

## DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SENSORIAL TÁTIL PARA GARRA ROBÓTICA DE TRÊS DEDOS

Rogério Silveira Rezende Filho<sup>1</sup>

Clauber Roberto Melo Marques<sup>2</sup>

**Resumo:** A automação tem como objetivo, diminuir ações dependentes da intervenção humana nos processos industriais. A automação é composta por três áreas da tecnologia, mecânica, eletrônica e a informática. Robôs industriais possuem várias configurações, que se assemelham com as características humanas (antropomórficas), substituindo a mão de obra humana em várias áreas, a semelhança que mais se destaca é a garra do manipulador robótico. As garras mais comuns encontradas são as com características de dois dedos, três dedos e as articuladas. Garras de dois dedos manipulam cerca de 40% dos objetos de diferentes formas, três dedos manipulam cerca de 90% dos objetos e quatro dedos manipulam em torno de 99% dos objetos. Porém quanto maior o número de dedos, maior será a complexidade do sistema de controle da garra. Em consequências das situações inadequadas em ambientes diferentes, as garras robóticas apresentam dificuldades na manipulação dos objetos. Para a solução desse problema, o uso de sensores de força ou de posição através de um controle automático é aplicado para facilitar a manipulação de objetos em ambientes não conhecidos, isso faz com que comercialmente, possuem valores extremos, sendo inviável fazer modificações para um determinado objeto em específico. Buscou-se com este estudo o desenvolvimento de um sistema sensorial tátil para garra robótica de três dedos, no intuito de baratear custos e simplificar seu desenvolvimento. Através da impressão 3D fabricou-se a estrutura da garra, para junto com a eletrônica aplicada obter todos os dados gerados por suas manipulações com objetos. Os dados fornecidos pelo sensor de força (*FSR 402*), foram primordiais para a realização dos estudos, onde através de sua leitura foi possível calcular todos os valores para cada variável resultante, como tensão, resistência, condutância, resultando em sensibilidades diferentes para cada objeto testado. Com o método de controle ativo, obtendo o *feedback* de força, foi possível agarrar objetos frágeis sem danificá-los e objetos maciços aplicando forças maiores sobre estes. Com os resultados obtidos, demonstrou-se alcançar o objetivo de trazer uma iniciativa no auxílio de manipulações de objetos, dos mais frágeis ao mais resistentes, utilizando a mesma garra robótica, através de um sistema sensorial tátil capaz de mensurar a força que será aplicada em um objeto ao ser manipulado.

**Palavras-Chave:** Automação. Sistema Tátil. Garras Robóticas. Controle Ativo (*feedback*). Sensor força (*FSR 402*).

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecatrônica. Ano: 2021/2. E-mail: rogrs\_16@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor do Centro Universitário UniSATC. Ano: 2021/2. E-mail: clauber.marques@satc.edu.br

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a humanidade sempre procurou soluções que facilitassem o manuseio e realizações de tarefas cotidianas por meios de ferramentas e objetos com a capacidade de diminuir esforços físicos e muitas vezes complexos. Neste contexto, com o desenvolvimento evolutivo do ser humano e do avanço tecnológico, dentro da necessidade de aperfeiçoar meios de produção, tornou a automatização de processos em áreas diferentes, com a substituição do homem pela máquina, o grande propulsor para a chegada da revolução industrial.

A empresa *Universal Automation Inc.* fundada por George Devol e Joseph F. Engelberger em 1956 com um grupo de engenheiros e programadores da Universidade de *Stanford*, teria sido a primeira companhia a produzir um robô manipulador industrial, conhecido como Máquina de Transferência Programada, pois possuía a função de transferir objetos de um ponto para outro, utilizando atuadores hidráulicos que eram programados a partir de coordenadas. O primeiro manipulador robótico foi patenteado e utilizado pela *General Motors (GM)*.

O grande fator que elevou a robótica aos patamares atuais ocorreu nos anos 70, momento em que grandes empresas perceberam suas vantagens e começaram a se adaptar com a nova tecnologia.

Hoje com a chegada da indústria 4.0, as tarefas exaustivas e contínuas feitas por humanos, estão sendo substituídas cada vez mais por mão de obra robotizada. Os robôs estão se tornando cada vez mais essenciais dentro dos ambientes industriais, por oferecerem um aumento significativo no desempenho de tarefas e redução de custos nos processos produtivos. Uma das partes estruturais muito importantes que compõem um manipulador robótico são as garras, responsáveis por agarrarem e segurarem objetos. Nas linhas de montagem várias indústrias automobilísticas, aeroespaciais, alimentícias, entre outras, utilizam manipuladores robóticos com garras robóticas tipo pinças em produção de larga escala. As condições atuais nas produções industriais estão necessitando de robôs com maior flexibilidade e adaptabilidade, com software e hardware de fácil programação e manipulação [1].

Devido à variedade imensa de produtos com características totalmente diferentes, foram desenvolvidos diferentes tipos de efetadores, tais como: garras

mecânicas, garra a vácuo e garras eletromagnéticas, que correspondem a várias aplicações industriais. Por serem os tipos mais comuns de configurações utilizadas, as garras de dois dedos e três dedos se destacam, mas possuem limitações nas manipulações de objetos por causa de suas características estruturais [2]. Por outro lado, garras antropomórficas oferecem diferentes tipos de manipulações em objetos que possuem formas, pesos, tamanhos e fragilidades diferentes, por ela possuir características da mão humana como articulações complexas e sentidos táteis e entre outros.

O investimento no desenvolvimento de um robô se torna muito elevado devido a vários fatores, tendo como exemplos, altos níveis de tecnologia, materiais utilizados e dimensões estruturais elevadas. As garras robóticas encontradas hoje comercialmente, possuem valores extremos, sendo inviável fazer modificações para um determinado objeto em específico [3].

Existem tecnologias que vem sendo estudadas para suprir essas necessidades, uma delas é a tecnologia de impressão 3D, que consiste em desenvolver objetos através a adsorção de materiais polímeros, replicando um modelo digital de uma peça ou qualquer outro objeto a ser fabricado, sendo um sistema rápido, prático e versátil, visando à diminuição de custos.

A impressão 3D também está presente nas áreas da medicina, alimentícia, fabril e entre outras. Neste sentido, este trabalho busca através da tecnologia de impressão 3D, desenvolver uma garra robótica de três dedos, com o uso de sensoriamento na importância de aperfeiçoar o manuseio da mesma e de objetos, com a classificação de qual material polímero a ser usado para tornar acessível o custo e a qualidade no processo de fabricação da garra robótica.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 AUTOMAÇÃO**

A automação tem como objetivo, diminuir ações dependentes da intervenção humana nos processos industriais, estando ligada aos controles de processos automáticos, com o objetivo de melhorar a qualidade e a produtividade em processos repetitivos [4]. Sistemas automatizados podem ser aplicados em diferentes

áreas da indústria, como os setores de máquinas, automatização da própria indústria, tendo como diferença o número de elementos monitorados e controlados [5]. Um exemplo de automação industrial muito utilizado está no setor automotivo, no processo de produção e montagem dos veículos.

A automação é composta por três áreas da tecnologia integradora como: a mecânica que compõe os dispositivos mecânicos, tendo como exemplo os atuadores, a eletrônica responsável pelo *hardware* e a informática responsável pelo *software* que irá controlar todo o sistema [5]. De acordo com Carrara [6], a automação industrial se identifica em três formas distintas: automação fixa, automação flexível e automação programável. No sistema de automação fixa, as máquinas são desenvolvidas especificamente para determinados produtos a serem produzidos, sendo classificada como produção de larga escala.

O custo do maquinário a ser implantado inicialmente se torna relativamente alto, pois as máquinas serão desenvolvidas diretamente para determinados produtos. O custo do produto se torna mais baixo, mas pelo contrário, o volume de produção é muito elevado [6].

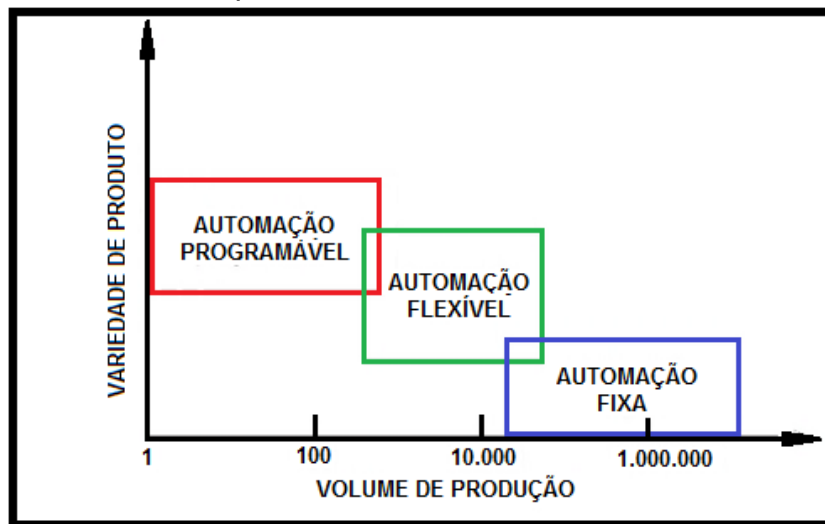
Segundo Boaretto [7], um sistema de automação flexível são grupos de estações de trabalhos semi-independentes controladas por computadores, interligadas por um sistema de transporte automatizado. Sendo indicada sua implantação para quando se tem grandes números de peças a serem produzidas em volumes de produção médio e baixo [6].

No sistema programável, o equipamento ou máquina tem a capacidade de produzir uma variedade de produtos de características diferentes. Essa forma de automação é utilizada quando o volume de produção é baixo, pois o equipamento é desenvolvido para se adaptar às características e configurações dos produtos a serem fabricados. É uma produção totalmente adaptável através da programação, temos como exemplos máquinas de comando numérico computadorizado (CNC) e robôs industriais [6].

Robôs industriais possuem várias configurações, algumas que se assemelham com as características humanas (antropomórficas), por esse motivo substituem a mão de obra humana em várias áreas, tendo o volume de produção baixo. A robótica é o processo de automação que mais se destaca e se enquadra no sistema programável, dentro de várias operações repetitivas e detalhadas [6].

De acordo com Groover [8], na Fig. 1, podemos visualizar o volume de produção em relação a suas variedades de produtos através do gráfico.

Figura 1: Gráfico da relação do volume de produção e variedades dos produtos



Fonte: Adaptado de Groover 2011 [8].

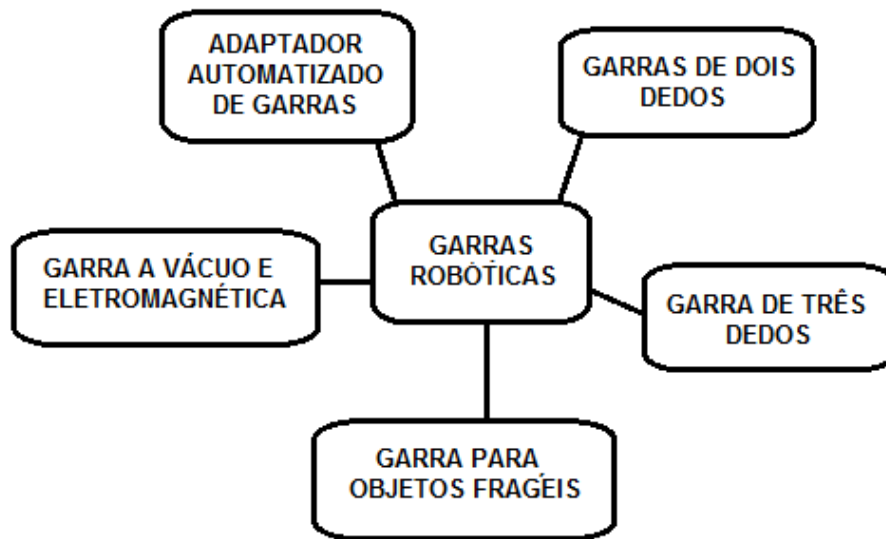
Dessa forma, pesquisadores estão cada vez mais procurando novas tecnologias para desenvolver novos tipos de manipuladores robóticos, para que se aproximem da efetividade da mão humana [9].

## 2.2 GARRAS

A garra é um componente mecânico que compõe a estrutura de um robô, no intuito de segurar as peças a serem verificadas, enquanto o robô executa operações de manuseio, como o transporte de uma peça ou carregamento de uma máquina com uma peça. O número de garras que um robô possui, determina o número de peças a serem manipuladas ao mesmo tempo [10].

O termo “garra” é utilizado para definir situações onde o objeto não necessariamente é agarrado, mas apenas segurado, como em casos de sucção ou através de forças eletromagnéticas [11] [12]. Na classificação das garras com a comparação feita por Rosário [13] referente à mão humana, podemos observar alguns dos tipos de garras existentes no mercado, conforme Fig. 2.

Figura 2: Classificação das garras robóticas



Fonte: Adaptado de Rosário 2004 [13].

Diferente da classificação feita por Rosário [13], a classificação feita por Birglen *et al.* [14], é de acordo com o número de atuador ( $N_{act}$ ) em relação ao número de graus de liberdade da garra robótica ( $N_{gdl}$ ). Quando o  $(N_{gdl}) = (N_{act})$ , a garra é considerada totalmente atuada, caso  $(N_{gdl}) > (N_{act})$ , a garra será considerada sub-atuada. As garras totalmente atuadas precisam de um investimento computacional muito alto, pois são muito complexas, diferente da sub-atuada que são mais simples em comparação [14].

As garras mais comuns encontradas são as com características de dois dedos, pois apresentam uma grande variedade e proporcionam movimentos rotativos ou paralelos. Possuem restrições em sua movimentação, pois o limite de abertura e fechamento dos dedos, restringem muitos objetos por causa da abertura máxima da garra. Essas garras são adequadas para produtos industriais fáceis de fabricar. De acordo com Alba e Ponticelli [15], cerca de 75% das garras robóticas, os atuadores são do tipo elétrico, pneumático e outros.

As garras de três dedos proporcionam a manipulação mais firme dos objetos com características triangulares, circulares e irregulares. Quando possuem dedos articulados, proporcionam uma melhor adaptação a superfícies planas, mas

isso eleva muito seu valor comercial. Para a realização desse projeto foi determinado esse modelo de garra com três dedos.

As garras articuladas são usadas para a manipulação de objetos de tamanhos e formas diferentes, mas possuem limitação em volume e peso do objeto a ser manipulado. As garras de objetos frágeis exercem uma determinada força para manipular o objeto, sem danificá-lo. Diferente das garras a vácuo e eletromagnéticas, que atuam com a sucção do ar e também através da geração de um campo eletromagnético.

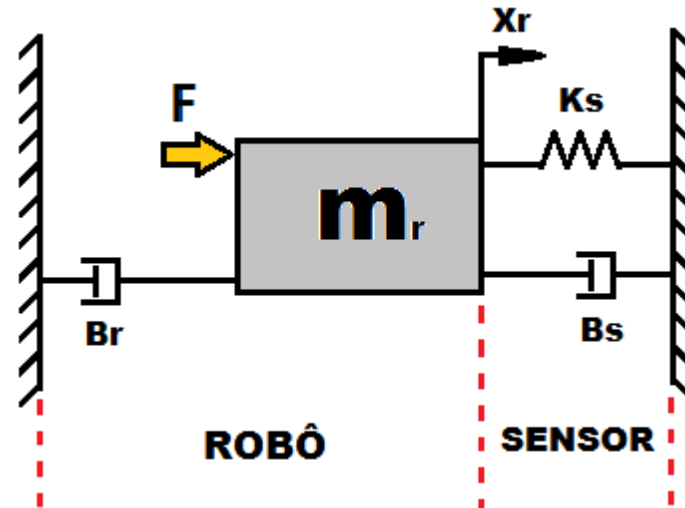
Devido à necessidade das garras robóticas realizarem diferentes tipos de preensão, os adaptadores automatizados foram criados, permitindo o acoplamento de diferentes sistemas de preensão no elemento terminal do robô, ligando ou removendo rapidamente. Para Sousa [12], Matsuoka [16] e Lenarcic *et al.* [17], garras de dois dedos manipulam 40% dos objetos de diferentes formas. Uma garra de três dedos manipula cerca de 90% dos objetos e uma garra com quatro dedos manipula em torno de 99% dos objetos. Porém quanto maior o número de dedos, maior será a complexidade do sistema de controle da garra.

### 2.3 SISTEMA SENSORIAL

Em consequências das situações inadequadas em ambientes diferentes poucos conhecidos, as garras robóticas apresentam dificuldades nos processos de manipulação dos objetos. Para a solução desse problema, o uso de sensores de força ou de posição através de um controle automático, é aplicado para controlar e facilitar a manipulação de objetos em ambientes não conhecidos. Conforme Groover [8] a realimentação sensorial nos dedos, possibilita a garra aplicar uma força específica evitando a deformação do objeto ao ser manipulado.

Entre as técnicas utilizadas para o controle de força, o controle de conformidade, tem como objetivo criar durante a interação dos dedos da garra com o objeto, movimentos seguros para manipular o objeto sem danificá-lo. Podemos definir que o controle de conformidade é a tolerância de desvio de sua posição de equilíbrio, dependendo das forças externas aplicadas [19]. Um modelo genérico descrito por Jalani [19], nos mostra um sistema massa-mola de controle de conformidade para uma garra robótica, conforme mostra Fig. 3.

Figura 3: Modelo genérico de controle de conformidade



Fonte: Adaptado de Jalani 2013 [19].

Onde,  $m_r$  representa o movimento efetivo da massa do atuador, o sensor tem rigidez  $k_s$ , o amortecimento  $b_s$ , sendo o objeto de trabalho representado como um estado fundamental. Para dar o modo rígido determinado ao robô não conectado, a mola  $b_r$ . A força de entrada  $F$  representa o atuador da garra e a variável de estado  $X_r$ , mede a posição da massa do robô.

A equação proposta do sistema dinâmico por Jalani [19] é descrita pela função de transferência conforme a Eq. (1).

$$\frac{X_r(S)}{F(S)} = \frac{1}{[m_r s^2 + (b_r + b_s)s + k_s]} \quad (1)$$

Onde:

$m_r$  = massa (kg).

$b_r$  = Mola. (N.s / m)

$k_s$  = Sensor. (N / m)

$b_s$  = Amortecimento. (N.s / m)

$F$  = Força de entrada (N).

$X_r$  = Variável de estado.



Este modelo pode ser usado para ajustar a conformidade, alterando a rigidez e também o amortecimento do sistema.

Existem dois métodos proposto na literatura de controle de conformidade, que são: controle de conformidade passivo e controle de conformidade ativo. O controle de conformidade passivo depende do design mecânico da garra robótica, não usa os dados obtidos dos sensores. Já o controle de conformidade ativo, usa o atuador  $F$  para modificar o modelo do sistema, dependendo das estratégias empregadas de controle. As estratégias de controles podem ser proporcional-derivativo, proporcional-integral, controle *fuzzy*, neuro *fuzzy* ou atribuindo dados do sensor. O sensor mensura a força, possibilitando moldar a resposta do sistema.

De acordo com Lefebvre *et al.* [20], o controle de conformidade passivo aplica o elemento de elasticidade proporcionada pela estrutura mecânica, gerando conformidade nas tarefas executadas pela garra robótica. Enquanto o controle de conformidade ativo, utiliza o método de *feedback* de força.

## 2.4 SENSORES DE FORÇA

Os sensores táteis são utilizados para sentir a força aplicada no objeto, possibilitando segurança nos movimentos de manipulação executados pela garra robótica. Comercialmente existem vários sensores táteis, que foram utilizados nos trabalhos desenvolvidos por Tuffield e Elias [21] e Townsend [22], os dois utilizam sensores táteis desenvolvidos pela empresa Syntouchinc [23], Fig. 4.

Figura 4: Sensor tátil [23]



Fonte: Syntouchinc 2020 [23].

As informações de força, temperatura e vibração, são integradas em um único sensor tátil, para que isso aconteça são utilizados, eletrodos sensíveis de impedância, termistores e hidrofones para fazer as leituras de informações. Isso possibilita que a garra robótica manipule o objeto com uma extrema delicadeza [24].

A utilização dos sensores táteis, reúnem diferentes tipos de atividades nos setores industriais [25]. Os sensores foram desenvolvidos através dos princípios físicos diferentes como: capacitivo, resistivo, óptico, ultrassônico, piezoelétrico, entre outros. Um sensor resistivo de força (*FSR – Force Sensitive Resistor*) é utilizado em uma garra robótica no trabalho desenvolvido por Sadun *et al.* [26].

Esse sensor tem como desvantagem uma limitação em sua área de contato, apresentando problemas na manipulação de objetos pequenos. A estrutura do sensor resistivo de força é constituída por uma camada adesiva externa, dois filmes de polímeros, um com substrato flexível com semicondutor impresso e outro com substrato flexível com eletrodos interdigitantes e um espaçador adesivo, conforme abaixo na Fig. 5. Ao pressionar a superfície do sensor aumentando a área de contato entre elas, diminui a resistividade do material [26], a resistência é inversamente variante com a força aplicada, ou seja, quanto menor a resistência, maior a força aplicada.

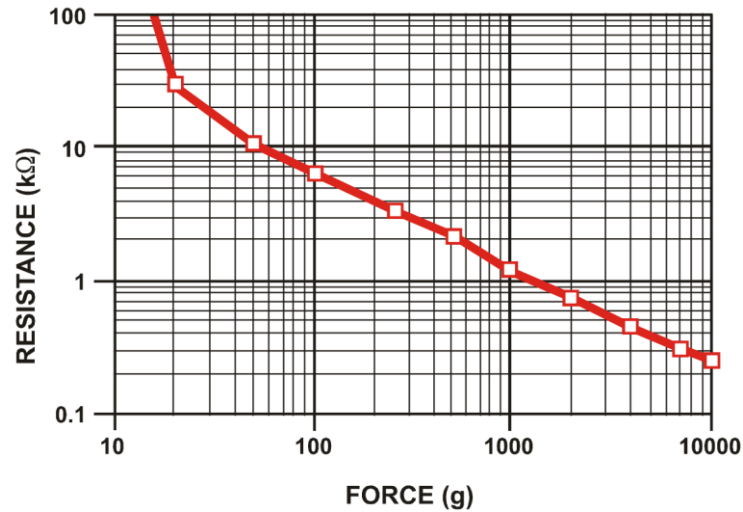
Figura 5: Vista explodida do sensor resistivo de força



Fonte: Adaptado de Interlink Electronics 2020 [29].

O comportamento do sensor resistivo é representado pela Fig. 6.

Figura 6: Comportamento do sensor resistivo de força



Fonte: Interlink Electronics 2020 [29].

A resistência no sensor resistivo de força é dada pela Eq. (2).

$$R_{FSR} = \frac{k}{F} \quad (2)$$

Onde:

$R_{FSR}$  = Resistência ( $\Omega$ ).

$K$  = Constante.

$F$  = Força (N).

Para a energização do sensor em microcontroladores é preciso utilizar um divisor de tensão. A saída de tensão no divisor é dada pela Eq. (3).

$$V_{out} = R_m * \frac{V}{R_m + R_{FSR}} \quad (3)$$

Onde:

$V_{out}$  = Tensão saída (V).

$V$  = Tensão de entrada fornecida pelo microcontrolador (V).

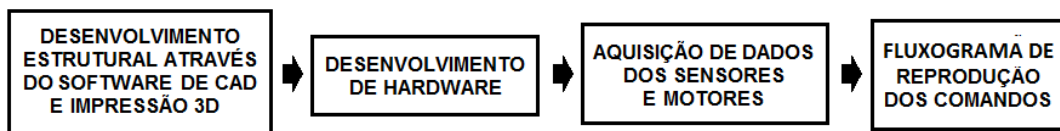
$R_m$  = Divisor de tensão ( $\Omega$ ).

$R_{FSR}$  = Resistência ( $\Omega$ ).

### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização do experimento, foram organizadas etapas que ajudaram a alcançar o objetivo do projeto, através de estratégias relacionadas e focadas nos pontos principais, conforme mostra o fluxograma na Fig. 7.

Figura 7: Fluxograma de etapas objetivas do projeto

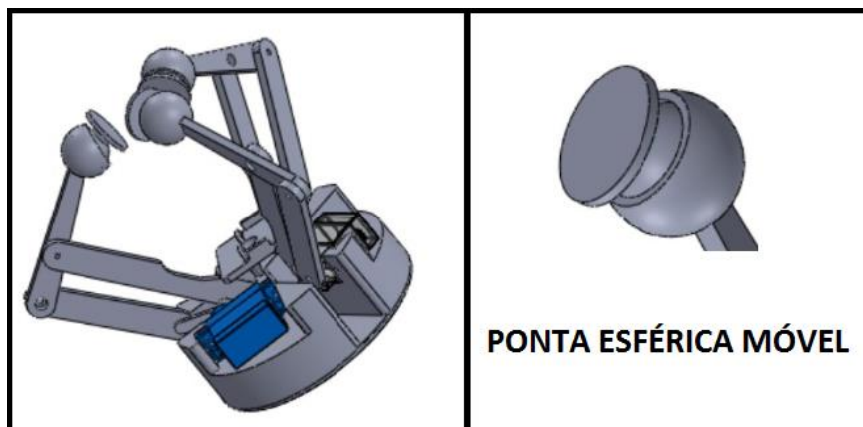


Fonte: Do autor (2021).

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO ESTRUTURAL ATRAVÉS DO SOFTWARE DE CAD E IMPRESSÃO 3D.

Através do *software* de CAD *SolidWorks*, foi modelada todas as peças que compõem a garra robótica. Uma das particularidades nessa parte do projeto foi a escolha da geometria das pontas dos dedos da garra, como mostra a Fig. 8.

Figura 8: Modelo desenvolvido no *SolidWorks*

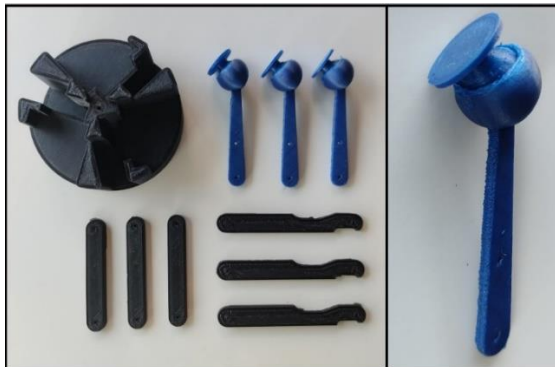


Fonte: Do autor (2021).

Precisava-se que os sensores de força situados nas pontas dos dedos, possuíssem a maior área de contato possível com objetos de diferentes formas, para isso, foi desenvolvido dedos com junção esférica nas pontas, desta forma, dependendo da posição do objeto ou o ângulo da superfície de contato, ela se posiciona automaticamente.

As peças foram impressas em uma impressora *Two Trees Bluer* desenvolvida pela empresa *Shenzhen Two Trees Technology Co. LTDA*, pelo processo de fusão e deposição *Fused Deposition Modeling (FDM)*, conforme Fig. 9. O material utilizado para o projeto foi o filamento em PLA, que possui vantagem de impressão por sua simplicidade de manuseio, e competitividade de custo mais baixo no mercado.

Figura 9: Peças desenvolvidas com impressão 3D



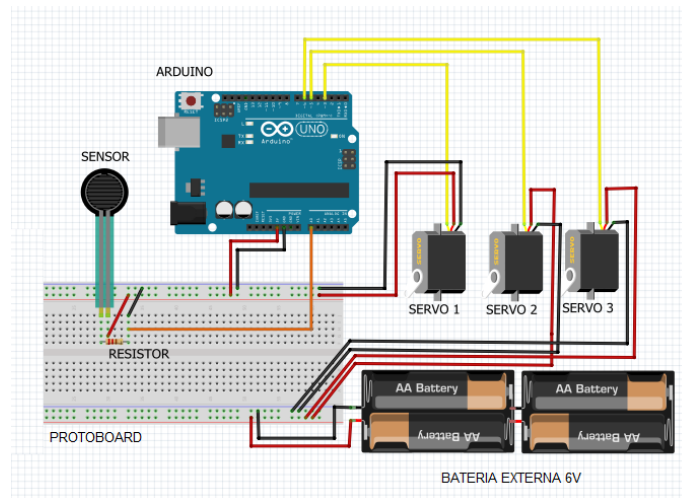
Fonte: Do autor (2021).

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE

Para o desenvolvimento do *hardware*, foi feita a seleção de todos os componentes e equipamentos eletrônicos, como sensores, microcontroladores, servos motores, resistores e plataformas virtuais de prototipagens.

Com a utilização da plataforma *Fritzing*, desenvolvida pela *Fachhochschule Potsdam (University of Applied Sciences Potsdam)*, na Alemanha, consiste em uma iniciativa de hardware de código aberto, com isso, permitiu-se a criação da montagem do hardware virtualmente, como visto na Fig. 10, logo abaixo.

Figura 10: Hardware desenvolvido



Fonte: Do autor (2021).

Foram utilizados três Servos 9g *Tower Pro SG90*, para a execução dos movimentos da garra. Ele possui três fios com as cores, laranja, vermelho e marrom. O fio marrom caracteriza o GND que serve para desviar sobrecargas evitando a danificação do equipamento. O fio vermelho caracteriza a alimentação do motor, onde será usado 5V da saída do controlador e 6V de alimentação externa e o fio amarelo caracteriza a leitura de dados de comando do controlador.

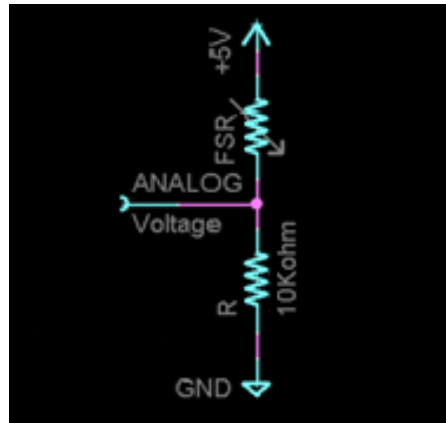
O servo motor recebe um sinal de PWM (*Pulse Width Modulation*), este sinal é 0 V até 5 V. O circuito de controle do servo monitora este sinal em intervalos de tempos. Se houver alguma alteração na largura do sinal, ele altera a posição do eixo para que a sua posição coincida com o sinal recebido, através da posição do potenciômetro.

Para a percepção tátil dos dedos, utilizou-se o sensor de força (*FSR® 402 - 13mm Circunferência x 56mm*), desenvolvido pela empresa *Interlink Electronics*. Ao pressionar a superfície do sensor aumentando a área de contato entre suas camadas, diminui a resistividade do material [26], a resistência é inversamente variante com a força aplicada, ou seja, quanto menor a resistência, maior a força aplicada. Sua faixa de detecção é de 0,1N à 10<sup>2</sup>N, faixa de pressão é de 1.5 psi ~ 150 psi (0.1 kg/cm<sup>2</sup> ~ 10 kg/cm<sup>2</sup>) e sua corrente máxima de força aplicada é de 1 mA / cm<sup>2</sup>.

Alimentado com uma tensão de 5V pelo microcontrolador Arduino, em seu pino GND possui um resistor de 10k Ohms 1/4W, para limitar o fluxo de corrente no circuito, conforme Fig. 11. Para a alimentação do sensor em microcontroladores foi

utilizado um divisor de tensão, obtido pela Eq. 3 e a resistência no sensor resistivo de força foi obtida pela Eq. (2), as mesmas citadas anteriormente.

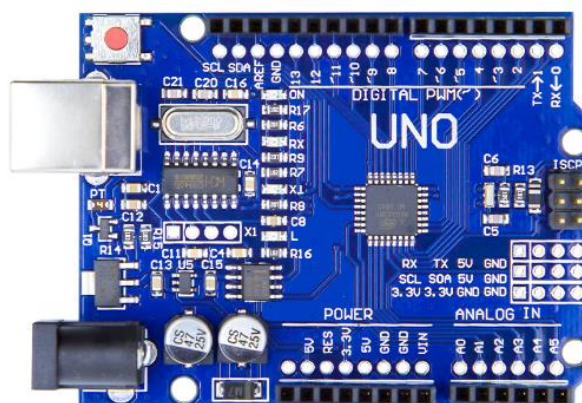
Figura 11: Esquemático do sensor *FSR 402*



Fonte: Do autor (2021).

Para o projeto foi utilizado o microcontrolador Arduino, conforme Fig. 12. O mesmo possui mais praticidades e vantagens para o projeto em questão. O Arduino utilizado nesse projeto foi o modelo Uno que é baseado no Atmega340ch, possuindo 14 pinos de entrada/saída digital, dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB.

Figura 12: Arduino Uno



Fonte: Do autor (2021).

O microcontrolador é programado com o software Arduino (IDE), através da linguagem (C++), pelo computador via USB e alimentado por um cabo de

comunicação. O Qd. 1 mostra os pinos utilizados para funcionamento e comunicação dos componentes entre a placa. Foi utilizada uma fonte externa de 6V para a alimentação dos servos, 1 e 2.

Quadro 1: Pinagem de comunicação entre componentes

Componentes	Portas Arduino			Pino PWM	Fonte Externa	
	A0	GND	5V			
Sensor	A0	GND	5V			
Resistor		GND				
Servo 1		GND	5V	3		
Servo 2				5	GND	6V
Servo 3				6	GND	6V

Fonte: Do autor (2021).

### 3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DOS SENSORES E MOTORES

Para a aquisição de dados, a programação do Arduino foi realizada através da leitura contínua do sensor, obtida pela movimentação dos servos. Para o sensor de força são estabelecidos limites mínimo e máximo, o mesmo para a movimentação dos servos, que ocorre em intervalos de ângulos predefinidos. Foi realizado testes no sensor e servo para análise de leitura de respostas, emitida por eles.

Para alcançar um determinado ângulo informado pelo sensor, o servo irá se mover um intervalo por ciclo, com isso, entram em operação o sensor de pressão, que caso detecte um objeto impedindo o fechamento da garra, os servos ficam mantidos na posição atual, evitando danos no objeto encontrado.

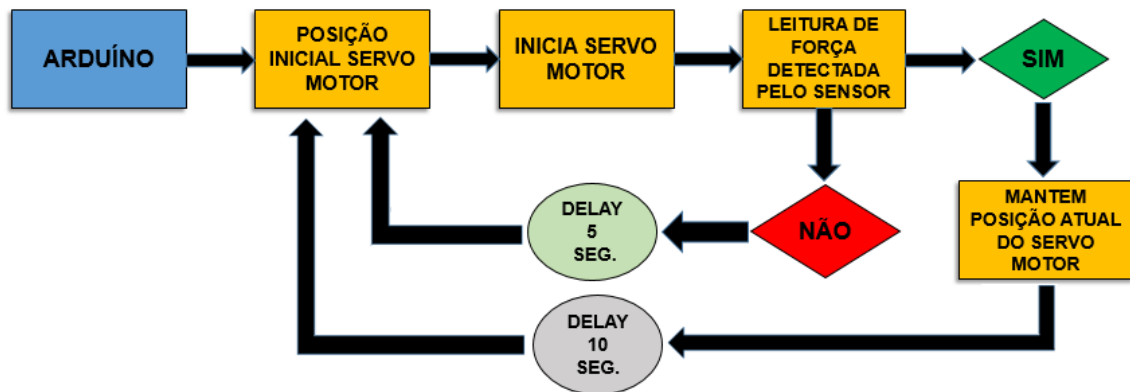
O controle de conformidade ativo do sistema, foi obtido através da Eq. 1, citada anteriormente. Caso o sensor não detecte nenhuma pressão, a garra abre voltando para seu estado inicial, realizando o ciclo novamente.

### 3.4 FLUXOGRAMA DE REPRODUÇÃO DOS COMANDOS

Foi elaborado um fluxograma que exemplifica toda a lógica de programação utilizada no Arduino para os movimentos reproduzidos pela garra robótica.



Figura 15: Fluxograma de reprodução de comandos



Fonte: Do autor (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação realizada para este estudo, iniciou-se através de testes de forças submetidas pela garra robótica com sensoriamento tátil em quatro níveis de sensibilidades que possui *range* de 70 (alta) até 900 (baixa), Qd. 2, em objetos com materiais, características e densidades diferentes, onde quanto mais maciço o objeto, maior foi a força aplicada. Os objetos apresentaram dados e comportamentos distintos que serão demonstrados em sequência.

Quadro 2: Níveis de sensibilidade

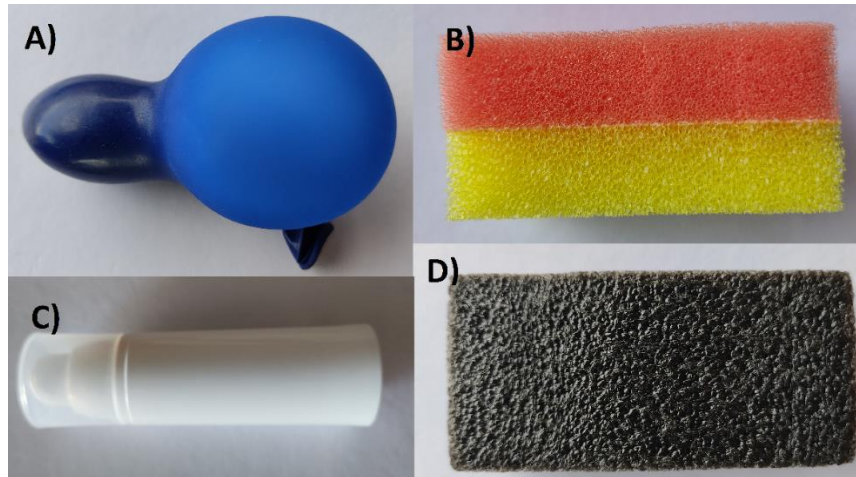
Nível	Sensibilidade	Objeto
1	70	Balão
2	300	Esponja
3	600	Espuma antiestática
4	900	Frasco aerosol

Fonte: Do autor (2021).

### 4.1 OBJETOS UTILIZADOS

Para a coleta de dados, foram escolhidos objetos com materiais que exibissem respostas físicas e computacionais através de forças aplicadas em suas superfícies conforme mostra Fig. 16.

Figura 16: (A) balão, (B) esponja, (C) frasco aerosol e (D) espuma antiestática



Fonte: Do autor (2021).

#### 4.1 COLETA DE DADOS

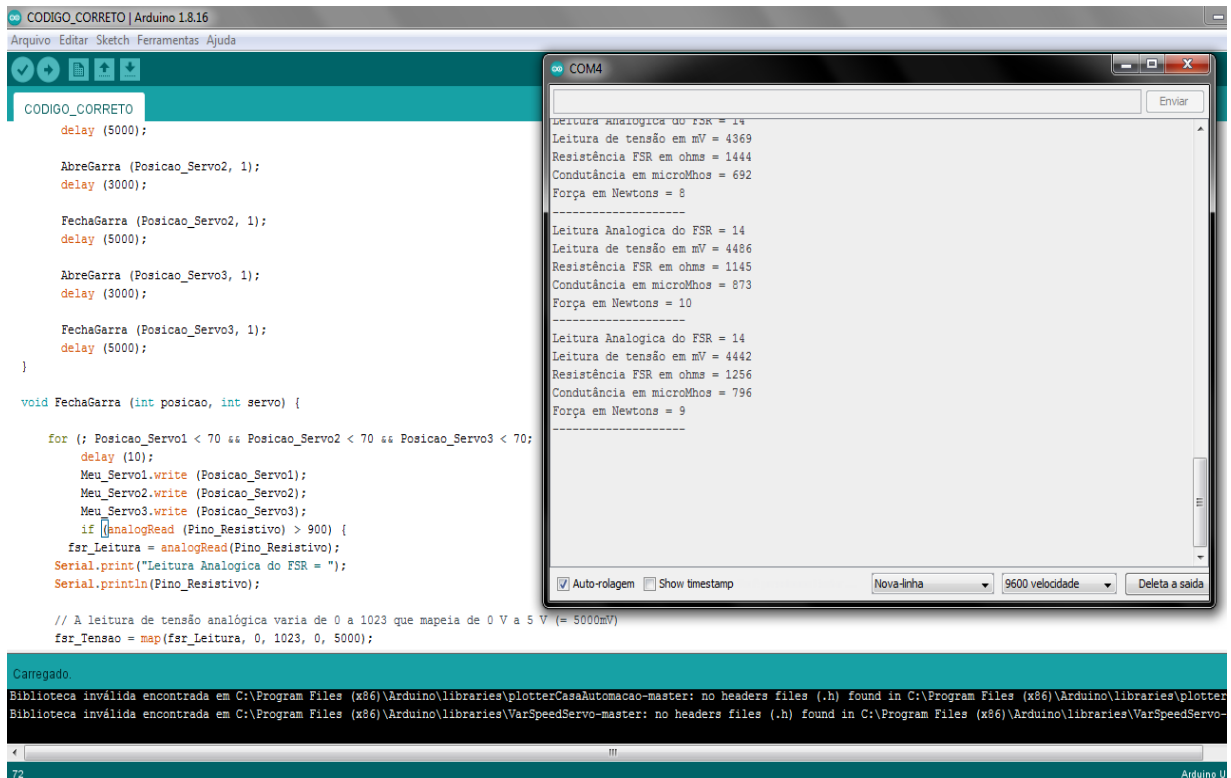
A partir da garra com o sistema tátil completamente montado Fig. 17, foram coletados todos os dados através do monitor serial do Arduino, Fig. 18. Após a coleta foram catalogados e estudados com elaborações de gráficos que permitem contrapor respostas alimentando ainda mais todo o estudo teórico realizado para este projeto.

Figura 17: Garra com o sistema tátil



Fonte: Do autor (2021).

Figura 18: Monitor serial com os dados



Fonte: Do autor (2021).

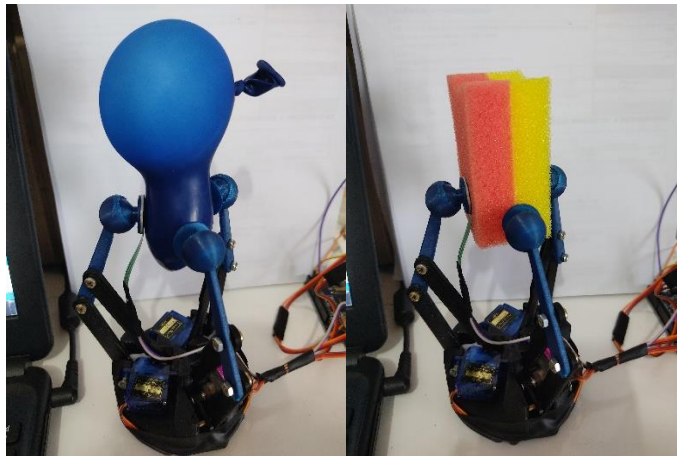
Serão apresentadas em sequência, imagens dos testes realizados nos objetos selecionados. Para o primeiro teste com o balão e a esponja, foi ajustada a sensibilidade tátil do sensor para que ao fechar a garra, Qd. 3, a força exercida nas áreas de contatos não deformassem sua superfície, como percebeu-se conforme Fig. 18. Para os testes feitos com a espuma antiestática e o frasco de aerosol a sensibilidade estava baixa, fazendo com que a garra utilizasse toda a sua força, Qd. 4, Fig. 20.

Quadro 3: Dados obtidos com o balão e a esponja

Balão	Valores	Esponja	Valores
Leitura Analógica do Sensor FSR	81	Leitura Analógica do Sensor FSR	312
Leitura de tensão ( mV )	884	Leitura de tensão ( mV )	3958
Resistência FSR ( Ω )	46561	Resistência FSR ( Ω )	2632
Condutância em microMhos ( μU )	21	Condutância em microMhos ( μU )	379
Força (N)	0	Força (N)	4
Sensibilidade	70	Sensibilidade	300

Fonte: Do autor (2021).

Figura 19: Teste com balão e esponja



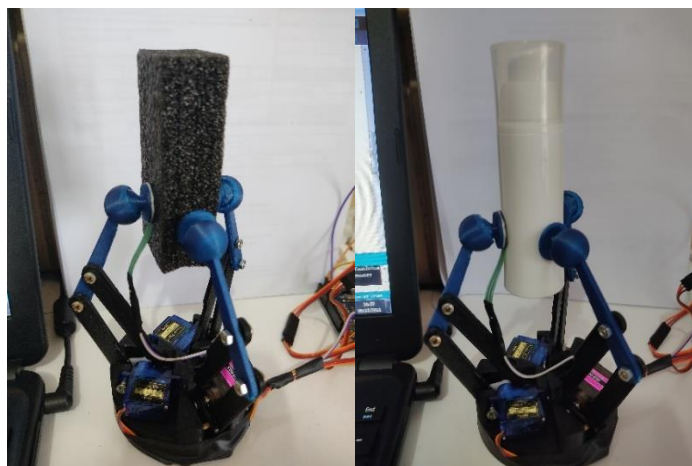
Fonte: Do autor (2021).

Quadro 4: Dados obtidos com a espuma antiestática e o frasco de aerosol

<b>Espuma antiestática</b>	<b>Valores</b>	<b>Frasco de Aerosol</b>	<b>Valores</b>
Leitura Analógica do Sensor FSR	619	Leitura Analógica do Sensor FSR	921
Leitura de tensão ( mV )	4403	Leitura de tensão ( mV )	4512
Resistência FSR ( $\Omega$ )	1355	Resistência FSR ( $\Omega$ )	1145
Condutância em microMhos ( $\mu\text{U}$ )	738	Condutância em microMhos ( $\mu\text{U}$ )	875
Força (N)	9	Força (N)	10
Sensibilidade	600	Sensibilidade	900

Fonte: Do autor (2021).

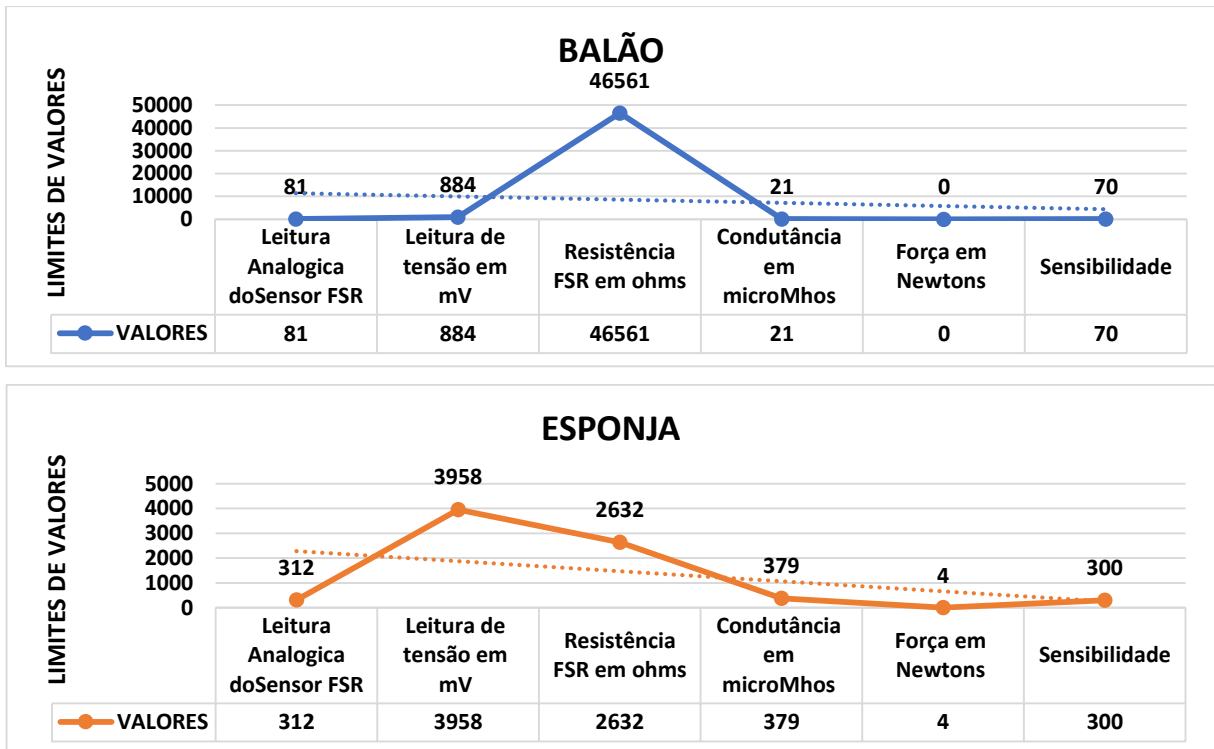
Figura 20: Teste com espuma e frasco de aerosol



Fonte: Do autor (2021).

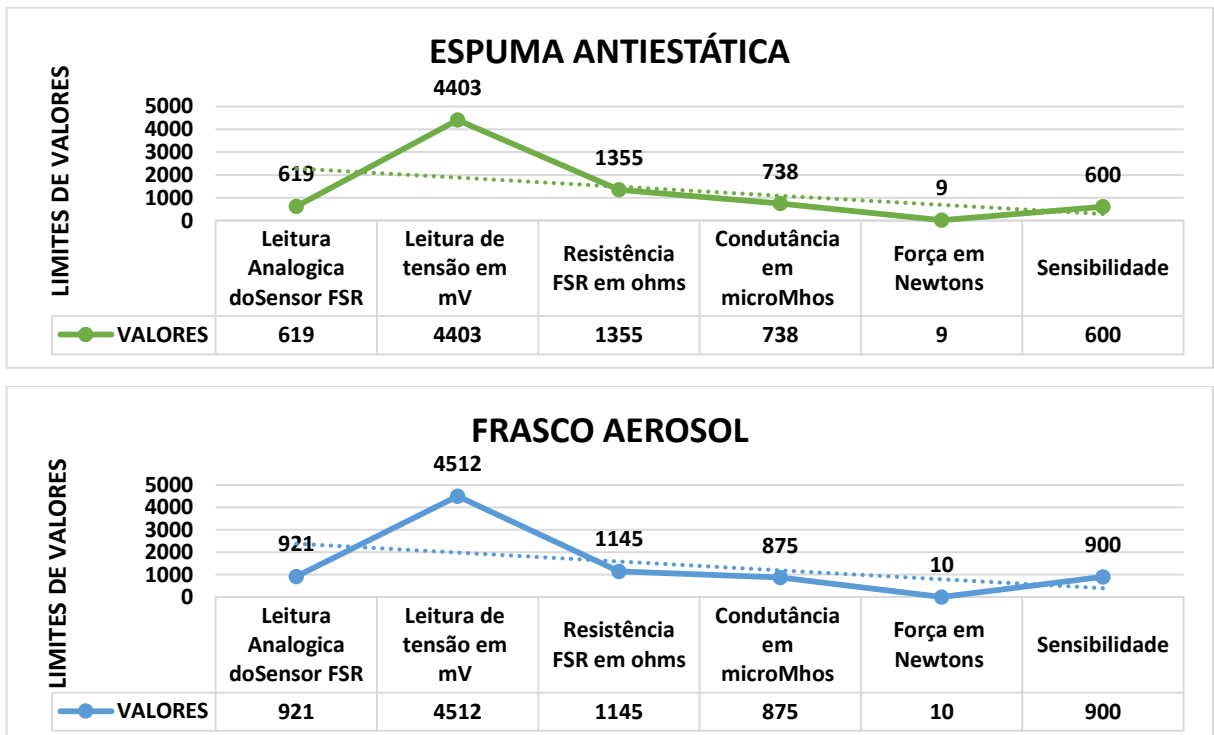
Com todos os dados coletados foi possível plotar os gráficos para uma análise técnica. Com os gráficos, percebemos todas as oscilações correspondentes em cada variável, justificando todo o estudo teórico realizado para este projeto.

Figura 20: Gráfico de dados obtidos do balão e da esponja



Fonte: Do autor (2021).

Figura 21: Gráfico de dados obtidos da espuma e do frasco de aerosol

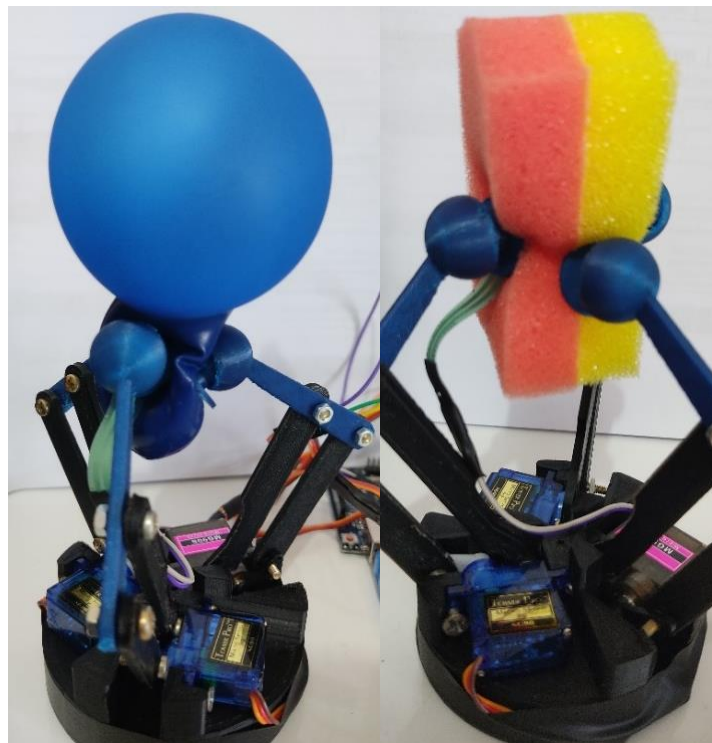


Fonte: Do autor (2021).

Ao pressionar a superfície do sensor aumentando a área de contato, diminui a resistividade do material, a resistência é inversamente variante com a força aplicada, ou seja, quanto menor a resistência, maior a força aplicada. Podemos concluir anteriormente através dos gráficos da Fig. 20, que setando a sensibilidade em 70 e 300, a resistência está baixando gradativamente, aumentando a força, tensão e a condutância. Na Fig. 21, a sensibilidade está setada em 600 e 900, fazendo com que a força alcance o limite máximo do sensor, que possui a variação de 0 a 10N, consequentemente faz com que a tensão também alcance quase o limite máximo, onde possui variação de 0 a 5V. A condutância aumentou, conduzindo a passagem de corrente elétrica.

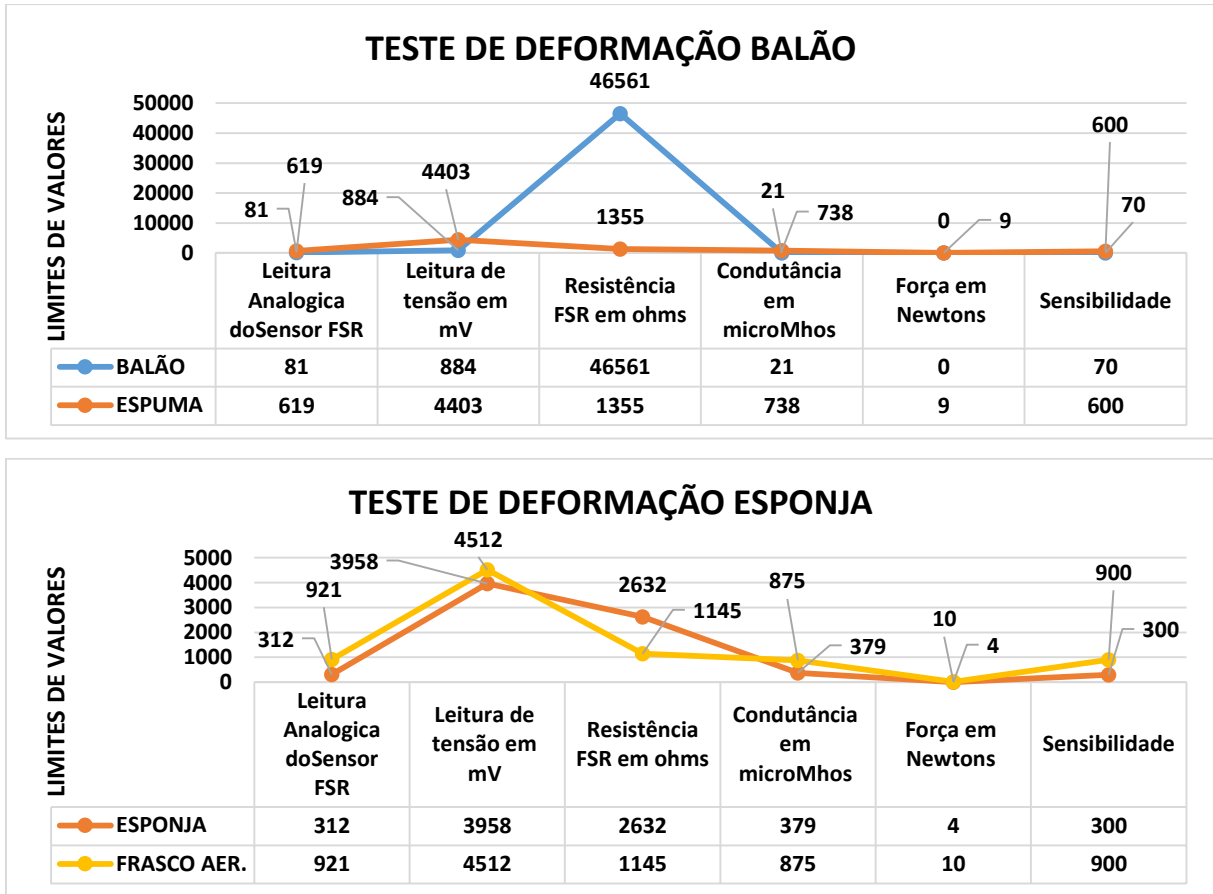
Foram feitos testes com a sensibilidade trocada, como nos exemplos a seguir, utilizou-se o nível de sensibilidade da espuma antiestática para testar a força exercida no balão e o nível de sensibilidade do frasco de aerosol para testar a força exercida na esponja, fazendo com que ocorresse a deformação dos objetos, conforme observamos na Fig. 22 e graficamente na Fig. 23.

Figura 21: Teste sensibilidade trocada



Fonte: Do autor (2021).

Figura 21: Gráfico de dados confrontados do balão/espuma e esponja/frasco aerosol



Fonte: Do autor (2021).

Comprovou-se que a força aplicada nestes objetos através do último teste, ultrapassou o limite de resistência estrutural do objeto, ocorrendo assim sua deformação.

#### 4.2 CUSTOS DO PROJETO

Para o desenvolvimento foram analisados todos os materiais e seus custos, Qd. 5, para atingir o menor valor possível gasto, obtendo um projeto acessível financeiramente e com uma estrutura mecânica e eletrônica satisfatória. Optou-se por componentes eletrônicos de fácil acesso, através da compra por meio internet. A parte estrutural foi desenvolvida com impressão 3D, com um filamento polímero de baixo custo que atendessem os requisitos mecânicos.

Quadro 5: Custos do Projeto

Componentes	Características	Unidades	Valores(\$)
Servos	SG 90 (9g)	x 3	R\$ 13,90
Sensor	FSR 402	x 1	R\$ 75,00
Arduino	UNO	x 1	R\$ 70,00
Protoboard	400 pontos	x 1	R\$ 13,90
Polímero	PLA	x 1	R\$ 109,00
Resistores	10 k	x 20	R\$ 8,00
Bateria externa	6V	x 1	R\$ 47,90
Fios Jumpers	conexões	x40	R\$ 14,90
		<b>Total:</b>	<b>R\$ 352,60</b>

Fonte: Do autor (2021).

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como proposta o desenvolvimento de um sistema sensorial tátil para garra robótica, no intuito de exercer a força correta sobre um objeto ao segurá-lo, sem danificar ou ocasionar alguma deformação. Com a utilização da tecnologia de impressão 3D, desenvolveu-se toda a parte estrutural da garra, com a ajuda de *software* de CAD foi construído o modelo computacional para realizar testes e soluções futuras. O material escolhido para esse trabalho foi o filamento em PLA, possuindo vantagem de impressão por sua simplicidade de manuseio e custo. Uma das particularidades nessa parte do projeto foi a escolha da geometria das pontas dos dedos com junção esférica, isso fez com que o sensor obtivesse maior contato, pois se ajustava automaticamente na superfície do objeto, contribuindo para a coleta de dados do sensor.

Com a utilização da robótica, através de microcontroladores, sensores, servos motores e outros componentes, juntamente com o computador foi possível fazer todas as coletas de dados. Através do Arduino e sua (IDE), foi desenvolvido o algoritmo responsável por todo o funcionamento do sistema sensorial juntamente com a garra, através da linguagem (C++). Com isso foi possível registrar dados fornecidos pelos servos, através de ângulos pré-definidos, desenvolvendo toda a movimentação da garra.

Os dados fornecidos pelo sensor de força (*FSR 402*), foram primordiais para a realização dos estudos sobre aplicações de forças em objetos. Através de suas leituras foi possível calcular todos os valores para cada variável resultante, como tensão, resistência, condutância, resultando em sensibilidades diferentes para cada



objeto testado. Com o método de controle ativo, obtendo o *feedback* de força, foi possível agarrar objetos frágeis sem danificá-los e objetos maciços aplicando forças maiores sobre estes.

Por fim, os resultados obtidos demonstram alcançar o objetivo de trazer uma iniciativa no auxílio de manipulações de objetos, dos mais frágeis ao mais resistentes, utilizando a mesma garra robótica, através de um sistema sensorial tátil capaz de mensurar a força que será aplicada em um objeto ao ser manipulado.

Para trabalhos futuros, as principais melhorias a serem implementadas são algumas modificações na estrutura mecânica e eletrônica da garra e o aperfeiçoamento para dedos sensoriais com articulações independentes. Os estudos indicam que esse novo aperfeiçoamento pode colaborar para o desenvolvimento de uma prótese robótica com custo mais acessível do que o encontrado no mercado.

## REFERÊNCIAS

[1] Z. Kappasov, J.-A. Corrales, and V. Perdereau, "Tactile sensing in dexterous robot hands review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 74, pp. 195 – 220, 2015. [Online].

Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889015001621>

[2] A. Singh, D. Singh, and S. Dwivedy, "Design and fabrication of a gripper for grasping irregular objects," 2016.

[3] K. Telegenov, Y. Tlegenov, and A. Shintemirov, "A low-cost open-source 3-d-printed threefinger gripper platform for research and educational purposes," vol. 3, 2015, pp. 638–647.

[4] A. L. C. Ottoni, «Introdução à robótica», *Material de estudo. I ORCV Olimpíadas de Robótica do Campo das Vertentes, Universidade Federal de São João del Rey*, 2010.

[5] *Introdução a Automação*, abr. de 2013. URL: <https://pt.slideshare.net/MerciaReginaS/introduo-a-automao>

- [6] V. Carrara, *Introdução à robótica industrial*. out. de 2015.
- [7] Boaretto, Neury. *Sistemas Flexíveis de Manufatura: O caso da unidade de Pato Branco do CEFET-PR*.
- [8] Groover, M. P. *Automação industrial e sistemas de manufatura*. 3. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2011. Disponível em [http://feevale.bv3.digitalpages.com.br/users/publications/9788576058717/pages/\\_1](http://feevale.bv3.digitalpages.com.br/users/publications/9788576058717/pages/_1).
- [9] P. Dario, M. C. Carrozza, E. Guglielmelli, C. Laschi, A. Menciassi, S. Micera e F. Vecchi, «Robotics as a future and emerging technology: biomimetics, cybernetics, and neuro-robotics in European projects», *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 12, n.º 2, pp. 29–45, jun. de 2005. doi: 10.1109/MRA.2005.1458320.
- [10] H. Gultekin, Ö. O. Dalgıç e M. S. Akturk, «Pure cycles in two-machine dualgripper robotic cells», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 48, pp. 121–131, 2017, issn: 0736-5845. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.03.004>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584516302137>.
- [11] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann e H. Schunk, *Robot grippers*. John Wiley & Sons, 2007.
- [12] E. M. L. D. Sousa, «Projeto de um gripper sub-atuado com aplicações em locomoção robótica», 2016.
- [13] J. M. Rosário, *Princípios de Mecatrônica*. Pearson, 2004.
- [14] L. Birglen, C. Gosselin, and T. Laliberté, *Underactuated Robotic Hands*. Springer, 2008.
- [15] M. A. D. Alba and R. Ponticelli, “An introductory revision to humanoid robot hands, instituto de automática industrial,” *Instituto de Automática Industrial, Carretera de Campo Real Km.0220; La Poveda, Arganda del Ray, 28500 Madrid Apartado 56; ESPANã*, 2005.
- [16] Y. Matsuoka, “Embodiment and manipulation learning process for a humanoid hand,” 1995.

- [17] J. Lenarcic, T. Bajd e M. M. Stanišić, «Robot Grasp», em *Robot Mechanisms*, Springer, 2013, pp. 291–311.
- [18] B. Gao, S. Yang, H. Jin, Y. Hu, X. Yang, and J. Zhang, “Design and analysis of underactuated robotic gripper with adaptive fingers for objects grasping tasks,” *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 987–992, 2016.
- [19] J. Jalani, “Robust active compliance controle for robot hand,” 2013.
- [20] T. Lefebvre, J. Xiao, H. Bruyninckx, and G. Gersem, “Active compliant motion: a survey.” *Advanced Robotics*, vol. 19, pp. 479–499, 2005.
- [21] P. Tuffield and H. Elias, “The shadow robot mimics human actions,” *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, vol. 30, no. 1, pp. 56–60, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/01439910310457715>.
- [22] W. T. Townsend, “The barrett hand grasper-programmably flexible part handling and assembly,” *Industrial Robot: An International Journal*, pp. 181–188, 2000.
- [23] Tecnologia de sensor que replica o toque humano. Disponível em: <https://syntouchinc.com/robotics/>. Acessado em: 20 de setembro de 2020.
- [24] P. S. Girão, P. M. P. Ramos, O. Postolache, and J. M. D. Pereira, “Tactile sensor for robotic applications,” *Measurement* 46, pp. 1257–1271, 2013.
- [25] R. D. D?Souza, A. Joshy, A. Mini, and N. Panicker, “The art of tactile sensing: A state of art survey,” *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, pp. Volume 26, No 3, pp 252–266, 2016.
- [26] A. S. Sadun, J. Jalani, and J. Sukor, “Force sensing resistor (fsr): A brief overview and the low cost sensor for active compliance control,” 2016.
- [27] S. I. Yaniger, “Force sensing resistor: A review of the technology,” *Electro International*, pp. 666–668, 1991.

[28] F. B. Hernandez, “Sensor de força utilizando fiber taper,” 2016.

[29] Interlink Electronics, Sensor Technologies. “FSR 402 Datasheet”. Disponível em: <https://www.interlinkelectronics.com/fsr-402>. Acessado em: 21 de setembro de 2020.

[30] Guia de materiais para impressão 3D. Disponível em: <https://craftcloud3d.com/material-guide/>. Acessado em: 11 de Outubro de 2020.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Clauberto Roberto Melo Marques, que durante todo o desenvolvimento desse trabalho, proporcionou valiosa ajuda através de seus conselhos e disponibilidade. Agradeço a Deus, minha família, em especial minha esposa Amanda Vieira, colegas, professores e a Universidade UniSatc. Obrigado a todos por terem compartilhado comigo os seus conhecimentos, participando da minha formação pessoal e profissional.