte: (Thomazini, 2005)**

O extensômetro é formado por um fio muito fino ou, mais comumente, por folhas metálicas dispostas em um padrão de grade. O padrão de grade serve para a maximização de fios. A grade é fixada a um suporte fino, denominado base, que é diretamente fixada ao corpo de prova. Em consequência, a deformação sofrida pelo corpo de prova é transferida ao extensômetro, o qual responde com uma variação linear de sua resistência elétrica (Ramos, 2016). A Figura 10 apresenta o princípio de funcionamento do extensômetro.

**Figura 10 - Princípio de funcionamento de um extensômetro**



Fonte: (HBM, s.d.)

O extensômetro pode ser aplicado para obter-se a deformação de diversas estruturas mecânicas quando submetidas a um carregamento, ou a outra grandeza física que promova a deformação, tais como: pontes, máquinas, locomotivas, navios e quando associados a transdutor, possibilita a medição de pressão, tensão, força, aceleração e outros instrumentos de medida que são usados em campos que vão desde a análise experimental de tensão até a investigação e práticas médicas e cirúrgicas.

### **3.5.2 Sensores Óticos de Flexão**

Segundo Halliday (2009), a ótica geométrica é o tratamento aproximado da luz no qual as ondas luminosas são representadas como raios que se propagam em linha reta, e para o estudo convencional da ótica, incluindo reflexão, refração e assuntos afins, utiliza-se a ótica geométrica.

Os sensores óticos são componentes eletrônicos que reagem a exposição a luminosidade. Quando exposto a luz, o sensor junto ao transdutor gera um sinal de saída que pode ser computado e utilizado para o controle de um sistema. De acordo com Thomazini (2005), o princípio de funcionamento do sensor ótico baseia-se na existência de um emissor e de um receptor. A luz gerada pelo emissor deve atingir o receptor com intensidade suficiente para fazer com que o sensor comute sua saída.

Segundo Sensorwiki (2011), sensores de flexão, também chamados de sensores bend, medem a quantidade de deflexão causada ao se dobrar o sensor. Existem diversas maneiras de se identificar a deflexão, desde o uso de extensômetros

ao uso de sensores Hall-Effect. No entanto, os três mais comuns, como apresentado na Figura 11, são:

- Sensores a base de tinta condutiva
- Sensores de fibra ótica
- Sensores a base de polímeros

**Figura 11 - Sensores flex mais comuns**



**Fonte: (Sensorwiki, 2011)**

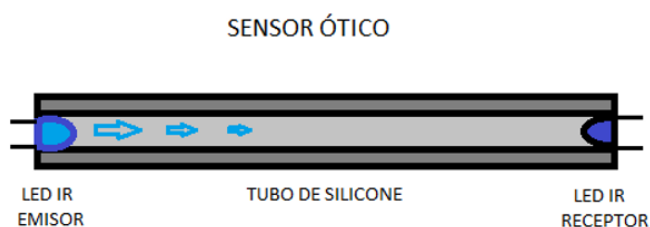
Uma propriedade que se destaca nos sensores de dobra é que ao dobrar o sensor em um único ponto em um determinado ângulo não é muito efetivo. Assim como dobrar o sensor em um ponto em mais de 90° pode danificar o sensor de forma permanente. A situação ideal ocorre quando o sensor é dobrado em torno de um raio de curvatura. Quanto menor o raio de curvatura, maior parte do corpo do sensor estará envolvido na deflexão, sendo assim maior será a resistência.

Um sensor de flexão comum apresenta as seguintes especificações (Sensorwiki, 2011):

- Faixa de deflexão: Refere-se ao ângulo máximo de deflexão que pode ser medido pelo sensor.
- Detecção uni ou bi-direcional: alguns sensores aumentam a resistência quando dobrados em quaisquer duas direções que sejam opostas. No entanto, não há diferença na medida em relação a direção.
- Detecção uni ou bipolar: Um sensor de deflexão bipolar mede a deflexão em duas direções opostas gerando duas medidas.
- Faixa de resistência: Sensores de flexão podem variar amplamente em termos das suas faixas de resistência, medida como sendo a diferença entre a resistência nominal e a resistência a uma deformação completa.

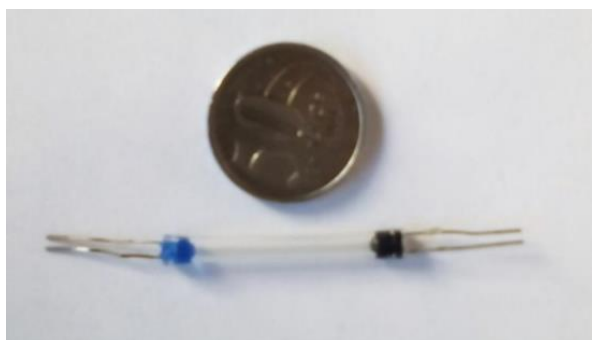
Em 2015, um grupo de estudantes desenvolveu um sensor ótico de baixo custo capaz de identificar a flexão e/ou aplicação de força sobre um material, baseado nas teorias de ótica e na hipótese de que quando o tubo estivesse alinhado, toda luz do LED emissor incidiria sobre o fototransistor, e este forneceria um alto valor de tensão. O sensor é formado por um diodo emissor de luz infravermelho (LED-IR) e um fototransistor infravermelho, fixados nas extremidades de um tubo vazado de silicone. À medida que se criasse uma curvatura no tubo, a luz deixaria de incidir diretamente e, consequentemente, a tensão diminuiria. Uma parte dessa luz sofreria uma mudança de meio, saindo do tubo, outra parte seria absorvida, ou seja, uma parte sofreria reflexão difusa e uma outra sofreria reflexão especular. Parte da luz refletida pela parede do tubo incidiria sobre o receptor, e quanto maior for a curvatura, menor a intensidade de luz recebida (GONÇALVES et al., 2016). Baseando-se na teoria apresentada, foi criado um sensor com o esquema representado na Figura 12, cujo a foto pode ser vista na Figura 13.

**Figura 12 - Esquema do sensor ótico desenvolvido**



Fonte: (Gonçalves et al, 2016))

**Figura 13 - Montagem do sensor ótico desenvolvido**



Fonte: (Gonçalves et al, 2016)

### 3.6 Servomotor

Segundo Pictronics (2010), o Servomotor, ilustrado pela Figura 14, é uma máquina eletromecânica, que apresenta a posição angular do seu eixo proporcional a um sinal de entrada. Diferentemente da maioria dos motores, como os de corrente contínua ou corrente alternada, que giram livremente sem um controle mais efetivo de posição, Servomotores são dispositivos em malha fechada, ou seja, recebem um sinal de controle, verificam a posição atual do eixo através de um sensor, e atuam no sistema girando o seu eixo para a posição desejada. Geralmente este tipo de motor possui liberdade de giro de 180°, porém há aqueles que giram 360°.

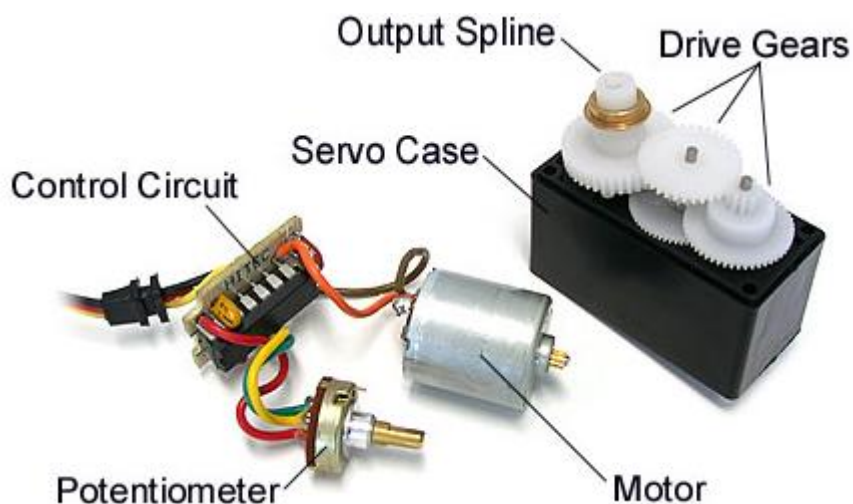
Três conjuntos básicos constituem o servomotor. São eles o sensor, o circuito de controle e o atuador. O sensor normalmente é um potenciômetro que é acoplado ao eixo do servo. A variação de sua resistência é relacionada ao valor da posição angular que se encontra o eixo. Logo, a precisão, vida útil e estabilidade do servomotor dependem da qualidade deste potenciômetro. O circuito de controle é formado por componentes eletrônicos discretos ou circuitos integrados, e geralmente é composto por um oscilador e um controlador PID (proporcional, integrativo e derivativo) que recebe o sinal do sensor (posição do eixo) e o sinal de controle (PWM), retira um valor de erro na comparação destes dois sinais, e aciona o motor no sentido necessário para que o eixo vá para a posição desejada (sinal de controle). O sistema atuador é constituído por um motor elétrico, geralmente um motor de corrente contínua, porém podem ser utilizados motores de corrente alternada. Acoplado ao motor está presente um conjunto de engrenagens, que forma uma caixa de redução, que tem o objetivo de amplificar o torque de saída. Os conjuntos estão ilustrados na Figura 15.

**Figura 14 - Servomotor**



Fonte: Wikipedia, 2015

**Figura 15 - Constituintes do servo motor**



Fonte: Pictronics, 2010

### **3.7 Microcontrolador**

De acordo com Souza (2005), o microcontrolador é definido como um pequeno componente eletrônico dotado de uma inteligência programável, utilizado no controle de processos lógicos, e diz que “em uma única pastilha de silício encapsulada, existem todos os componentes necessários ao controle de um processo”. Assim, o microcontrolador está provido internamente de memória de programa, memória de dados, portas de entradas, saída paralela, timers, contadores, comunicação serial, conversores analógicos-digitais, PWM, entre outros.

Através da programação em uma linguagem específica, em um dispositivo que permite a comunicação serial com o microprocessador, como é o caso do computador, é possível programar o microcontrolador, a fim de que ele empenhe uma determinada função ou realize algum processo. A Figura 16 mostra um microcontrolador da fabricante Microchip.

**Figura 16 - Microcontrolador**

**Fonte: MICROCHIP, 2012.**

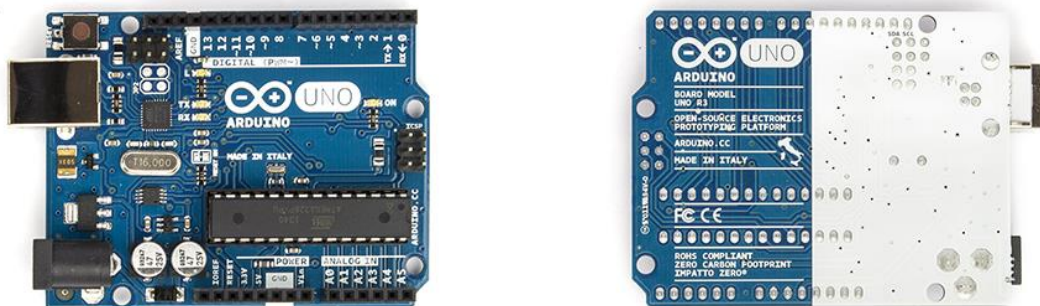
Segundo Martins (2005) os microcontroladores estão presentes em quase tudo o que envolve eletrônica, diminuindo o tamanho, facilitando a manutenção e gerenciando tarefas internas de aparelhos eletrônicos, contribuindo para inovações tecnológicas.

Os microcontroladores mais comuns em projetos acadêmicos, hoje, são Freescale 68HC08, Microchip PIC da família 16F ou 18F e Atmel família ATmega.

Entretanto, existe no mercado uma placa de prototipagem bastante difundida, o Arduino. A montagem mais simples e barata desta placa é o Arduino uno (Figura 17), que utiliza o microcontrolador ATmega328, com processamento de 16 MHz. A placa possui 6 entradas analógicas, 14 pinos de entrada/saída digitais, dos quais 6 podem ser saídas do tipo PWM. A montagem de um projeto utilizando esta placa é bastante facilitada, pois, ela é bastante flexível, acessível, e de baixo custo. Permite uma fácil programação, com linguagem muito próxima a linguagem C.



Figura 17 - Arduino Uno



Fonte: ARDUINO, 2015

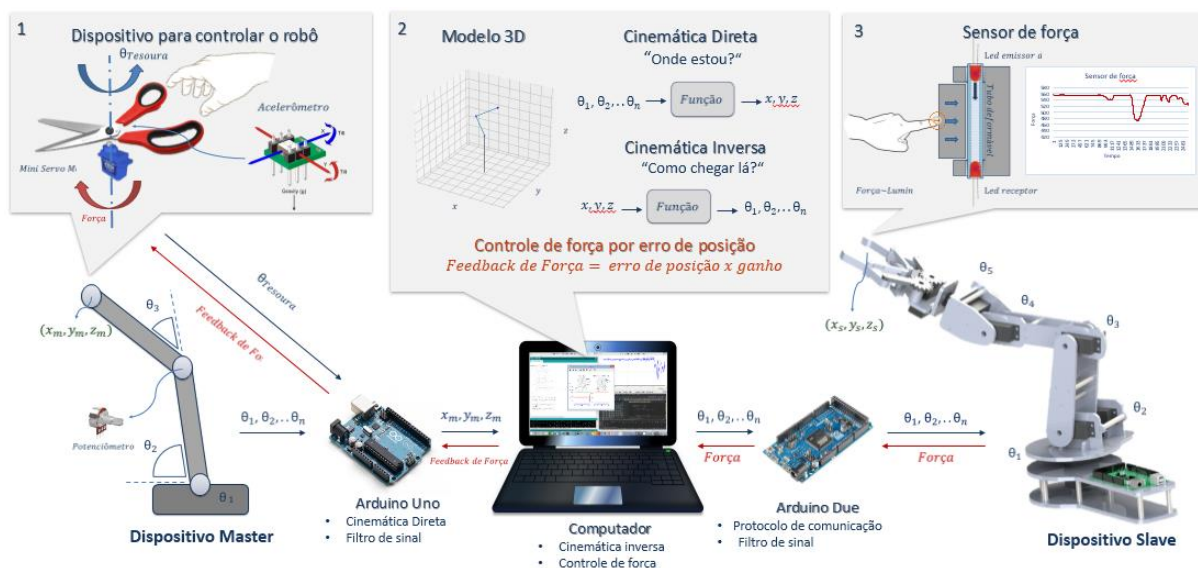


## 5 METODOLOGIA

O projeto consiste no controle de posição de um manipulador robótico construído no trabalho de robótica, e criação de sensação de força sobre as mãos do usuário, explorando conceitos de cinemática direta, inversa e sensação de força pelo método de Reflexão Direta da Força (DFR), implementados em linguagem de programação Python e Arduino. O usuário deverá ser capaz de programar rotinas a serem executadas pelo robô, sentir a dureza dos objetos a serem manipulados e controlar a força realizada pela garra.

Para facilitar a identificação dos elementos e dispositivos presentes no projeto, eles foram agrupados em “Master” e “Slave”, seguindo a mesma terminologia utilizada por Tavakoli et al. (2006). O Master se refere aos dispositivos que interagem diretamente com usuário, responsáveis pelo controle, como o sistema de hastes “PIG” e o dispositivo para feedback de força. Por outro lado, o Slave se refere ao sensor de força e ao braço robótico, cuja função é realizar o comando enviado pelo Master. O funcionamento do sistema é esquematizado na Figura 20.

**Figura 18 - Diagrama do funcionamento do sistema**



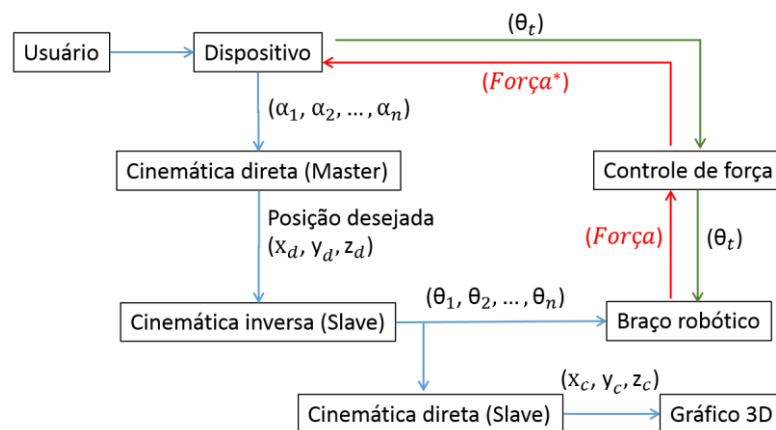
**Fonte: Elaborado pelos autores**

Ainda, para facilitar compreensão, o projeto foi dividido em duas partes: Controle de posição e sensação de força. Simplificadamente eles funcionam da seguinte maneira.

No controle de posição, o Master, constituído de um sistema de hastes com potenciômetros em suas articulações, nomeada de PIG, juntamente com um acelerômetro/giroscópio, gera informações dos ângulos  $\theta_1^m, \theta_2^m, \theta_3^m, \theta_4^m$  e  $\theta_5^m$  que são transformados em coordenadas espaciais  $x_m, y_m$  e  $z_m$  pela cinemática direta. A ideia é de que o manipulador robótico siga as mesmas coordenadas espaciais do Master. No computador, o programa escrito em Python recebe essas coordenadas transmitidas pelo Arduino Uno pela comunicação Serial e, então, realiza a cinemática inversa, obtendo os valores dos ângulos  $\theta_1^s, \theta_2^s, \theta_3^s, \theta_4^s$  e  $\theta_5^s$  que são enviados para cada um dos 5 servomotores do manipulador robótico (Slave). Esses são os ângulos responsáveis por fazer com que a posição espacial da garra do robô seja a posição desejada. Em outras palavras, as coordenadas do efetuador do Slave  $x_s, y_s$  e  $z_s$  em relação à sua base são iguais (ou proporcionais) às coordenadas do Mestre  $x_m, y_m$  e  $z_m$  em relação à base deste.

Na criação da sensação de força, o sensor de força posicionado na ponta da garra do manipulador “sente” a força realizada para manipular objetos e, através da comunicação serial, o arduino Due envia esse sinal ao Python. Após a resolução da equação de sensação de força pelo método de Reflexão Direta da Força (DFR), um ângulo de controle é gerado e enviado ao servomotor no dispositivo de feedback de força (Master). Dessa forma, o usuário deverá ser capaz de sentir uma força atuando em suas mãos, proporcional à força atuante na garra do manipulador quando este segura algum objeto. O esquema da Figura 19 mostra o funcionamento da cinemática inversa, direta e sensação de força implementado no trabalho.

**Figura 19 - Fluxograma das cinemáticas e sensação de força**



Fonte: Elaborado pelos autores

As próximas seções explicam em maior nível de detalhe itens como a construção, calibração, gráficos obtidos, equações desenvolvidas, entre outros. As seções foram divididas em:

- Controle de posição para Master e Slave.
- Sensação de força para Master e Slave.

#### **4.1 Controle de Posição**

As próximas subseções tratam com detalhe o controle de posição realizado, no que se refere a quem realiza o controle (Master) e a quem executa (Slave).

##### **4.1.1 Master**

Foi desenvolvido um dispositivo para controle de posição pelo usuário. Duas abordagens foram realizadas, uma utilizando o acelerômetro e outra um sistema de hastes com potenciômetros.

###### **4.1.1.1 Acelerômetro**

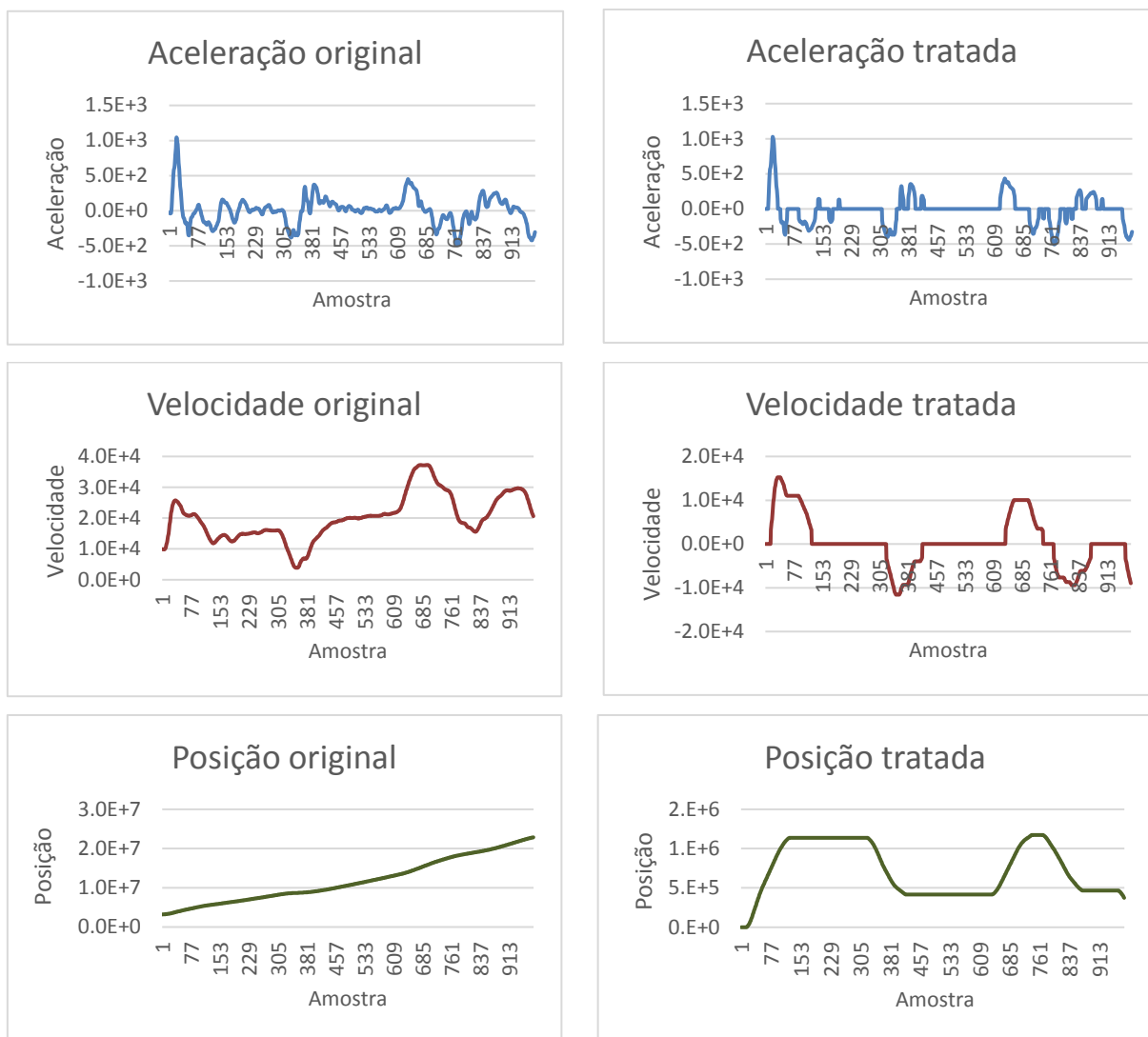
O acelerômetro é um sistema micro eletromecânico (MEMS) que obtém o sinal de aceleração nas componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Integrando as componentes de aceleração, obtêm-se velocidade, e integrando novamente obtêm-se posição. Esta foi a primeira abordagem feita no projeto.

O acelerômetro utilizado foi o MPU-6050. Este e outros em geral apresentam muito ruído e baixa precisão, o que dificulta a obtenção da posição pela aceleração. Isso porque a integração do ruído gera um sinal de velocidade errôneo. Por exemplo, foram realizados testes no qual o acelerômetro, inicialmente parado, se movimenta por um determinado tempo, parando novamente em seguida. É esperado que a velocidade saia de zero e retorne a zero no final do movimento do acelerômetro. No entanto, pela imprecisão e erro do sinal, a velocidade obtida pela integração da aceleração não retorna a zero, gerando um offset de velocidade, que se acumula a cada movimento. A integração de um sinal como esse faz a posição divergir ao “infinito”, ou seja, um sinal totalmente instável.

Para estabilizar o sinal, e fazer o controle de posição por acelerômetro, foram utilizadas diversas técnicas para tratar o sinal.

- 1) Aplicação de um filtro digital passa baixa de primeira ordem (RC) com frequência de corte de 0.5 Hz no sinal de aceleração para redução de ruído.
- 2) Eliminação de pequenas acelerações dentro da faixa de -30 a 30 do sinal recebido pelo Arduino.
- 3) Aplicação de um filtro digital passa alta de primeira ordem (RC) com frequência de corte de 0.012 Hz para remover o offset do sinal da aceleração.
- 4) Integração do sinal de aceleração, obtendo-se velocidade.
- 5) Utilização de um filtro digital passa alta de primeira ordem (RC) com frequência de corte de 0.5 Hz no sinal de velocidade para remoção do offset.
- 6) Detecção de velocidade zero, fazendo a mesma zerar quanto for detectado a condição.
- 7) Compensação da histerese do sensor. Notou-se que sua resposta à aceleração e à desaceleração são diferentes. Então detecta-se o tipo e multiplica por um fator de 0.85 o sinal de desaceleração.
- 8) Eliminação de pequenas velocidades dentro da faixa delimitada de -200 a 200 do sinal.
- 9) Integração do sinal de velocidade para obter posição.

As técnicas utilizadas estabilizaram a posição, como se pode ver no Gráfico 1 que compara os sinais antes e depois de aplicar as técnicas apresentadas.

**Gráfico 1 - Sinal original x Sinal tratado**

**Fonte: Elaborado pelos autores**

Como se pode ver pelos gráficos, através das técnicas utilizadas foi possível estabilizar o sinal da posição.

No entanto, este procedimento responde apenas a movimentos bruscos de aceleração. Movimentos em baixas velocidades não são detectados satisfatoriamente pelo MPU-6050, pois este confunde-se com o sinal de ruído.

Ao que tudo indica, a utilização de um acelerômetro de maior precisão e baixo ruído fará possível a obtenção satisfatória da posição espacial, através do acelerômetro.

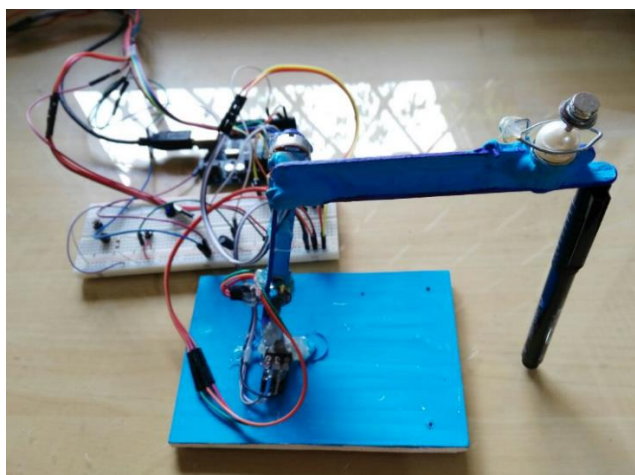
#### 4.1.1.2 Dispositivo PIG

Após a constatação da impossibilidade de utilizar o acelerômetro MPU-6050 para se obter coordenadas espaciais para movimentos de baixa velocidade, partiu-se para uma nova solução. Com o objetivo de controlar a posição e orientação espacial do manipulador, foi construído um simples dispositivo constituído de duas hastes e três potenciômetros lineares acopladas ao eixo, denominado PIG, como mostrado na Figura 22. Os potenciômetros fornecem uma informação proporcional ao ângulo de abertura, que por uma simples calibração pode-se se obter o valor do ângulo associado. A partir da cinemática direta, encontraram-se as coordenadas espaciais da extremidade da estrutura. Essa estrutura é similar ao manipulador e, portanto, as suas equações também são similares, alterando apenas o valor do comprimento das hastes. O PIG foi utilizado para controlar os motores 1, 2 e 3 do manipulador robótico.

O dispositivo de *feedback* de força, constituído de uma tesoura e um servomotor, foi anexado na extremidade do sistema. Este dispositivo foi utilizado para realizar o *feedback* de força nos dedos do usuário, detalhado mais adiante na seção 4.2.1. Em adição, foi utilizado um acelerômetro/giroscópio preso ao mesmo, que foi responsável por fornecer o valor de inclinação da tesoura.

Os sinais de inclinação (“pitch” e “roll”) do acelerômetro foram utilizados para controlar diretamente os dois últimos motores, 4 e 5, do robô. A partir deste instante, a posição espacial e a orientação desejadas são conhecidas, e então são utilizadas nas equações de cinemática inversa para controle do manipulador.

**Figura 20 - Dispositivo PIG**



Fonte: Elaborado pelos autores



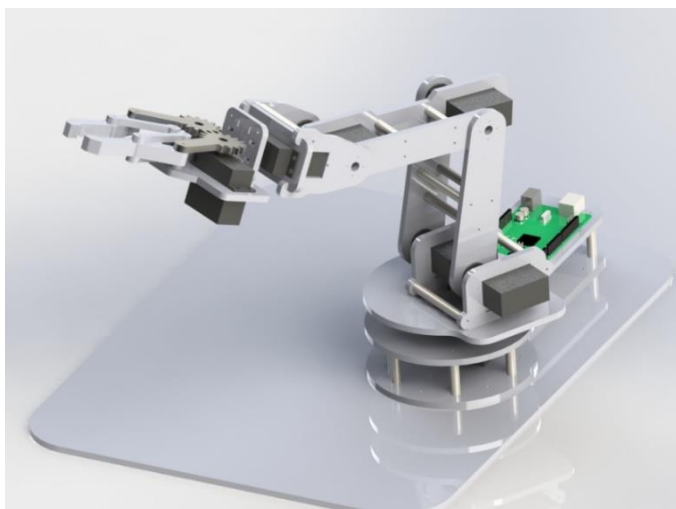
### 4.1.2 Slave

O Slave, no que se refere a controle de posição, é constituído pelo braço robótico.

#### 4.1.2.1 Braço Robótico

O braço robótico utilizado foi construído anteriormente em um projeto da disciplina de Robótica por um dos autores. O braço foi projetado para permitir uma movimentação com 5 graus de liberdade, utilizando para isso os servomotores MG945 da TowerPro, que permitem 180° de rotação. Cada motor possui uma malha de controle interna para sua posição angular, a qual controla-se através de um sinal PWM. Existe uma biblioteca no Arduino destinada ao controle de servomotores. O desenho dos componentes do braço e sua montagem foram modelados através do SolidWorks, como mostrado na Figura 23.

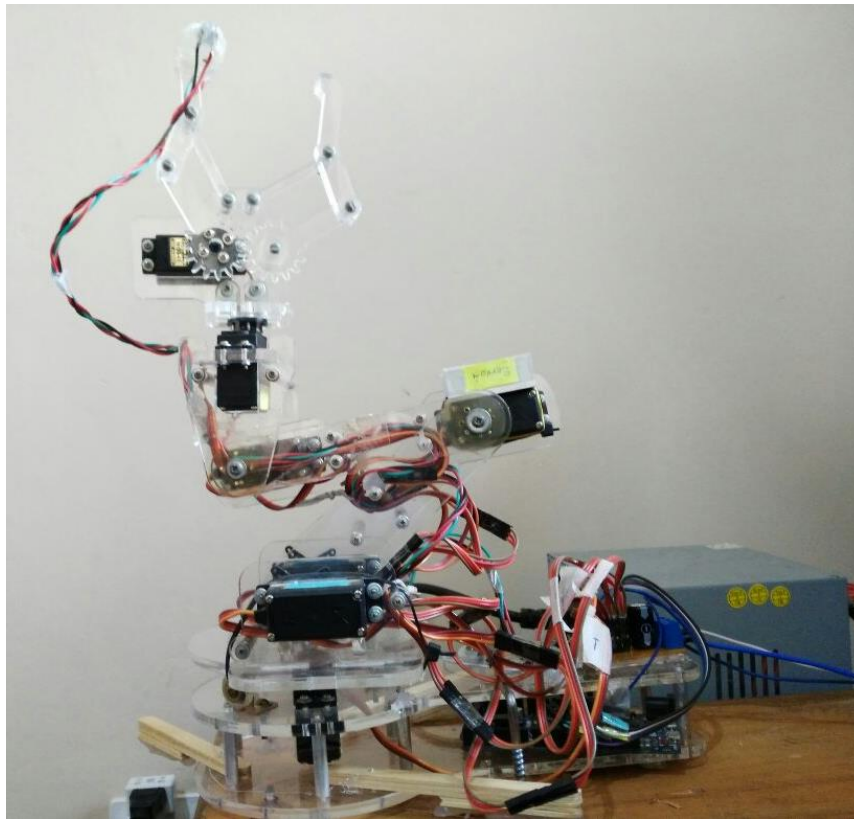
**Figura 21 - Braço Mecânico desenhado no Solid Works**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

Posteriormente, o desenho das peças foram enviadas para uma empresa especializada no corte a laser de acrílico, para confecção das mesmas.

De posse de todas as peças, foi montado o braço robótico, como pode ser visto na Figura 24.

**Figura 22 - Braço Mecânico**

**Fonte: Elaborado pelos autores**

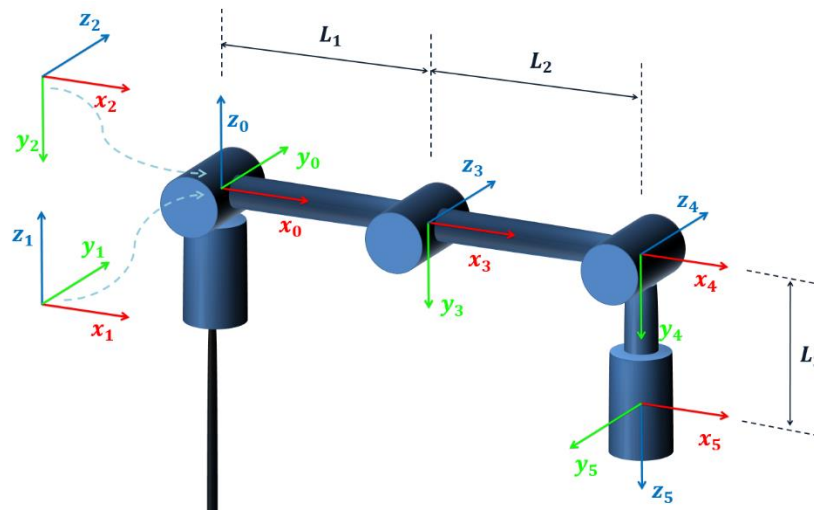
Os motores foram alimentados por uma fonte externa de computador, que possui uma capacidade de corrente de 21 Amperes a 5V.

### **4.1.3 Controle**

#### **4.1.3.1 Cinemática Direta e Inversa**

Para realização da cinemática direta e inversa foi necessário a criação de um modelo do manipulador robótico, cujo os eixos cartesianos ( $\{0\}$ ,  $\{1\}$ ,  $\{2\}$ ,  $\{3\}$ ,  $\{4\}$  e  $\{5\}$ ) foram fixados nas juntas, como mostrado na Figura **Figura 23**. Este robô possui no total 5 graus de liberdade.

**Figura 23 - Modelo Manipulador Robótico**



Fonte: Elaborado pelos autores

A partir da fixação dos eixos foram obtidos os parâmetros de Denavit-Hartenberg, mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg**

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	-90	0	0	$\theta_2$
3	0	$L_1$	0	$\theta_3$
4	0	$L_2$	0	$\theta_4$
5	-90	0	$L_3$	$\theta_5$

Fonte: Elaborado pelos autores

Sendo  $L_1 = L_2 = 104mm$  e  $L_3 = 208m$ .

Os cálculos de cinemática são, em geral, bastante complexos. Portanto, para simplificar estes cálculos, o link 3 foi considerado como tendo comprimento de 0 mm. Sendo assim, o eixo {5} coincide sobre o eixo {4}. Então, na realidade, as cinemáticas direta e inversa desenvolvidas nesta seção calculam a posição de {4} ao invés de {5}, mas, ao mesmo tempo, levando em consideração a rotação do eixo {5}. Os parâmetros foram usados para criar as matrizes de transformação, como mostradas nas Equações 11 a 29. Para simplificar a escrita foram utilizadas as notações:

- $S_1$  para  $\text{seno}(\theta_1)$ ;
- $C_1$  para  $\text{cosseno}(\theta_1)$ .

$$\begin{aligned}
{}^0T = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^1T = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_2 & -C_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^2T = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_1 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^3T = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & L_2 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^4T = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_3 \\ -S_5 & -C_5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{11}$$

A transformada  ${}^0T$  expressa a posição de {5} no plano {0}, dada por:

$${}^0T = {}^0T \cdot {}^1T \cdot {}^2T \cdot {}^3T \cdot {}^4T \cdot {}^5T \tag{12}$$

$${}^0T = \begin{bmatrix} a & e & i & m \\ b & f & j & n \\ c & g & k & o \\ d & h & l & p \end{bmatrix} \tag{13}$$

Onde:

$$a = (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot C_4 \cdot C_5 + (-C_1 \cdot C_2 \cdot S_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot C_3) \cdot S_4 \cdot C_5 + (-S_1 \cdot S_5) \tag{14}$$

$$b = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot C_4 \cdot C_5 + (-S_1 \cdot C_2 \cdot S_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot C_3) \cdot S_4 \cdot C_5 + (C_1 \cdot S_5) \tag{15}$$

$$c = (-S_2 \cdot C_3 - C_2 \cdot S_3) \cdot C_4 \cdot C_5 + (S_2 \cdot S_3 - C_2 \cdot C_3) \cdot S_4 \cdot C_5 \tag{16}$$

$$d = 0 \tag{17}$$

$$e = (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot -C_4 \cdot S_5 + (C_1 \cdot C_2 \cdot S_3 + C_1 \cdot S_2 \cdot C_3) \cdot S_4 \cdot S_5 + (S_1 \cdot C_5) \tag{18}$$

$$f = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot -C_4 \cdot S_5 + (S_1 \cdot C_2 \cdot S_3 + S_1 \cdot S_2 \cdot C_3) \cdot S_4 \cdot S_5 + (C_1 \cdot C_5) \tag{19}$$

$$g = (-S_2 \cdot C_3 - C_2 \cdot S_3) \cdot -C_4 \cdot S_5 + (S_2 \cdot S_3 - C_2 \cdot C_3) \cdot -S_4 \cdot S_5 \tag{20}$$

$$h = 0 \tag{21}$$

$$i = (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot -S_4 + (-C_1 \cdot C_2 \cdot S_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot C_3) \cdot C_4 \tag{22}$$

$$j = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot -S_4 + (-S_1 \cdot C_2 \cdot S_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot C_3) \cdot C_4 \tag{23}$$

$$k = (-S_2 \cdot C_3 - C_2 \cdot S_3) \cdot -S_4 + (S_2 \cdot S_3 - C_2 \cdot C_3) \cdot C_4 \tag{24}$$

$$l = 0 \tag{25}$$

$$m = (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \tag{26}$$

$$n = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + S_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \tag{27}$$

$$o = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + S_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \tag{28}$$

$$p = 1 \tag{29}$$

#### 4.1.3.2 Cinemática Direta

Pela teoria da cinemática direta, temos a Equação 30:

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Em que  $p_x$ ,  $p_y$  e  $p_z$  são posições espaciais do eixo {5} representado no eixo {0}.

Comparando as matrizes, tem-se as Equações 31 a 33:

$$p_x = m = (C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - C_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \quad (31)$$

$$p_y = n = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + S_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \quad (32)$$

$$p_z = o = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + S_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \quad (33)$$

Dado os ângulos entres as hastes do manipulador, pode-se obter as coordenadas espaciais do efetuador utilizando as equações desenvolvidas.

#### 4.1.3.3 Cinemática Inversa

A cinemática inversa é uma ferramenta para calcular os ângulos entre as hastes de um objeto articulado em função da sua coordenada espacial. Isso pode ser feito manipulando as Equações 31, 32 e 33. Nota se que a solução não é trivial, pois as equações envolvem senos e cosenos, portanto fez-se uso de transformacoes trigonometricas e redução polinomial, assim como descritas por Craig (2015).

Resolvendo o sistema de equações para obter os ângulos, tem-se a Equação 34:

$$p_x = C_1 \cdot (C_2 \cdot C_3 - S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \quad (34)$$

Usando relação trigonométrica:  $\cos(A + B) = \cos(A) \cdot \cos(B) - \sin(A) \cdot \sin(B)$ , pode-se encontrar as Equações 35 a 40.

$$p_x = C_1 \cdot (C_{23}) \cdot L_2 + C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \quad (35)$$

$$p_x = C_1 \cdot (L_2 \cdot C_{23} + L_1 \cdot C_2) \quad (36)$$

$$p_y = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + S_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \quad (37)$$

$$p_y = S_1 \cdot (L_2 \cdot C_{23} + L_1 \cdot C_2) \quad (38)$$

$$p_z = 0 = (S_1 \cdot C_2 \cdot C_3 - S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot L_2 + S_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \quad (39)$$

$$p_z = -L_2 \cdot C_{23} - L_1 \cdot S_2 \quad (40)$$

**Encontrando  $\theta_1$ :**

Dividindo as equações  $\frac{\text{equação 38}}{\text{equação 36}}$ , tem-se as Equações 41 a 46:

$$\frac{p_y}{p_x} = \frac{S_1 \cdot (L_2 \cdot C_{23} + L_1 \cdot C_2)}{C_1 \cdot (L_2 \cdot C_{23} + L_1 \cdot C_2)} \quad (41)$$

$$\frac{p_y}{p_x} = \tan_1 \quad (42)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{p_y}{p_x} \right) \quad (43)$$

Ao invés de  $\tan^{-1}$ , usou-se a função  $\text{atan2}$ , comum na robótica.

$$\theta_1 = \text{atan2}(p_y, p_x) \quad (44)$$

Existem dois valores possíveis para  $\theta_1$ :

$$\theta_1^1 = \text{atan2}(p_y, p_x) \quad (45)$$

$$\theta_1^2 = \theta_1^1 + \pi \quad (46)$$

**Encontrando  $\theta_3$ :**

Fazendo  $(\text{Equação 36})^2 + (\text{Equação 40})^2$ , tem-se:

$$\frac{p_x^2}{C_1^2} + p_z^2 = (L_3^2 \cdot C_{23}^2 + 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot C_2 \cdot C_{23} + L_2^2 \cdot C_2^2) + (L_3^2 \cdot C_{23}^2 + 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot S_2 \cdot S_{23} + L_2^2 \cdot S_2^2) \quad (47)$$

$$\frac{p_x^2}{C_1^2} + p_z^2 = L_3^2 + L_2^2 + 2 \cdot L_2 \cdot L_3 (C_2 \cdot C_{23} + S_2 \cdot S_{23}) \quad (48)$$

Utilizando as relações trigonométricas mostradas nas Equações 49 e 50, tem-se as Equações 51 a 53:

$$\cos(A + B) = \cos(A) \cdot \cos(B) - \sin(A) \cdot \sin(B) \quad (49)$$

$$\sin(A + B) = \sin(A) \cdot \cos(B) + \cos(A) \cdot \sin(B) \quad (50)$$

$$\frac{p_x^2}{C_1^2} + p_z^2 = L_3^2 + L_2^2 + 2 \cdot L_2 \cdot L_3 (C_2^2 \cdot C_3 - C_2 \cdot S_2 \cdot S_3 + S_2^2 \cdot C_3 + C_2 \cdot S_2 \cdot S_3) \quad (51)$$

$$\frac{p_x^2}{C_1^2} + p_z^2 = L_3^2 + L_2^2 + 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot C_3 \quad (52)$$

$$C_3 = \left( \frac{p_x^2}{C_1^2} + p_z^2 - L_3^2 - L_2^2 \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot L_2 \cdot L_3} \quad (53)$$

O objetivo é uma solução no *workspace*, então, tem-se as Equações 54 e 55:

$$S_3 = \pm \sqrt{1 - C_3^2} \quad (54)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(S_2, C_2) \quad (55)$$

Que resultam em 2 valores possíveis de  $\theta_3$ .

### Encontrando $\theta_2$ :

Usando as regras de redução polinomial, apresentada na Equações 56 a 58:

$$u = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (56)$$

$$\cos(\theta) = \left( \frac{1 - u^2}{1 + u^2} \right) \quad (57)$$

$$\text{sen}(\theta) = \left( \frac{2 \cdot u}{1 + u^2} \right) \quad (58)$$

Substituindo em equação 40, tem-se as Equações 59 a 61:

$$p_z = -L_2 \cdot C_{23} - L_1 \cdot S_2 \quad (59)$$

$$p_z = - \left[ \left( \frac{2 \cdot u \cdot C_3}{1 + u^2} \right) + \left( \frac{1 - u^2}{1 + u^2} \right) \cdot S_3 \right] \cdot L_2 - L_1 \cdot \left( \frac{2 \cdot u}{1 + u^2} \right) = \left( \frac{2 \cdot u}{1 + u^2} \right) \quad (60)$$

$$(-L_2 \cdot S_3 + p_z) \cdot u^2 + (2 \cdot C_3 \cdot L_2 + 2 \cdot L_1) \cdot u + (S_3 \cdot L_2 + p_z) = 0 \quad (61)$$

Resolvendo equação quadrática por fórmula de *Bhaskara*, tem-se as Equações 62 a 65.

$$\Delta = (2 \cdot C_3 \cdot L_2 + 2 \cdot L_1)^2 - 4 \cdot (-L_2 \cdot S_3 + p_z) \cdot (S_3 \cdot L_2 + p_z) \quad (62)$$

$$u = \frac{-(2 \cdot C_3 \cdot L_2 + 2 \cdot L_1) \pm \sqrt{\Delta}}{2 \cdot (-L_2 \cdot S_3 + p_z)} \quad (63)$$

$$\theta_2 = 2 \cdot \tan^{-1}(u) \quad (64)$$

$$\theta_2 = 2. \tan^{-1} \left( \frac{-(2. C_3. L_2 + 2. L_1) \pm \sqrt{\Delta}}{2. (-L_2. S_3 + p_z)} \right) \quad (65)$$

Somente há solução para a equação quando as coordenadas  $p_x, p_y$  e  $p_z$  estiverem dentro do campo de trabalho de manipulador (workspace). Como foi utilizado  $L_3 = 0$  para simplificação das fórmulas, o eixo {5} coincide sobre o eixo {4}. Portanto basta descobrir o workspace do ponto {4}, que pode ser calculado estendendo-se as hastes ao máximo e contraindo ao mínimo. O workspace será o espaço compreendido entre uma esfera de raio  $L1 - L2$  e  $L1 + L2$ .

Não devem ser utilizadas posições desejadas fora do campo de trabalho, uma vez que essa é uma posição impossível de ser atingida. Neste projeto, essa situação foi evitada fazendo o workspace do dispositivo PIG estar contido no workspace do eixo {4} do robô. Em outras palavras, o dispositivo de controle nunca irá gerar uma coordenada que não esteja dentro do campo de trabalho do manipulador.

#### 4.1.3.4 Escolha do conjunto de ângulos ideal

Através das equações obtidas, percebe-se que existem várias combinações de ângulos possíveis para uma mesma coordenada. Como existem 2 valores de ângulo para  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$ , foram encontradas no total 8 combinações. Portanto, é necessário selecionar o conjunto de ângulos ideal. Para tal, especificou-se que o braço deve dar preferência a movimentos mais curtos, portanto o ângulo a ser escolhido deve ser o mais próximo do ângulo anterior. Para isso, calculou-se o erro quadrático (equação 66) entre as 8 combinações e o grupo de ângulos anteriormente enviados, selecionando o conjunto de ângulo com o menor erro.

Cada motor do manipulador deve realizar diferentes torques pois a carga sobre os mesmos é diferente. Assim, é preferível que certos motores, como o da base por exemplo, realizem menor movimento do que outros. Para tal, utilizou-se um sistema de pesos no cálculo do erro quadrático, para cada motor, como sugere Craig (2015), pela Equação 66.

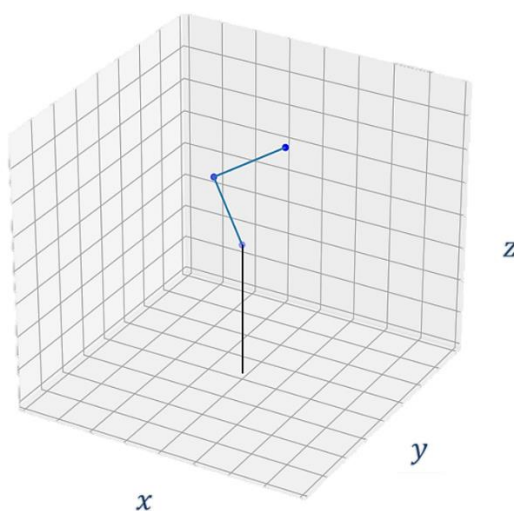
$$Erro(i) = peso_1. (\theta_1 - \theta_{1_{ant}})^2 + peso_2. (\theta_2 - \theta_{2_{ant}})^2 + peso_3. (\theta_3 - \theta_{3_{ant}})^2 \quad (66)$$



#### 4.1.3.5 Simulação

Um modelo 3D, como apresentado na Figura 24, com movimento em tempo real foi criado para verificar os ângulos provenientes da cinemática inversa. Para criação desse modelo utilizou-se as bibliotecas MathPlotLib e Animation do Python, destinadas a criação de gráficos e animações, respectivamente. Tendo os ângulos, foi necessário realizar novamente a cinemática direta para especificar cada vértice do modelo.

**Figura 24 - Modelo braço Robótico**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

Este modelo é extremamente útil, pois através do mesmo pôde-se verificar se as equações da cinemática inversa e direta estão de acordo com o esperado, antes mesmo de testá-la na montagem física do manipulador. Aplicar as equações diretamente sem saber se elas estão corretas poderia resultar em movimentos bruscos e danos ao robô.

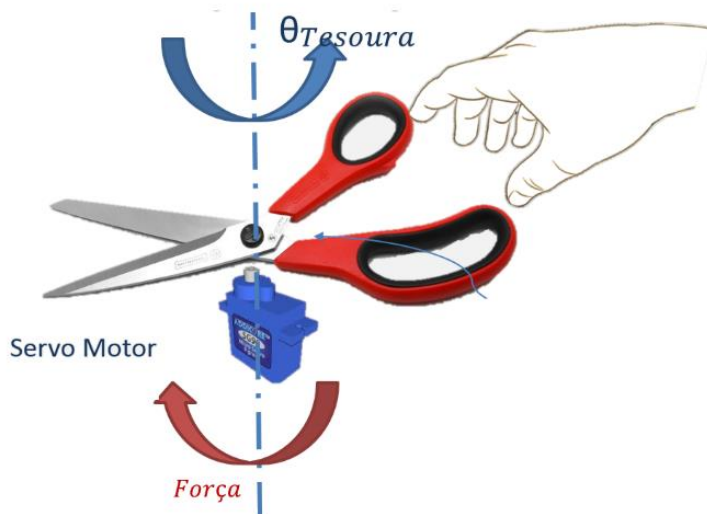
## 4.2 Sensação de Força

As próximas subseções tratam com detalhe a realização da sensação de força, referentes ao dispositivo de interação com o usuário (Master) e a garra do robô (Slave).

### 4.2.1 Mestre

Um dispositivo de feedback de força foi construído, para controle de ângulo da garra do manipulador e e geração da sensação de força sobre as mãos do usuário. Este dispositivo é constituído de um potenciômetro e um servo motor (TowerPro SG90), acoplado ao eixo de uma tesoura, como mostrado na Figura 27. Esses materiais foram utilizados devido ao baixo custo e fácil obtenção no mercado.

**Figura 25 - Esquema Montagem Dispositivo de Feedback de Força**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

O potenciômetro é responsável pelo controle unilateral, enquanto o servo motor é responsável pelo controle bilateral. O controle unilateral diz respeito ao fluxo de sinais e comandos indo em uma única direção, neste caso apenas o controle da abertura da garra. O controle bilateral se refere a sinais se dirigindo em duas direções, sendo este, o controle de posição da garra, bem como da força realizada sobre a tesoura.

O dispositivo construído realiza uma resistência contrária ao movimento dos dedos do usuário, criando uma sensação de força similar à que o usuário sentiria se estivesse segurando ou apertando um objeto com suas próprias mãos. Esse dispositivo de força foi acoplado ao dispositivo PIG para que ambos constituam um único sistema, podendo ser utilizados simultaneamente, ou seja, ao mesmo tempo em que o usuário controla a garra através da tesoura, o movimento espacial dela movimenta o dispositivo PIG. Uma foto do dispositivo de força pode ser vista na Figura 28.

**Figura 26 - Mecanismo de controle da garra e sensação força**



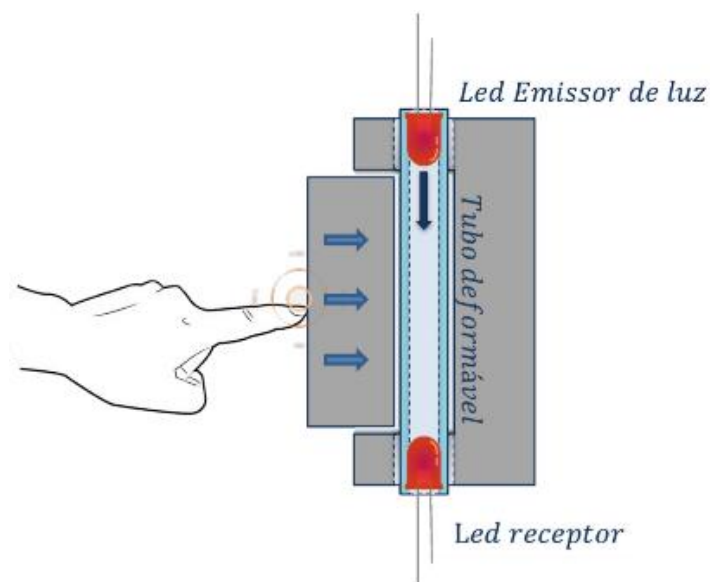
**Fonte: Elaborado pelos autores**

#### **4.2.2 Slave**

Quando uma força é realizada sobre um material, este sofre uma deformação, retornando à posição de equilíbrio após a retirada da carga (regime elástico). Baseando-se neste princípio, o sensor de flexão desenvolvido por Gonçalves *et al.* (2016) foi adaptado a uma nova configuração, funcionando da seguinte maneira: uma tensão realizada deforma o tubo de silicone, diminuindo proporcionalmente a luminosidade incidente do Led infravermelho emissor sobre o fototransistor, ambos posicionados nas extremidades, de acordo com a Figura 29. Em outras palavras, a

deformação mecânica “corta” a passagem de luz. O sensor criado possui um comprimento de 25 mm.

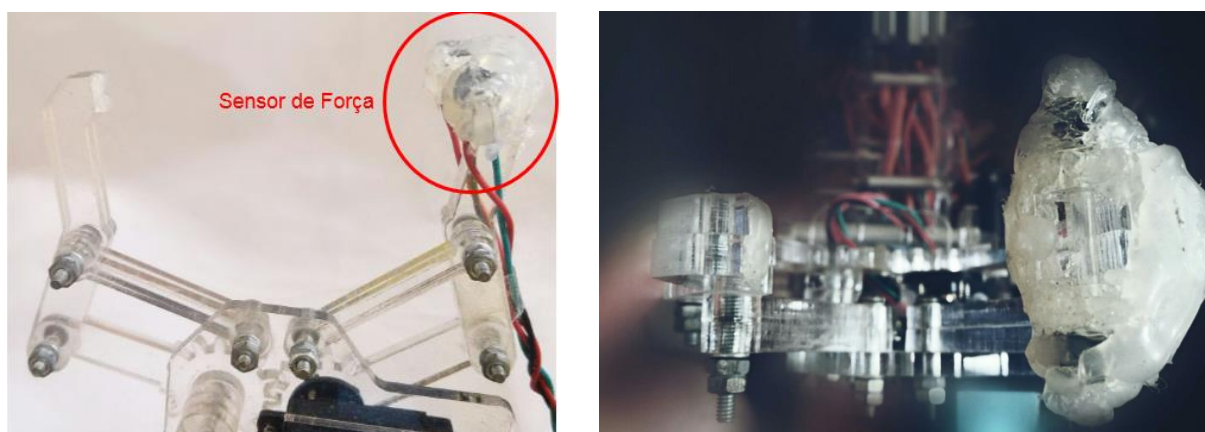
**Figura 27 - Sensor de Força**



Fonte: Elaborado pelos autores

O Sensor foi instalado em um dos lados da garra do manipulador, conforme mostrado na Figura 30.

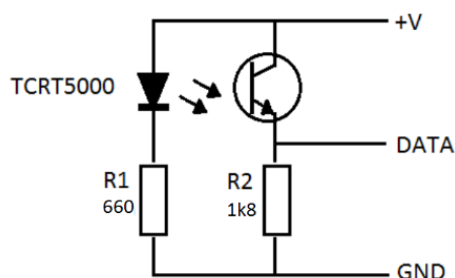
**Figura 28 - Sensor de Força**



Fonte: Elaborado pelos autores

O sensor óptico utilizado foi o TCRT 5000, do fabricante Vishay Semiconductors. Ele é constituído basicamente de um emissor (Led infravermelho) e um receptor (fototransistor). A Figura 31 mostra o circuito elétrico para acionamento deste sensor ótico.

**Figura 29 - Circuito elétrico para acionamento do Sensor**

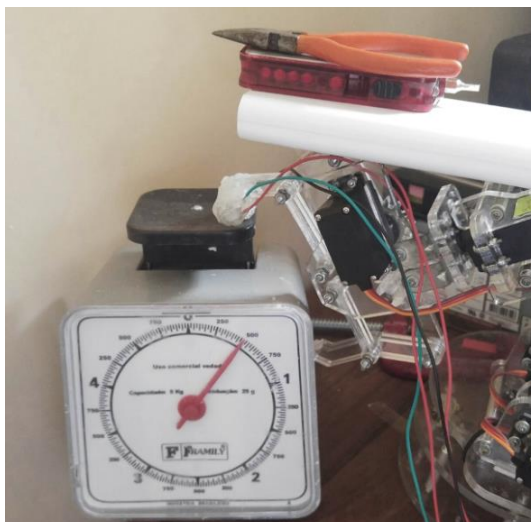


**Fonte: Elaborado pelos autores**

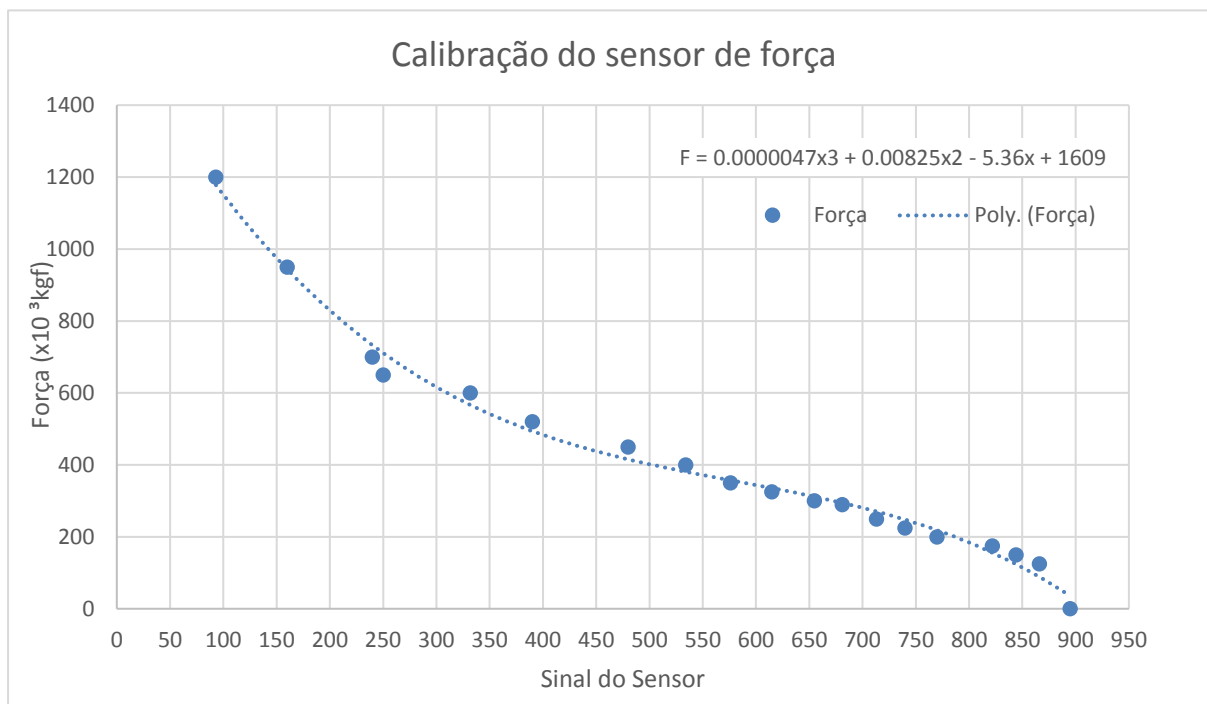
A intensidade luminosa incidente sobre o receptor gera um valor de tensão que varia de 0 a 5v. Este valor é convertido para a escala de 0 a 1023 do conversor digital de 10 bits do Arduino e posteriormente é transformado em unidade de força.

Para encontrar a força em (Kgf) foi necessário realizar uma calibração a partir do valor recebido pelo Arduino. O procedimento para calibração consistiu no posicionamento do sensor sobre uma balança, na posição vertical, como mostrado na Figura 32. Aos poucos foram adicionadas cargas e feitas as leituras do sensor e da carga correspondente. Com um número de 20 coletas, foi feita uma aproximação polinomial de terceiro grau, na curva do gráfico Sensor de força x Força em kgf, que pode ser visto no Gráfico 2. Esse polinômio foi escolhido pois foi o que melhor se adaptou aos pontos coletados.

**Figura 30 - Procedimento de Calibração do Sensor**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

**Gráfico 2 – Calibração do sensor de força**

**Fonte: Elaborado pelos autores**

A expressão da função polinomial foi obtida pelo software Excel, e é dada pela Equação 67:

$$F = 0.0000047x^3 + 0.00825x^2 - 5.36x + 1609 \quad (67)$$

Em que:  $F$  é a força (kgf) e  $x$  é o sinal do sensor.

#### 4.2.3 Controle

Inicialmente, foi feito o controle unilateral, no qual o potenciômetro linear acoplado à tesoura varia sua resistência elétrica proporcionalmente ao ângulo de abertura da mesma. O sinal do potenciômetro foi convertido em sinal de ângulo e enviada ao servo motor da garra, gerando a Equação 68.

$$\text{ângulo da garra} = \text{ângulo do dispositivo} \quad (68)$$

Em seguida, foi implementado o controle bilateral. Neste controle o Master envia sinal de ângulo ao Slave, bem como o Slave retorna o valor da força lida pelo

sensor ao Master. Para tal, foi utilizada a técnica de controle conhecida como Reflexão Direta da Força (DFR).

Esta técnica é descrita pela Equações 69 e 70, que foram implementadas no código em Python:

$$\text{Sensação de Força} = \text{erro de posição} \times \text{ganho} \quad (69)$$

$$\text{erro de posição} = \theta_{\text{atual}} - \theta_{\text{enviado}} \quad (70)$$

Sendo:

*Sensação de Força* : sinal do sensor de força do transformado em kgf

$\theta_{\text{atual}}$  : ângulo de abertura da tesoura.

$\theta_{\text{enviado}}$  : ângulo a ser enviado ao servomotor da tesoura

Manipulando as Equações 69 e 70, obteve-se a Equação 71:

$$\theta_{\text{enviado}} = \theta_{\text{atual}} - \frac{\text{Sensação de Força}}{\text{ganho}} \quad (71)$$

O ângulo  $\theta_{\text{enviado}}$  calculado é enviado ao servomotor da tesoura para proporcionar o feedback de força no dispositivo. Já o ângulo  $\theta_{\text{atual}}$  é o próprio ângulo de abertura da tesoura, que é enviado ao servomotor da garra do manipulador.

#### 4.2.3.1 Importância do ganho

O funcionamento adequado do sistema depende do valor do ganho escolhido. Por exemplo, baixos ganhos levam à amplificação da força, e possivelmente à saturação do sinal de comando, pois o servo motor funciona apenas na faixa de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Por outro lado, altos ganhos podem levar à geração de um sinal inferior a  $1^\circ$ , que não é lido pelo servo motor.

Diferentes valores de ganho foram testados, até se encontrar um valor cujo o sistema obtivesse uma boa performance. O valor encontrado foi  $\text{ganho} = 0.5$ .

#### 4.2.3.2 Consideração feitas no Código

Algumas modificações foram feitas no código implementado a fim de prevenir o sistema a alguns possíveis problemas. A primeira destas vem da imprecisão da

leitura do ângulo. Quando a garra não estiver em contato com nenhum objeto, espera-se que não haja força sendo feita sobre a mão do usuário, ou seja, o erro de posição deverá ser igual a zero. No entanto, devido a imprecisão de leitura, o erro de posição poderá ser diferente de zero. Apesar de mínimo este valor seria capaz de fazer o dispositivo de feedback de força se movimentar indefinidamente ou criar uma resistência. Para evitar o possível problema, foi implementado no código um “arredondamento” tal que, se o erro de posição for menor do que  $1^\circ$ , o motor deverá ignorar o valor de  $\theta_{enviado}$ .

O segundo problema possível de ocorrer é relacionado ao tempo e/ou uso do dispositivo. O valor zero do sensor pode sofrer alteração, levando então à geração de uma força indesejada no dispositivo de feedback. Portanto, foi implementada uma segunda consideração no qual se a força for menor que 20 kgf o programa não irá computá-la.

### 4.3 Python

O algoritmo principal foi implementado em linguagem de programação Python. Essa escolha foi feita devido à sua simplicidade, diversas bibliotecas gratuitas disponíveis, e a oportunidade de se aprimorar os conhecimentos nessa linguagem.

O programa em Python é responsável por realizar a comunicação serial entre os Arduinos, cálculo das cinemáticas direta e inversa, gerar gráficos, criar o modelo tridimensional em tempo real, e o controle automático.

#### 4.3.1 Comunicação Serial

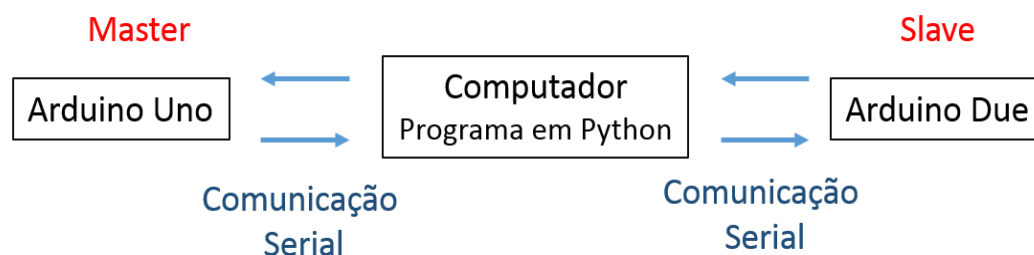
O Python troca informações com os Arduinos através da comunicação serial, recebendo e enviando informações referentes ao controle e sinais obtidos pelos sensores, como mostrado no Esquema 1.

O Arduino Uno recebe as informações do dispositivo PIG, acelerômetro e potenciômetro da tesoura pelas suas entradas analógicas e digitais, e as envia ao programa em Python através do protocolo de comunicação RS-232. Este, por sua vez, realiza as equações de cinemáticas gerando um conjunto de ângulos referente a cada motor. Essa informação é então transmitida do Python para o Arduino Due, e este irá



gerar o sinal PWM para controlar os servomotores. No primeiro momento não haverá sinal de realimentação da posição do braço para o Arduino, uma vez que o servomotor possui internamente uma malha de controle que o faz posicionar com uma certa precisão no ângulo desejado.

### Esquema 1 – Comunicação Serial



Fonte: Elaborado pelos autores

Para uma comunicação eficaz, foi desenvolvido uma sequência de transmissão de dados, composta de letras e números, contendo as informações do ângulo e de qual motor se refere. Cada linha de código representa um ângulo para um determinado motor. A linha é composta inicialmente por um “jogo da velha”, informando o início da linha. Em seguida, vem a letra *m*, que diz que a informação é do tipo ângulo. Posteriormente, segue um número de 0 a 9 referente ao número do motor, seguido do valor do ângulo. Por fim a letra *f*, informando o fim da linha e que toda a informação já foi enviada.

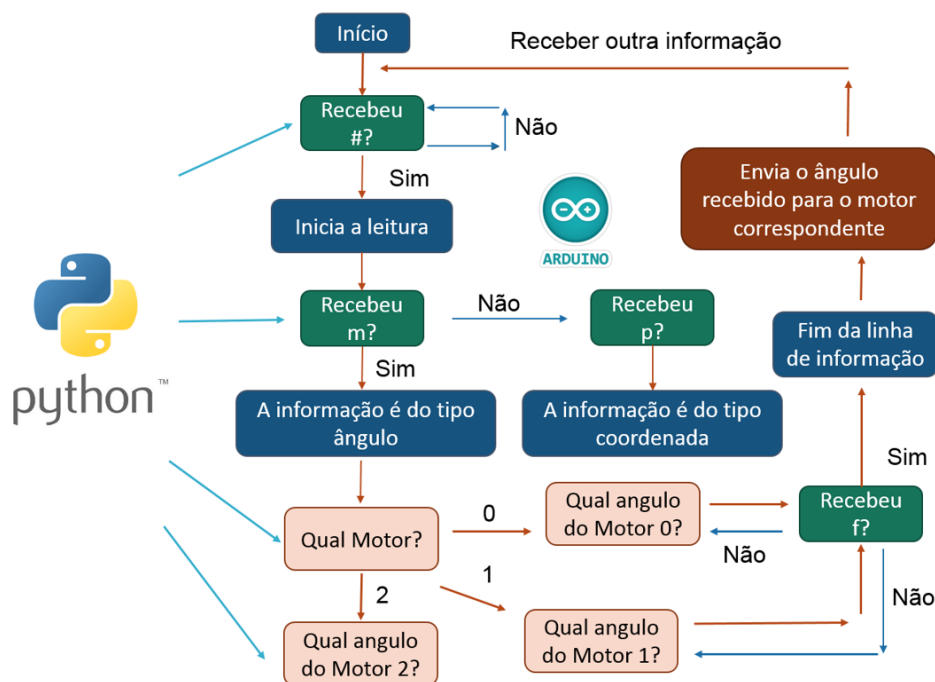
**#** (início da linha) + **m** (ângulo do motor) + **número** (de 0 a 9 correspondente ao motor) + **ângulo** (em graus 0.00 a 180.00) + **f** (fim da linha)

Exemplo:

**#m190.01f** motor número 1, ângulo de 90.01 graus

O fluxograma apresentado no Esquema 2 ilustra o funcionamento do algoritmo implementado no Arduino Due.

Esquema 2 – Algoritmo de recebimento de dados no Arduino Due



Fonte: Elaborado pelos autores

A comunicação também ocorre no sentido contrário (Slave-Master), similar ao processo descrito anteriormente. O arduino Due faz a leitura do sensor de força, enviando essa informação através da comunicação serial para o Python. O algoritmo realiza as equações de controle (Equação 71), obtendo o valor de  $\theta_{enviado}$ . Seguindo a mesma sequência de transmissão de dados, este valor é enviado ao Arduino Uno que, por sua vez, gera o sinal de PWM para controlar o servomotor do dispositivo de feedback de força.

#### 4.4 Automação

A automação do manipulador robótico foi criada para que o mesmo realize repetitivamente uma tarefa programada. Então, foi criado um botão de gravação, que quando acionado salva os valores dos ângulos das juntas do manipulador no decorrer do tempo. Posteriormente, faz-se uma média móvel entre 5 valores, a fim de suavizar a trajetória. O botão play realiza a leitura os ângulos salvos nas listas e os envia ao manipulador robótico. Este realizará em loop os movimentos salvos. O botão normal deleta as trajetórias salvas e faz o programa voltar ao controle manual.

## 4.5 Lista de materiais

Para a construção do sistema foram necessários os seguintes materiais:

- Manipulador robótico com 5 graus de liberdade;
- 01 controlador Arduino Due;
- 01 controlador Arduino Uno;
- 01 protoboard;
- 01 fonte de computador (5V);
- 04 potenciômetros;
- 01 servomotor SG90;
- 01 MPU-6050 (acelerômetro/giroscópio)
- 01 tesoura;
- 01 TCRT 5000 (Led Infravermelho e fototransistor);
- 01 computador;
- Fios de ligação;
- Resistores;
- Tubo de silicone;
- Hastes de madeira.



## 5 TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS

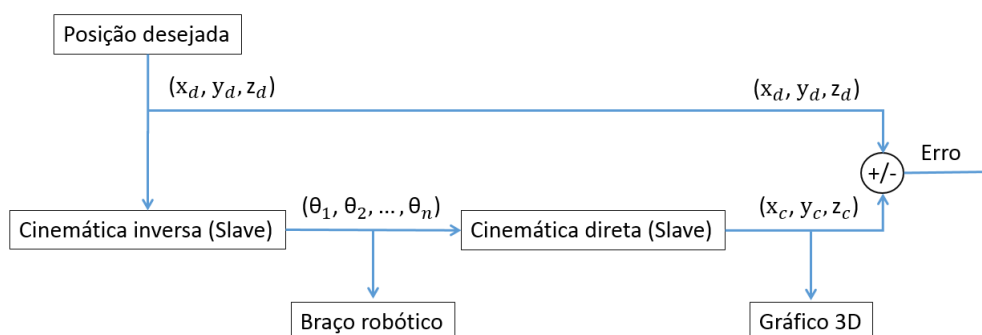
Nesta seção serão apresentados os testes realizados com o manipulador, ao longo do desenvolvimento do projeto, bem como os resultados obtidos e análise dos dados coletados.

### 5.1 Posição

A validação das cinemáticas direta e inversa foi feita comparando a posição do eixo {4} do robô com a posição desejada, apresentado no Esquema 3. Vale lembrar que na formulação da cinemática inversa, o comprimento terceiro link ( $L_3$ ) foi desprezado. Portanto, a posição sendo comparada nesta seção não é a posição da garra {5}, mas sim a posição {4}. O processo foi realizado segundo as seguintes etapas:

- Primeiramente, informou-se a posição desejada.
- O algoritmo realizou a cinemática inversa para obtenção dos ângulos.
- Os ângulos obtidos foram enviados às juntas do manipulador, fazendo-o ir para a posição desejada.
- A cinemática direta foi realizada com os ângulos obtidos pela cinemática inversa, para a verificação da cinemática e criação de uma representação gráfica. A partir disso, obteve-se as coordenadas espaciais.

**Esquema 3 – Validação Cinemática Inversa**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

Os algoritmos e equações desenvolvidas estarão corretas se a posição obtida pela cinemática direta for igual à posição desejada. A seguir são apresentados os

testes feitos para três diferentes posições. As fotos do manipulador robótico e as suas coordenadas cartesianas equivalentes, são apresentadas nas Figuras 33 a 35.

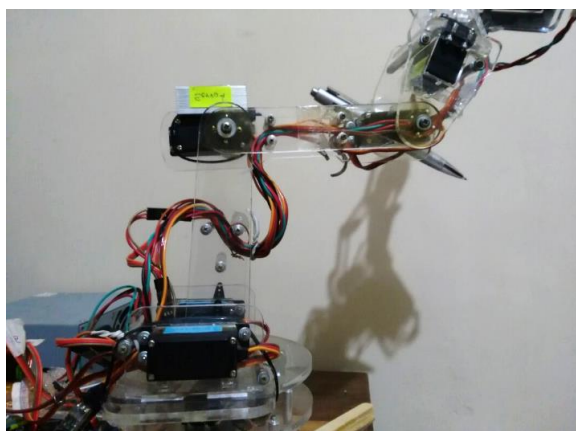
1 Posição desejada:  $(L1, 0, L2) = (104, 0, 104)$  [mm]

Ângulos obtidos:  $[\theta_0=0.00, \theta_1=90.00, \theta_2=90.00]$  [graus]

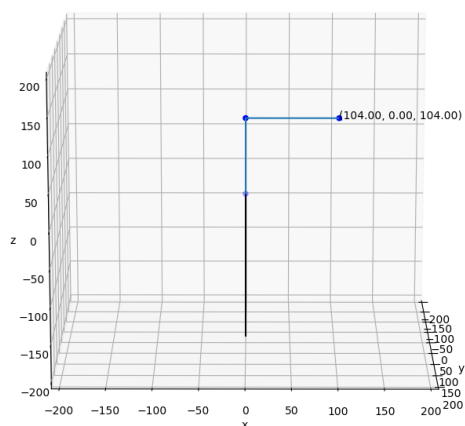
Posição calculada:  $(104, 0, 104)$  [mm]

**Figura 31 - Teste de posição 1**

Braço Robótico



Modelo 3D



Fonte: Elaborado pelos autores

2 Posição desejada:  $(1.5 \cdot L1, 0, 0.5 \cdot L2) = (156, 0, 52)$  [mm]

Ângulos obtidos:  $[\theta_0=0.00, \theta_1=56.19, \theta_2=75.52]$  [graus]

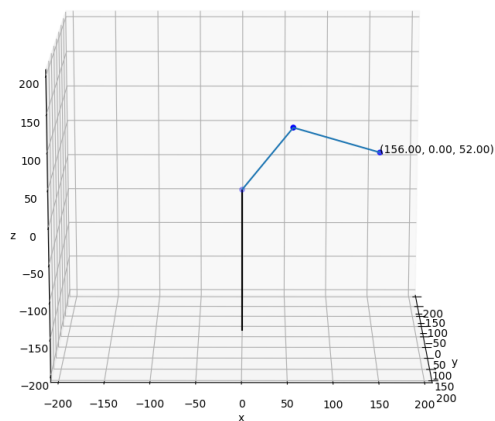
Posição calculada:  $(156, 0, 52)$  [mm]

**Figura 32 - Teste de posição 2**

Braço Robótico



Modelo 3D



Fonte: Elaborado pelos autores

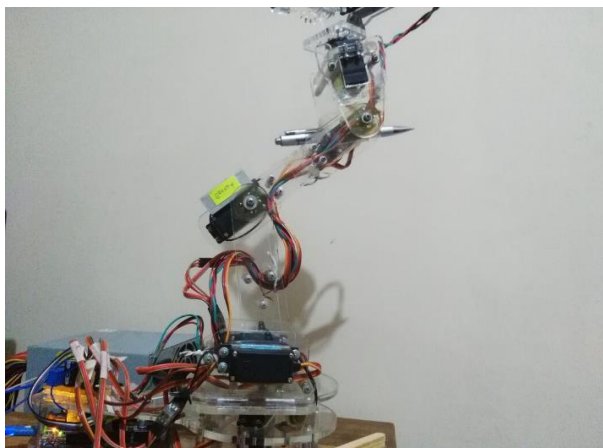
3 Posição desejada:  $(0.5 \cdot L_1, 0, 1.5 \cdot L_2) = (52, 0, 156)$  [mm]

Ângulos obtidos:  $[\theta_0=0.00, \theta_1=109.33, \theta_2=75.52]$  [graus]

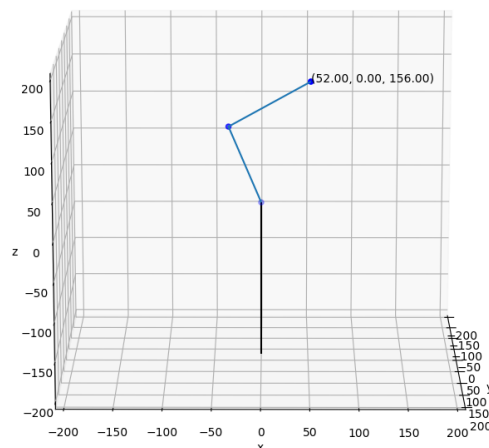
Posição calculada:  $(52, 0, 156)$  [mm]

**Figura 33 - Teste de posição 3**

Braço Robótico



Modelo 3D



**Fonte: Elaborado pelos autores**

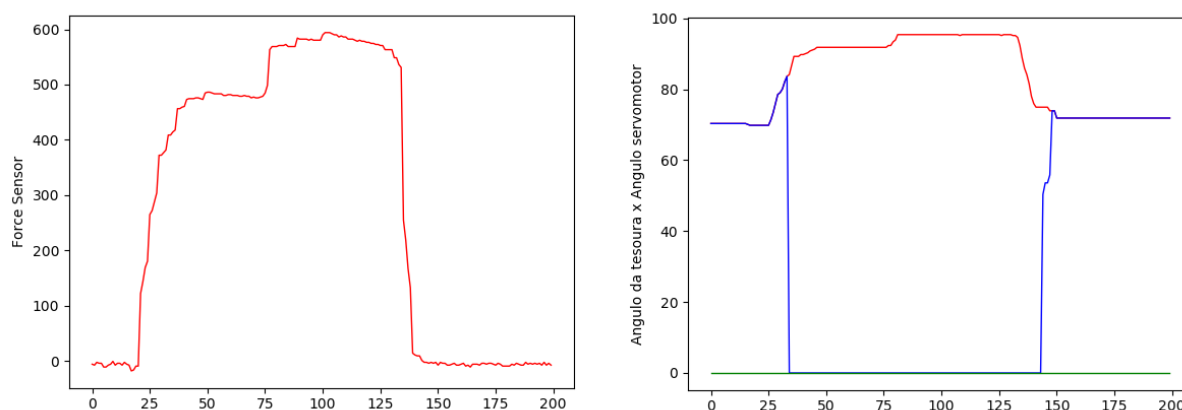
Os testes realizados mostram que a posição calculada é igual à posição desejada, o que significa que as cinemáticas direta e inversa implementadas estão funcionando corretamente. Além de mostrar que as matrizes de transformação homogênea, bem como a resolução das equações, estão corretas.

Não foi realizado nenhum teste quantitativo para se descobrir o erro de posição, pois este não é um dos objetivos deste trabalho. Os resultados do cálculo da cinemática inversa pelo método tradicional (por parâmetros de DH) são tão precisos quanto for o limite computacional. No entanto, existe um erro de posição associado à limitação na saída PWM do Arduino e também à montagem física do manipulador. Verificou-se a existência de uma folga interna característica dos servomotores utilizados, de aproximadamente  $1^\circ$  (medição feita utilizando um transferidor). Esse erro é acumulativo para uma sucessão de links, dependendo apenas do número de servomotores utilizados.

## 5.2 Força

O primeiro teste de força consistiu em analisar a resposta do sensor de força ao pegar um objeto com a garra. Inicialmente, a força aplicada sobre o objeto foi de aproximadamente 0.5kgf por um certo período, gerando uma resistência sobre a tesoura. O usuário colocou mais força sobre e, então, houve um aumento na tensão aplicada ao objeto, passado para 0.6kgf, como se pode ver no Gráfico 3. O gráfico à esquerda representa a força na garra, enquanto o gráfico à direita representa o  $\theta_{atual}$  e  $\theta_{enviado}$ , em vermelho e azul respectivamente.

**Gráfico 3 - Teste de força**



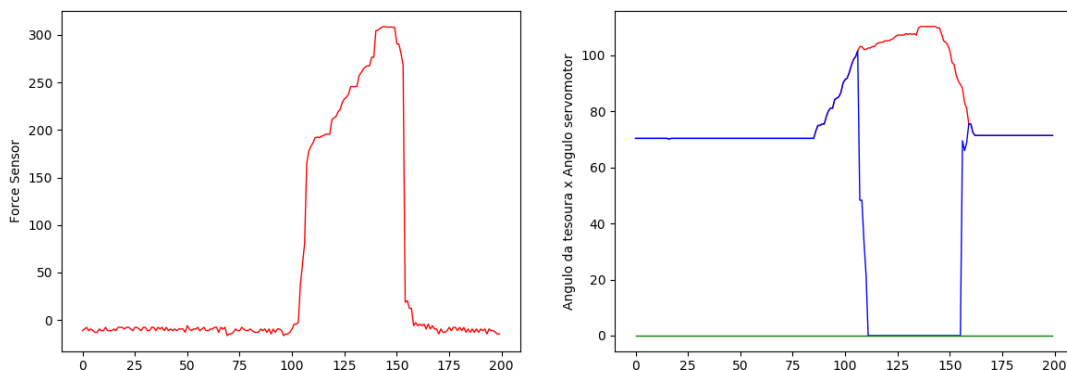
**Fonte: Elaborado pelos autores**

Através desse teste, pôde-se observar a viabilidade em controlar a força aplicada ao objeto, mas com pequenos incrementos.

O segundo teste foi feito observando o comportamento da força na garra ao segurar dois diferentes materiais, um duro e um macio, como ilustra os Gráfico 4 (material rígido) e Gráfico 5 (material macio). Observou-se que a força na garra foi maior para o objeto rígido, implicando que é possível distinguir diferentes objetos a partir de uma análise gráfica.

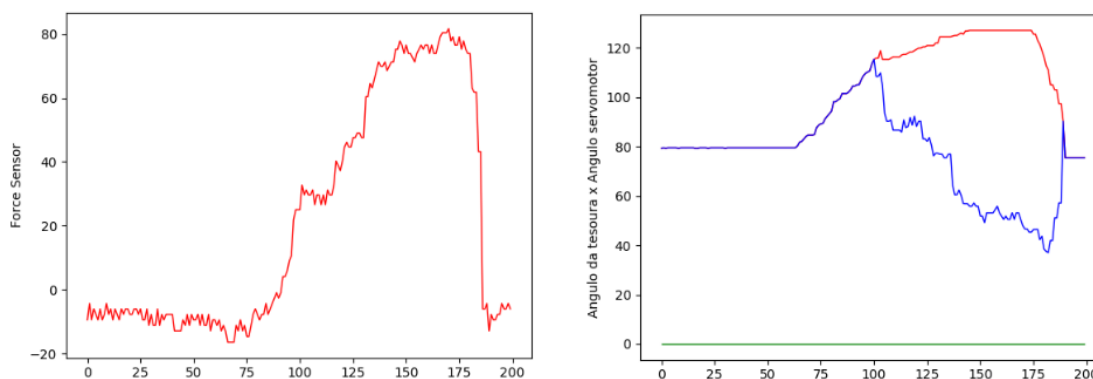


**Gráfico 4 - Teste de força material rígido**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

**Gráfico 5 - Teste força objeto macio**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

Ainda, foi realizado um teste qualitativo para verificar a possibilidade de distinção de diferentes materiais pelo usuário. Em outras palavras, verificar se através do dispositivo construído, pode efetivamente sentir e distinguir a dureza de um material. Os materiais utilizados foram um “carregador de celular” e uma “esponja”, como mostrado nas Figuras 36 e 37, respectivamente, representados pelas letras M (Macio) e D (Duro) respectivamente. Por vezes, nenhum dos materiais foram utilizados, representado por N (Nada).

**Figura 34 – Material Rígido**

Fonte: Elaborado pelos autores

**Figura 35 – Material Macio**

Fonte: Elaborado pelos autores

O teste foi feito da seguinte maneira: um usuário posiciona um dos objetos na garra do manipulador, enquanto o outro, de olhos vendados, pega o objeto por meio do dispositivo de força. Assim, o segundo usuário tenta descobrir qual dos objetos é aquele. Esse teste foi repetido 18 vezes com duas pessoas para dois diferentes valores de ganho, cujos resultados estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Experimento de sensibilidade de força com diferentes objetos**

Ganho=0.5				Ganho=1			
Pessoa 1		Pessoa 2		Pessoa 1		Pessoa 2	
Objeto	Palpite	Objeto	Palpite	Objeto	Palpite	Objeto	Palpite
M	M	D	D	D	D	D	D
M	M	D	M	M	M	N	M
D	M	M	M	M	M	M	M
M	M	D	D	D	D	M	D
D	M	D	M	D	D	D	D
D	M	M	M	D	D	N	N
M	M	D	D	N	D	D	M
D	D	D	D	M	M	M	M
D	D	M	M	M	M	D	D
M	M	D	D	D	D	N	N
D	D	M	M	D	M	D	M
D	D	D	D	D	M	M	M
M	M	M	D	N	N	M	M
M	D	M	D	M	M	D	N
D	D	D	M	M	M	M	D
M	M	M	M	D	M	N	N
D	D	D	D	N	N	M	D
M	M	D	D	D	D	D	D
<b>Acerto</b>	<b>14</b>	<b>Acerto</b>	<b>13</b>	<b>Acerto</b>	<b>12</b>	<b>Acerto</b>	<b>11</b>
<b>Errado</b>	<b>4</b>	<b>Errado</b>	<b>5</b>	<b>Errado</b>	<b>6</b>	<b>Errado</b>	<b>7</b>
<b>Acerto %</b>	<b>77.8</b>	<b>Acerto %</b>	<b>72.2</b>	<b>Acerto %</b>	<b>66.6</b>	<b>Acerto %</b>	<b>61.1</b>

Fonte: Elaborado pelos autores

**Legenda: M = objeto macio**

**D = Objeto duro**

**N = nenhum objeto**

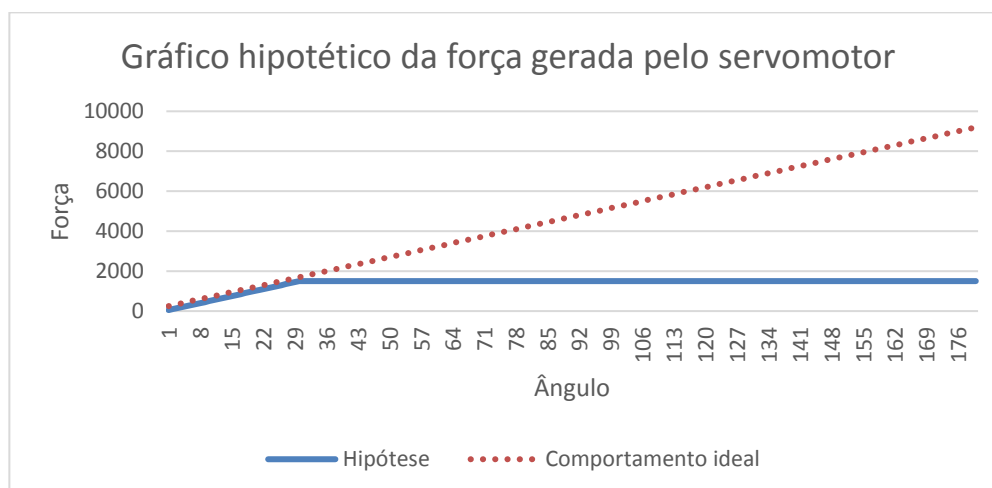
Através do teste foi calculado a taxa de acerto, sendo dada pela Equação 72:

$$Acerto\% = \frac{Acertos}{Total} \times 100\% \quad (72)$$

A taxa de acerto foi superior a 70% para ganho=0.5. Isso é um valor aceitável para o projeto, tendo em vista da precisão dos dispositivos e técnica de controle utilizada, o que mostra que é possível diferenciar a dureza de pelo menos 2 diferentes materiais. Para ganho=1.0, o acerto ficou na faixa de 60 a 70%, valor inferior comparado a o ganho=0.5. É possível, também, que a diferença no tamanho dos objetos utilizados, mesmo que mínima, tenha alguma influência. Futuramente, o teste poderá ser realizado com um número maior de indivíduos, para uma melhor confiabilidade, levando em consideração a dimensão dos objetos.

Através dos testes realizados, percebeu-se que existe um limite máximo na força que o servomotor é capaz de realizar, da maneira representada pelo Gráfico 6. Uma solução, para realizar forças maiores, é trocar o modelo de servomotor utilizado ou fazer uma modificação interna no servomotor. Isto é, retirar o seu controlador PID interno e realizar esse controle diretamente pelo Arduino. Outra opção ainda é transformar o servomotor em um motor de corrente contínua e fazer seu controle pelo sinal PWM.

**Gráfico 6 - Gráfico hipotético da força gerada pelo Servomotor**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

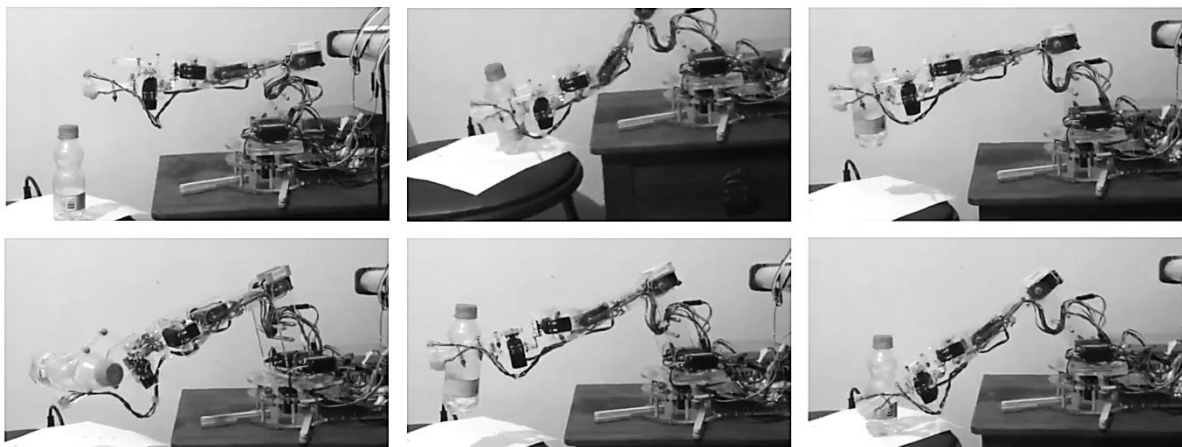
Durante os testes iniciais do dispositivo, dois servomotores TowerPro SG90 tiveram suas engrenagens de plástico quebradas, devido à excessiva força que os dedos realizam sobre ela. Então eles foram substituídos por um modelo de servomotor mais resistente, com engrenagens de metal.

Apesar de uma certa imprecisão em sentir a dureza do material, é possível facilmente perceber o contato da garra com um objeto, expressada em uma forma de resistência na mão do usuário.

### 5.3 Automação

O manipulador foi programado através do dispositivo construído para repetir uma tarefa que consiste em pegar um objeto, movimentá-lo no espaço, posicioná-lo no mesmo local de onde o retirou, e recomeçar o processo. O robô foi deixado a realizar essa tarefa por um período de aproximadamente 10 minutos. Estimou-se que de 9 em 10 tarefas o manipulador conseguiu pegar e retornar o objeto com sucesso. As falhas se devem simplesmente à irregularidade da superfície, fazendo o objeto tombar por algumas vezes. A Figura 38 mostra uma evolução quadro a quadro da tarefa de pegar uma garrafa, realizada pelo manipulador robótico.

**Figura 36 - Animação quadro a quadro**



Fonte: Elaborado pelos autores

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível realizar satisfatoriamente o controle e a automação de um manipulador robótico com sensor de força. O usuário foi capaz de sentir e controlar a força atuante na garra do manipulador. Para isso foram aplicados com sucesso conhecimentos de robótica relacionados às cinemáticas direta e inversa, e sensação de força.

A aplicação da cinemática inversa, possibilitou determinar a coordenada espacial do efetuador, coordenada que representa a posição desejada, bem a obtenção dos ângulos dos servomotores do manipulador robótico. O que possibilitou, por este processo, notar que os ângulos do dispositivo de controle e do manipulador são completamente diferentes, ou seja, qualquer outro dispositivo que forneça uma posição desejada, poderá controlar o manipulador.

A partir dos testes realizados, foi possível confirmar o funcionamento das cinemáticas com sucesso, uma vez que o plano {4} da simulação do manipulador alcançou exatamente a posição desejada.

Por meio da criação da sensação de força, implementado pelo método de Reflexão Direta de Força (DFR), a abertura angular do dispositivo de feedback, manipulado diretamente pelo usuário, controlou a abertura da garra do robô.

O sensor presente na garra, foi capaz de realizar a leitura da força atuante ao segurar um objeto e, por meio do dispositivo de feedback, aplicou uma força proporcional sobre as mãos do usuário.

O dispositivo também foi capaz de diferenciar a dureza de diferentes objetos. A taxa de acerto foi superior a 70% para um ganho de 0.5.

O sensor ótico utilizado para a realização da sensação de força, que foi de baixo custo e fácil implementação, apresentou uma resposta bastante rápida.

A opção do sistema em permitir que o usuário salve, no programa em Python, os movimentos realizados pelo manipulador, e os executam repetidamente, para realizar alguma tarefa, permite que a automação do robô seja feita com facilidade por qualquer pessoa, sem necessidade de conhecer uma linguagem de programação.

Como continuidade do projeto pode-se citar a expansão do controle de posição do plano cartesiano {4} para a ponta da garra {5}, levando em consideração o comprimento do terceiro link, e também em alcançar maior precisão de posicionamento, a partir da implementação de técnicas que compensem a folga dos

servomotores. Além disso, outras técnicas de controle de cinemática, como o método Screw e algoritmos de Inteligência computacional, poderão ser utilizados a fim de realizar um estudo comparativo entre os diferentes métodos existentes. No que se refere à sensação de força, outras técnicas poderão ser implementadas, para a obtenção de uma melhor performance.

O manipulador robótico desenvolvido neste trabalho pode ser, a partir de pequenos ajustes, utilizado em processos “industriais” de pequena escala, onde sua trajetória poderá ser programada, facilmente, através do dispositivo de controle construído, sem a necessidade do usuário ter conhecimento algum em programação.

## REFERÊNCIAS

BACKMAN, D. E.; LESAVAGE, B. L.; WONG, J. Y. Versatile and inexpensive Hall-Effect force sensor for mechanical characterization of soft biological materials. **Journal of Biomechanics**, v. 51, p. 118–122, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.11.065>>. .

BÔRTOLE, MAGDO; FILHO, TEODIANO FREIRE BASTOS. Desenvolvimento de um sensor híbrido para aplicações em robótica e fisioterapia. **X SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, setembro de 2011, p. 183 a 186.

CHEN, Q.; ZHU, S.; ZHANG, X. Improved Inverse Kinematics Algorithm Using Screw Theory for a Six-DOF Robot Manipulator. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 12, n. 10, p. 1–9, 2015.

**Como um sensor de força realmente funciona?**. [S.l.]: HBM, [S.d.], Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6697/artigo-como-um-sensor-de-forca-realmente-funciona/>>. Acesso em: 13 jun. 2017.

CRAIG, Jhon J.. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3. ed. Saddle River: Pearson Education, Inc, 2005, p. 1-10, 2005.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H.. **Sistemas de Controle Modernos**. Tradução de Bernardo Severo da Silva Filho. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 1 - 18, 2001.

FIGUEIREDO, Lúcia J.. et al. **Aplicações de Acelerómetros**. 2007. 12 f. Monografia (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Mestrado Integrado em Engenharia Biomédica, Lisboa, 2007.

GONÇALVES, P. H. C.; CACIQUE, F. V; LORENZETO, F. T. C.; et al. DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR PARA CAPTURA DE MOVIMENTOS DE UMA MÃO HUMANA. Trabalho de conclusão de Curso, PUCMinas, 2016.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Óptica e física moderna**. LTC (GRUPO GEN) vol. 4, 8e.d. 2009.

ILIE, F.; ALEXANDRU, T. Forward and Inverse Kinematics Study of Industrial Robots Taking Into Account Constructive and Functional Parameter  $\hat{\epsilon}^{\text{TM}}$  S Modeling. , v. 10, n. 4, p. 157–164, 2015.

KOKER, R.; ÇAKAR, T.; SARI, Y. A neural-network committee machine approach to the inverse kinematics problem solution of robotic manipulators. **Engineering with Computers**, v. 30, n. 4, p. 641–649, 2013.

KIM, Y. C.; IHN, Y. S.; CHOI, H. R.; LEE, S. M.; KOO, J. C. Implementation of force sensor with multi strain gauges for enhancing accuracy and precision. **Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA 2010**, , n. 1, p. 192–195, 2010.

LEVINE, William S.. **The Control Handbook**. 1. ed. [S. I.]: CRC Press LLC, p.100-105, 1995.

MARTINS, Nardênio Almeida. **Sistemas Microcontrolados**: Uma abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84. 1 ed. Editora Novatec Ltda, 2005.

MENDES, Juliana Maria Alves; FILHO, Nabil Hannouche. Estação Meteorológica Móvel. 2013. 110 f. Monografia (Graduação) – Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2013.



NARAYAN, Y. S.; CHAITANYA, M. Application of Robots in Radioactive Environment : A Review. **NCRAM - 2014 (The First National Conference)**, , n. March 2014, 2014.

NISE, Norman S.. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Tradução de Bernardo Severo da Silva Filho. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 1 - 25 , 2002.

PATSKO, Luís Fernando. Tutorial Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores. Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica, p. 21 – 24, 2006.

PRATS, Mario; POBIL, Angel P. del; SANZ, Pedro J. **Robot Physical Interaction Through the Combination of Vision, Tactile and Force Feedback**. New York: Springer Heidelberg, 2006.

PICTRONICS. Como funciona um servo motor, 2010. Disponível em: <<http://www.pictronics.com.br/artigos-tecnicos/43-eletronica-e-automacao/89-como-funciona-um-servo-motor.html>>. Acesso 12 mar. 2015.

RAMOS, Francisco A. Tadheu. **Sensores e Atuadores**: Instrumentação Industrial. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/DaianaPaula2/apostila-sensores-e-atuadores-1>>. Acesso 13 jun. 2017

SENSORWIKI. **Flexion sensors**, 2015. Disponível em: <<http://www.sensorwiki.org/doku.php/sensors/flexion>>. Acesso 13 jun. 2017.

SOUZA, David José. Desbravando o PIC: **Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A**. 8 ed. São Paulo, SP, Brasil: Érica, 2005.

TAVAKOLI, M.; AZIMINEJAD, A.; PATEL, R. V.; MOALLEM, M. Multi-sensory force/deformation cues for stiffness characterization in soft-tissue palpation. **Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings**, p. 837–840, 2006.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 4. ed. [S.l.]: Érica, 2005.