



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

GABRIEL FONSECA REIS DE SOUZA

Manipulação robótica: Projeto e desenvolvimento de uma garra para conectores RJ45

Recife

2022

GABRIEL FONSECA REIS DE SOUZA

Manipulação robótica: Projeto e desenvolvimento de uma garra para conectores RJ45

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Mídia e Interação

Orientadora: Judith Kelner

Coorientador: Djamel Fawzi Hadj Sadok

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

S729m Souza, Gabriel Fonseca Reis de
Manipulação robótica: projeto e desenvolvimento de uma garra para
conectores RJ45 / Gabriel Fonseca Reis de Souza. – 2022.
57 f.: il., fig., tab.

Orientadora: Judith Kelner.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn,
Ciência da Computação, Recife, 2022.

Inclui referências e anexo.

1. Mídia e interação. 2. Robótica. I. Kelner, Judith (orientadora). II. Título.

006.7 CDD (23. ed.) UFPE - CCEN 2022-158

Gabriel Fonseca Reis de Souza

“Manipulação robótica: Projeto e desenvolvimento de uma garra para conectores RJ45”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Mídia e Interação.

Aprovado em: 05/08/2022.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Judith Kelner
Centro de Informática / UFPE
(Orientadora)

Profa. Dra. Patricia Takako Endo
Universidade de Pernambuco – Campus Caruaru

Profa. Dra. Anna Priscilla de Albuquerque Wheler
Faculty of Business and Information Technology/ University of Ontario

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente meu pai e minha mãe, Antonio Carlos e Isabel, por serem minhas referências, sempre presarem pela minha educação e proverem um ambiente de união e suporte. À minha irmã, Carolina, que sempre me incentivou e esteve ao meu lado. Ao meu irmão, Bernardo, por me guiar e aconselhar nos novos desafios. À minha namorada, Marcella, que me deu força e coragem para prosseguir. Às minhas avós, Alceste e Lucia, que estiveram em todas as etapas da minha vida, vibrando e rezando por mim.

Aos meus amigos e colegas de trabalho dos grupos de pesquisa GRVM e GPRT, que colaboraram e forneceram conselhos importantes para o desenvolvimento dessa dissertação. Obrigado pelos conhecimentos compartilhados e momentos de alegria.

À Professora Judith, minha orientadora, e ao Professor Djamel, meu coorientador, pela confiança e oportunidade desde antes da realização deste trabalho. Obrigado por me ensinarem, incentivarem e acreditarem no meu potencial. À quem devo grande parcela do meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação.

Aos professores do programa de Pós-Graduação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados durante o curso.

RESUMO

Uma vez que as garras são os elementos responsáveis por interagir com o ambiente físico, a manipulação robótica tem uma importância relevante na automação de tarefas. Existem diversas garras robóticas no mercado, entretanto, nem sempre elas são adequadas aos sistemas de automação por não apresentarem confiabilidade ou terem custo elevado. Esse trabalho descreve o desenvolvimento de uma garra robótica para trabalhar em conjunto com um sistema autônomo de manutenção para Estação Rádio Base (ERB), o RBOT. A garra foi projetada com o foco em manipular conectores RJ45. O processo de desenvolvimento englobou a especificação de requisitos, passando por várias iterações de prototipagem até a realização de testes a fim de validar o uso da garra em um cenário real. Foram executados testes de manipulação do conector RJ45 de forma teleoperada e automática para simular a tarefa de retirar cabos de uma ERB. Os usuários ainda avaliaram o sistema através da escala numérica de usabilidade SUS. Ao fim, a garra *impactive* com dois dedos construída com peças impressas em 3D mostrou-se confiável e robusta o bastante para ser utilizada em laboratório.

Palavras-chaves: manipulação robótica; garra; automação; conector RJ45.

ABSTRACT

Since the grippers are the elements responsible for interacting with the physical environment, robotic manipulation is relevant in automating tasks. There are several robotic grippers on the market; however, they are not always suitable for automation systems because they are unreliable or have a high cost. This work describes the development of a robotic gripper to work together with an autonomous maintenance system for RBS, the RBOT. The gripper was designed with a focus on handling RJ45 connectors. The development process encompassed the specification of requirements, going through several iterations of prototyping to carrying out tests to validate the use of the gripper in a real scenario. In order to simulate the task of removing cables from an RBS, RJ45 connector manipulation tests were performed in a teleoperated and automatic manner. Users also evaluated the system through the SUS, a numerical usability scale. In the end, the two-finger impactive gripper built with 3D printed parts proved reliable and robust enough to be used in the laboratory.

Keywords: robotic manipulation; gripper; automation; RJ45 connector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de garras	19
Figura 2 – Exemplos de tipos de garras	21
Figura 3 – Componentes da garra <i>impactive</i>	23
Figura 4 – Garra para cabos de PCB	27
Figura 5 – Garra com diferentes objetos e variação de posição	28
Figura 6 – Etapas do processo de alinhamento do cabo	29
Figura 7 – Metodologia iterativa adotada para o desenvolvimento da garra	32
Figura 8 – Descrição conector RJ45	33
Figura 9 – Evolução das pontas da garra	36
Figura 10 – Garra paralela PhantomX AX-12	37
Figura 11 – Adaptação do mecanismo para o servo HS-805BB	38
Figura 12 – Evolução da garra Versão 2	39
Figura 13 – Detalhes da versão 3 da garra	40
Figura 14 – Garra Versão 3 em operação	41
Figura 15 – Acoplador da garra para o braço robótico UR5	42
Figura 16 – Cenário de teste	43
Figura 17 – Interface de realidade aumentada para teleoperação	44
Figura 18 – Diagrama de caixa do tempo de execução	47
Figura 19 – Histograma da pontuação do SUS	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos tipos de garra de acordo com seu uso	25
Tabela 2 – Comparação das garras quanto aos requisitos	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DOF	<i>Degrees of Freedom</i>
ERB	Estação Rádio Base
FFF	Fabricação com Filamento Fundido
LS	<i>Lean Startup</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PLA	Plástico Ácido Polilático
RBOT	<i>RBS Frontplane Operation</i>
SUS	<i>System Usability Scale</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	PREENSÃO ROBÓTICA	17
2.2	CLASSIFICAÇÃO DE GARRAS	18
2.2.1	<i>Ingressive</i>	21
2.2.2	<i>Astrictive</i>	22
2.2.3	<i>Contigutive</i>	22
2.2.4	<i>Impactive</i>	23
2.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE GARRA	24
3	TRABALHOS RELACIONADOS	26
3.1	GARRAS ROBÓTICAS	26
3.2	SISTEMAS PARA AUTOMAÇÃO	30
4	GARRA PROPOSTA	31
4.1	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	32
4.1.1	Definição de requisitos	32
4.1.2	Modelagem	34
4.1.3	Prototipação	34
4.1.4	Testes	35
4.2	EVOLUÇÃO DO DESIGN DA GARRA	36
4.2.1	Versão 1	37
4.2.2	Versão 2	38
4.2.3	Versão 3	40
5	VALIDAÇÃO ATRAVÉS DE TESTES	43
5.1	CENÁRIO	43
5.2	TESTE	45
5.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	47

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
6.1	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A – QUESTIONÁRIO SUS	55

1 INTRODUÇÃO

Uma Estação Rádio Base (ERB) é um tipo de equipamento que conecta uma ampla gama de dispositivos de telecomunicações como smartphones, modems sem fio e até laptops para o núcleo da rede da operadora de telecomunicações. Considerando o crescimento das redes móveis de última geração, procedimentos de manutenção melhores e mais rápidos serão necessários para aumentar a confiabilidade e estabilidade do serviço de celular. Atualmente, a maior parte da manutenção ainda é feita manualmente por funcionários treinados, resultando em uma tarefa custosa e dispendiosa. Contudo, assim como outras áreas da indústria estão introduzindo robôs em suas tarefas (Rahman et al., 2019; Ronny Salim Lim et al., 2011; KU et al., 2020), acredita-se que em breve, muitas, senão todas, as tarefas de manutenção serão realizadas por robôs autônomos equipados com ferramentas especializadas, incluindo a manutenção da ERB e dispositivos de rede. A manutenção de forma autônoma ou teleoperada permite aumentar a confiabilidade na sua realização, prover maior segurança aos operadores e agilizar a solução de problemas.

De acordo com D'Amore (2009), cabos defeituosos representam de 50% a 60% de todas as causas de manutenção de ERB; portanto, sistemas de manutenção autônomos e teleoperados, para o plano frontal de ERB, devem identificar cabos com defeito e serem capazes de manipulá-los para corrigir possíveis problemas de conectividade.

Garras robóticas, ou efetores finais como também são conhecidos, ganharam amplo interesse dos pesquisadores que trabalham com automação industrial. A garra é o elo entre o robô e o objeto de trabalho a ser manipulado; ela está para o robô assim como a mão está para o humano. No entanto, não é fácil imitar a mão humana, que é extremamente complexa e tem uma quantidade grande de graus de liberdade, também chamado pelo termo em inglês *Degrees of Freedom* (DOF), totalizando 22 DOF ao contabilizar os dos cinco dedos e os do pulso. A mão humana é considerada hábil, pois se adapta bem a vários cenários e consegue manipular uma grande variedade de objetos. Os cientistas inspiram-se nela e tentam desenvolver uma garra que seja tão habilidosa quanto a mão do ser humano.

Devido a crescente demanda por automação de tarefas e, através das pesquisas bibliográficas, não ter sido encontrado qualquer sistema desenvolvido para manipulação de cabos com conectores de telecomunicação, torna-se necessário implementar soluções que visem agilizar e baratear a manutenção de sistemas de telecomunicação. Tais soluções também pretendem

melhorar os serviços prestados pelas operadoras, tornando-os mais confiáveis e estáveis.

Algumas soluções de automação, como a desenvolvida pela Tripp Lite, (ROBOTIC... , 2021), que será descrita no Capítulo 3, utilizam o sistema de manipulação integrado com os equipamentos de rede. Dessa forma, não é possível implementá-la em ambientes já em funcionamento. Assim, o custo para adotá-la tende a ser alto, podendo até tornar inviável sua implementação. Além da aquisição do sistema de automação, muitas vezes é necessário adaptar os objetos de trabalho e realizar mudanças no ambiente para alocar os equipamentos de automação. O que torna o desenvolvimento de sistemas compatíveis com ambientes já em operação relevante.

Uma vez que a garra é apenas uma parte do sistema de manutenção, seu desenvolvimento ajudará outras tecnologias que exijam o uso de garras robóticas para manipulação de cabos e conectores. As garras industriais chegam a custar milhares de dólares americanos impossibilitando seu uso em algumas tarefas. Devido à sua complexidade, o custo de uma garra com a destreza da mão humana é proibitivo para muitas das tarefas robóticas simples. Uma forma para simplificar o design é limitar o número de DOF, reduzindo assim o custo de construção e controle, já que o número de elementos e atuadores são reduzidos.

Essa abordagem é bastante utilizada, uma vez que, a grande maioria das tarefas, 80%, pode ser realizada com apenas dois ou três dedos (CARBONE, 2012). Por exemplo, em uma linha de montagem, o processo de fabricação é normalmente separado em seções que são responsáveis por uma única tarefa cada, já que dessa forma a divisão dos processos facilita sua automação. Portanto, em vez de ter uma única garra universal capaz de realizar todos os processos, é utilizada uma garra específica para cada tarefa, tornando-a mais simples, e consequentemente mais barata.

Assim, este trabalho propõe uma solução na área de manipulação robótica, em especial, na manipulação de cabos e conectores utilizados em equipamentos de telecomunicação. Normalmente, uma ERB hospeda diversos tipos de cabos empregados para diferentes finalidades, sendo o RJ45 um dos mais utilizados. Dessa forma, o conector escolhido como objeto de trabalho foi o RJ45. Objetivando a menor interferência no ambiente operacional, esta solução foi direcionada para utilizar conectores RJ45.

Neste trabalho, será apresentada a garra projetada para ser utilizada com o sistema de manutenção automática e teleoperada no plano frontal da ERB, denominado *RBS Frontplane Operation* (RBOT), (SADOK et al., 2021). Onde serão descritos os principais pontos e soluções adotadas no desenvolvimento da garra e os testes realizados a fim de validá-la em uso real.

O RBOT compreende quatro subsistemas cooperativos:

- Atuador
- Visão
- Núcleo de processamento
- Manipulador

O atuador é responsável por mover objetos e realizar o trabalho físico necessário para realizar as tarefas de manutenção do plano frontal da ERB. A solução usa um braço robótico UR5 (UR5..., 2021). Embora seja um equipamento que proporciona movimento com alta precisão, ainda depende de sua interação com outros subsistemas para cumprir as tarefas de manutenção de forma teleoperada e automática.

O subsistema de visão compreende duas câmeras, uma conectada ao braço robótico e outra capaz de visualizar todo o cenário, inclusive o próprio braço. Essas câmeras são usadas para capturar imagens e gerar informações relevantes para o sistema e os usuários. As imagens são processadas pelo terceiro subsistema e subsequente que faz parte da arquitetura adotada, nomeadamente o núcleo de processamento.

Além do processamento de imagens e análise dos dados, o núcleo de processamento controla o braço robótico e o manipulador. Ele também é o intermediário entre a comunicação do operador, a tarefa de automação e as ações do robô. Por último, o foco deste trabalho, o manipulador (a garra robótica) é o responsável por manipular e pegar os cabos e conectores.

Apesar do sistema de manutenção, a manutenção dos cabos só é possível se houver ferramentas capazes de realizar conexão física e remoção de cabos dos dispositivos de telecomunicações. Portanto, a garra, tema desta dissertação, deve ser capaz de segurar um conector, conectar e desconectar os cabos das portas dos dispositivos de telecomunicações com segurança.

Como afirmado anteriormente, algumas das soluções existentes se aplicam a novos equipamentos de telecomunicações, estes foram construídos especificamente para automação e não funcionam com dispositivos já implantados, ou seja, sistemas legados precisam de novas soluções. Diante dessa constatação, este trabalho optou por desenvolver um projeto de garra que é flexível o suficiente para operar sobre hardware já existente.

Esta dissertação se concentra na descrição de um projeto de garra que manipula conectores Ethernet RJ45 em interfaces de equipamentos de rede e a avaliação da garra desenvolvida. Como o conector RJ45 é um dos principais tipos de conectores presentes em ERB e comuta-

dores de telecomunicações em geral, esse foi selecionado como um modelo (estudo de caso) para o desenvolvimento da garra. Além disso, o conector tem um mecanismo de travamento relativamente simples, o que o torna um bom ponto de partida para o projeto de desenvolvimento da garra. Após o desenvolvimento da garra, testes com usuários operando a garra de forma teleoperada e o uso da garra de forma autônoma foram realizados, ambos utilizando o braço robótico UR5.

Ao melhor do conhecimento do autor, este trabalho é o primeiro a considerar o desenvolvimento de garras para um sistema de manutenção para ERB, uma vez que a revisão da literatura conduzida no repositório do IEEE Xplorer não revelou publicações anteriores sobre garras ou produtos comerciais visando a manutenção automatizada de ERB.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo geral desenvolver e avaliar uma garra robótica capaz de pegar e manipular cabos de par trançados, do inglês *Unshielded Twisted Pair* (UTP), com conectores RJ45, dando suporte a manutenção remota de equipamentos de telecomunicação. Acoplada a um braço robótico, a garra atuará na manutenção de equipamentos de telecomunicação.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos temos:

- Revisar a literatura sobre os principais tipos de garras e características para manipular conectores e cabos;
- Desenvolver uma garra que conecte e desconecte cabos UTP com conectores RJ45 de equipamentos de telecomunicação;
- Validar o uso da garra em laboratório através de testes e pesquisa com usuários.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada nos seguintes capítulos além da Introdução. O Capítulo 2 define os principais pontos e conceitos sobre garras robóticas que foram utilizados para o desenvolvimento da garra proposta. No Capítulo 3, são relacionados os principais trabalhos relacionados sobre manipulação robótica e algumas garras desenvolvidas para trabalhar com conectores e cabos. A metodologia e as tomadas de decisões do projeto da garra são apresentadas no Capítulo 4. Também são descritos todos os passos do desenvolvimento do projeto da garra. Encontra-se no Capítulo 5 as avaliações com usuários realizadas para validar a garra e os resultados obtidos a partir dos testes. Por fim, o Capítulo 6 contém a conclusão da dissertação, as considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Existem diversos tipos de garras no mundo da robótica, entretanto, cada garra só consegue realizar um número limitado de tarefas. Nesse sentido, é importante investigar quais características são as mais indicadas para a tarefa em questão: manipular os conectores RJ45. Este capítulo abordará inicialmente os tipos de garras robóticas utilizadas na indústria e suas principais características. No próximo capítulo, serão analisadas as garras disponíveis para conectores e os trabalhos relacionados.

2.1 PREENSÃO ROBÓTICA

O processo de preensão abrange uma série de etapas importantes que envolvem não só pegar, manipular e liberar o objeto de trabalho mas também perceber o ambiente com o qual a garra vai interagir. Esse processo normalmente é subestimado uma vez que é muito natural para o ser humano (RAVAL; PATEL, 2016). O ser humano é capaz de analisar o ambiente, detectar exatamente onde está o objeto de trabalho e de forma hábil ajustar a mão para pegar o objeto com segurança. Assim, a tarefa de preensão é afetada tanto pelas características do objeto como pelas manipulações prévias e posteriores da preensão em si, sendo muito importante saber exatamente a localização e orientação do objeto de trabalho para uma preensão segura e estável (ZHANG et al., 2020).

Segundo Fantoni et al. (2014), a preensão pode ser dividida em 6 etapas, são elas:

- Aproximação do objeto;
- Contato com o objeto;
- Aumento de força no objeto;
- Prender com segurança o objeto;
- Movimentação do objeto;
- Liberação do objeto.

A etapa de **aproximação do objeto** conta com a movimentação da garra para ser posicionada perto do objeto. Em seguida, o **contato com o objeto** é considerado quando a garra

toca o objeto ou em que a força de prensão começa a atuar no objeto, como nos casos de prensão por ímã ou de sucção. O **aumento de força no objeto** deve ocorrer até o limite para não danificá-lo e chegar no próximo passo, que é conseguir **prender com segurança o objeto**. No momento da **movimentação do objeto**, é essencial que ele não mova em relação à garra até chegar na última etapa de **liberação do objeto**. Cada etapa deve levar em consideração as forças atuantes no objeto e seu posicionamento e orientação.

De acordo com Wolf, Steinmann e Schunk (2005), o design da garra é influenciado fortemente por dois parâmetros principais: a) um é a natureza do objeto de trabalho em si; e b) o outro é a movimentação realizada pela garra durante o processo de manipulação. As características do objeto de trabalho, peso, forma e material, delimitam diretamente o tipo de prensão da garra para segurar o objeto de forma segura. Já o mecanismo utilizado para movimentar os dedos da garra e o atuador necessário para suportar as forças da cinemáticas, são influenciados principalmente pela movimentação da garra e também pelo objeto de trabalho.

As trajetórias para pegar a peça de trabalho e levar para as posições de interesse são críticas para o projeto da garra. O fato de haver movimentação do objeto, há além do peso, forças inerciais envolvidas. As acelerações podem mudar a distribuição dos esforços na garra e, conseqüentemente, precisam ser analisadas com cuidado. Esses são dois pontos principais a serem estudados no início do desenvolvimento de uma garra, uma vez que o posicionamento do objeto no momento de agarrá-lo e seu formato geométrico pode exigir garras completamente diferentes.

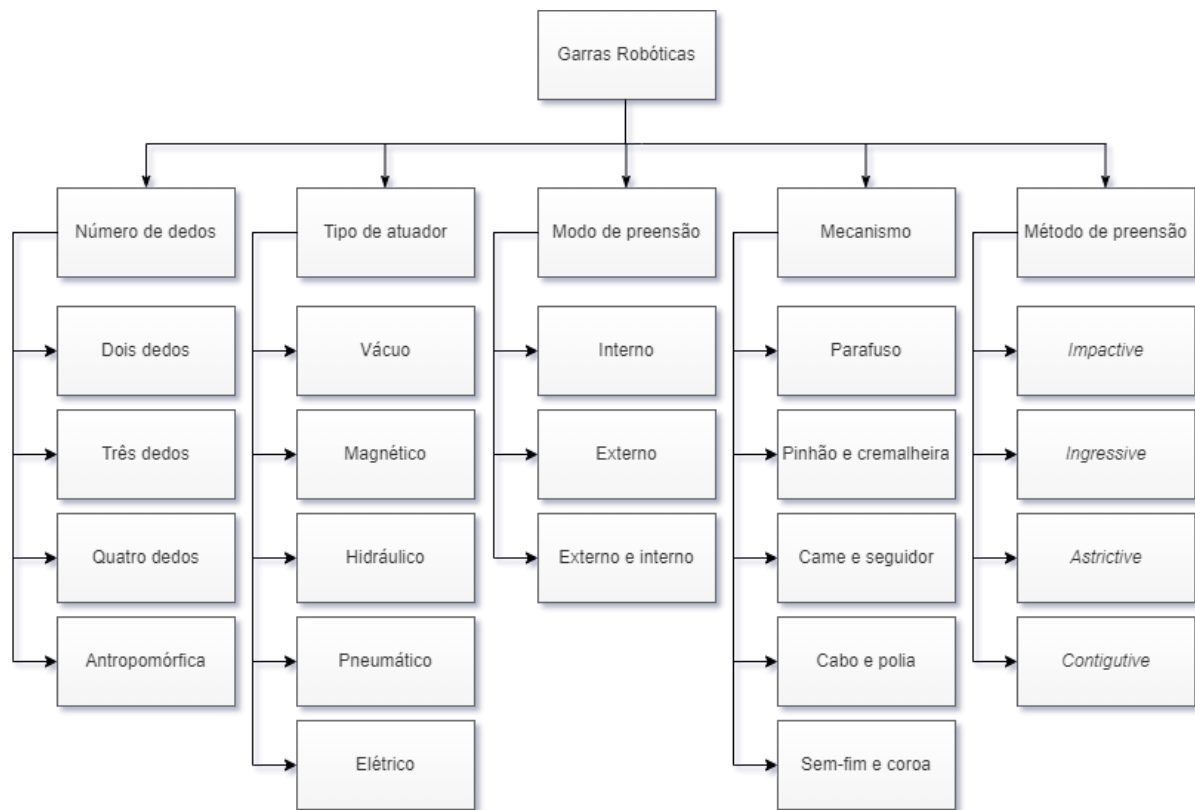
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE GARRAS

A indústria continua investindo fortemente na automação de seus processos e, conseqüentemente, o uso de robôs para realização de tarefas vem ganhando espaço. Com a diversidade das tarefas, e as especificidades de cada uma, há uma grande variedade de garras robóticas e efetores finais. Esses manipuladores podem ser amplamente classificados em categorias de acordo com seu design, cadeia cinemática, tipo de atuador e funções. Entretanto, a classificação pelo método de prensão é a principal forma aceita pelos pesquisadores.

A Figura 1 resume as principais categorias utilizadas para classificar uma garra (RAVAL; PATEL, 2016). É importante salientar que essas classificações não são excludentes, e que é possível classificar uma garra em mais de uma categoria.

Uma forma bastante comum de classificar algumas garras é de acordo com o número de

Figura 1 – Classificação de garras



Fonte: Adaptada de (RAVAL; PATEL, 2016)

dedos. Elas podem ter vários graus de liberdades e ainda serem subclassificadas em subatuada. As garras subatuadas se destacam por conseguirem pegar objetos de trabalho com diferentes formas superficiais, envolvendo o objeto de forma a prendê-lo dentro da garra. Ela tem esse nome por ter menos atuadores do que DOF. Assim, sua pose pode mudar de acordo com o objeto que ela está segurando. Apesar de conseguir pegar um número grande de objetos, ela apresenta pouco controle de força e baixa estabilidade de posição. Sendo mais utilizada em cenários com uma grande quantidade de objetos e que não necessitam de precisão de posição.

As garras também podem ser classificadas de acordo com o tipo de atuador. Dessa categoria, as mais comuns são as garras elétricas, pneumáticas e hidráulicas. As garras a vácuo e magnéticas têm aplicações mais restritas já que os objetos de trabalho são mais específicos. As garras magnéticas só podem trabalhar com objetos feito em ferro. Já as garras a vácuo trabalham normalmente com objetos delicados no setor alimentício. As garras elétricas apresentam uma boa eficiência e não necessitam de nenhum sistema auxiliar de pressurização como as pneumáticas e hidráulicas.

Existem vários mecanismos capazes de levar o movimento do atuador para os dedos da

garra. Dessa forma, também é possível classificar a garra de acordo com o tipo de mecanismo utilizado. Os mecanismos de parafuso são operados por atuadores rotativos de forma que a rotação do parafuso faz um conjunto redutor deslizar sobre o parafuso, similar a uma porca. O dedo é conectado ao redutor de forma a transferir o movimento. É um sistema que consegue aumentar bastante a força de atuação e consequentemente baixar sua velocidade. O acionamento por cremalheira e pinhão converte tanto movimento linear em rotativo, quanto rotativo em linear. Apresenta uma boa conversão de torque que se mantém constante durante todo o curso. O acionamento por came e seguidor tem sua principal utilização na conversão de movimento circular em movimento oscilante, seja linear ou angular. O formato excêntrico do came ou da sua superfície de contato desloca o seguidor de forma cíclica. Assim, acoplando o dedo da garra ao seguidor, é possível imprimir um perfil bem definido de movimentação. O acionamento por cabo e polia é bem difundido já que permite mover todo o sistema de atuador para longe da garra. Isso possibilita criar garras mais esbeltas e simular o movimento do dedo humano. O cabo é tracionado a fim de transmitir a força do atuador para a ponta do dedo. O sem-fim coroa tem um funcionamento similar ao do parafuso, onde é utilizado para transmitir movimento em um único sentido, do sem-fim para a coroa. Pela própria configuração do mecanismo, a única forma de mover o dedo é pela rotação do sem-fim. Ou seja, em falta de energia, o dedo retém sua posição.

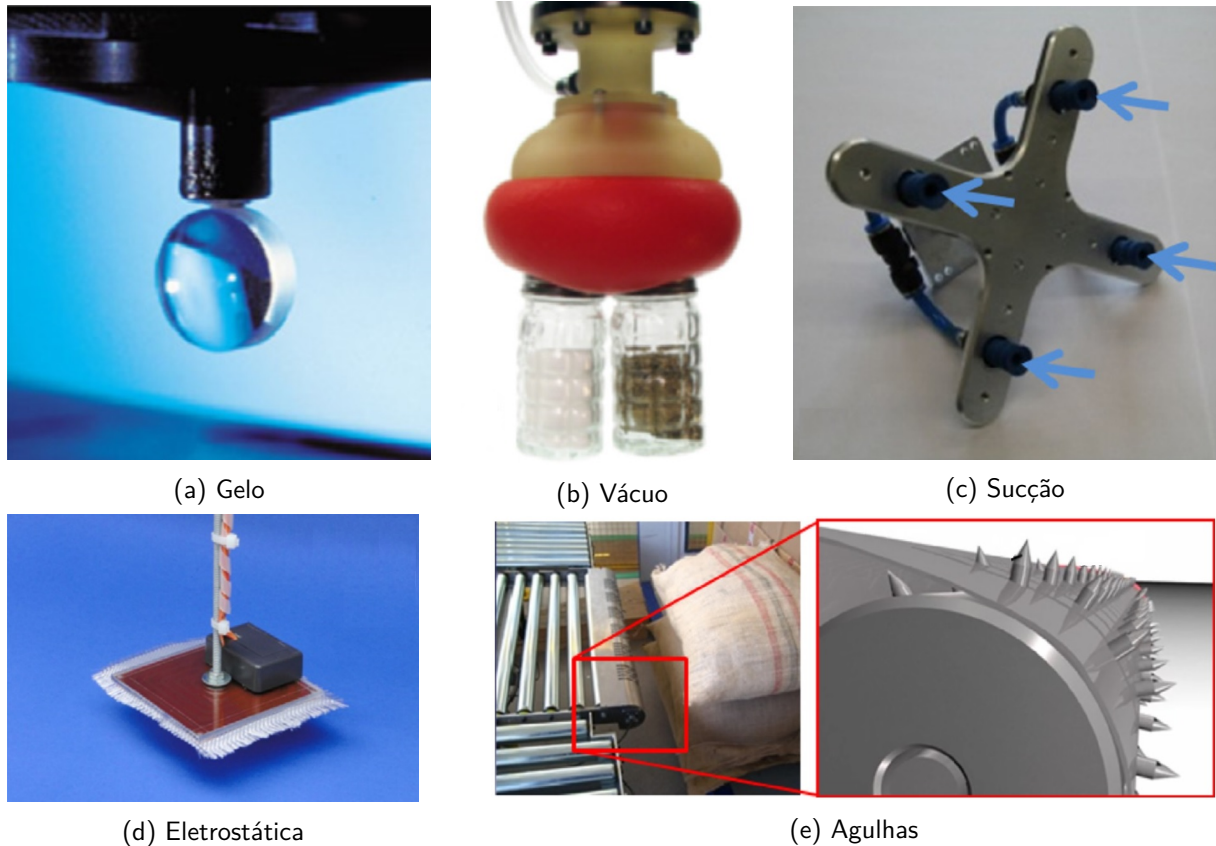
Em Tai et al. (2016), garras industriais são classificadas em dois tipos principais, garras para cenários conhecidos e garras para cenários desconhecidos.

O primeiro tipo é normalmente utilizado em linhas de fábricas, onde os objetos de trabalho são posicionados em orientações predefinidas facilitando a preensão do mesmo. Ele pode ser equipado com uma variedade de sensores para obter informações do ambiente e ajudar na preensão do objeto. Para nomear alguns sensores, eles incluem acelerômetros, ultrassom, sensor hall e célula de carga que permitem mensurar força, torque, deslocamento, velocidade e aceleração.

Já o segundo tipo de garra, para ambiente desconhecidos, utiliza técnicas mais avançadas como sistema de visão computacional, capaz de fornecer mais informações, e mecanismos que propiciam uma maior flexibilidade para pegar diferentes tipos de objetos. Compreensivelmente, a utilização desses sensores requerem algoritmos robustos para tratar os dados e um maior poder de processamento. Normalmente utilizados em ambientes que os objetos ficam dispostos de forma aleatória, essas garras tentam resolver o problema de flexibilidade e adaptabilidade.

A seguir, serão detalhados os principais tipos de garras de acordo com o método de preen-

Figura 2 – Exemplos de tipos de garras



Fonte: Adaptada de (FANTONI et al., 2014)

são. Dessa forma, as garras são classificadas em quatro grupos: (1) *ingressive*, (2) *astriptive*, (3) *contigutive* e (4) *impactive* (FUSTER, 2015) e (MONKMAN et al., 2007). Apesar de ser bem aceita mundialmente, essa classificação não apresenta termos correspondentes na língua portuguesa. Assim, neste trabalho, serão utilizados os termos propostos pelos autores Monkman et al. (2007) em inglês.

2.2.1 *Ingressive*

As garras *ingressive* manuseiam objetos que não possuem um ponto de apoio bem definido e são feitas de materiais porosos ou deformáveis. Para garantir uma preensão segura, as peças de trabalho são deformadas ou perfuradas. Assim, as garras *ingressive* geralmente são empregadas em indústrias específicas, limitando a gama de objetos de trabalho. Sua principal utilização é no manuseio de tecidos, como materiais de fibra de vidro, pois não causam danos aos mesmos. Na Figura 2e, é possível ver um protótipo de garra que utiliza agulhas para manipular sacas de café. As agulhas são fixadas de forma radial em um rolo que quando gira

prende a saca de café e a desloca de lugar. Um chapa de metal é responsável por separar a agulha da saca de café até que a próxima agulha repita o mesmo trabalho.

2.2.2 *Astrictive*

As garras *astricive* usam sucção a vácuo (Figuras 2b e 2c), força magnética ou eletrostática (Figura 2d) para pegar e segurar a peça de trabalho. Elas são amplamente utilizadas na indústria para manipular peças frágeis e quando não é desejável submetê-las a forças de compressão em suas superfícies. Outro cenário de uso é o manuseio de objetos grandes e pesados, onde as dimensões da peça de trabalho são maiores do que as dimensões da garra. Por causa das garras *astricive* terem dificuldades para pegar objetos irregulares, onde existe a descontinuidade da superfície, elas são mais utilizadas para manipular objetos de trabalhos planos e curvados com superfícies contínuas. Por exemplo, a pesquisa de Tomokazu et al. (2015) adotou uma membrana elastomérica e uma micro bomba de ar para desenvolver um efector final de sucção a vácuo adaptável a diferentes formatos e dimensões de peças de trabalho. Também foram analisados os tipos de objetos que a garra apresenta mais sucesso em manipular.

2.2.3 *Contigutive*

As garras *contigutive* requerem contato direto com a superfície da peça de trabalho. As forças químicas, de adesão térmica ou de tensão superficial são usadas para segurar o objeto. Seu uso é restrito a algumas tarefas, pois os adesivos tendem a não ser confiáveis e as forças de retenção são relativamente baixas. As garras *contigutive* são muito utilizadas na indústria têxtil para pegar e separar tecidos e também em micro-garras para manipular objetos leves. Uma vez que a força de tensão superficial tende a ser pequena, o método é adequado apenas para prender peças pequenas e leves (MONKMAN et al., 2007). Um exemplo é a microgarra, ver Figura 2a, utilizada para manipular lentes. Nessa, a ponta da garra é capaz de esfriar rapidamente e congelar uma pequena quantidade de água que faz o contato entre a garra e o objeto de trabalho. Para soltar o objeto, a garra esquentada até liquefazer a água.

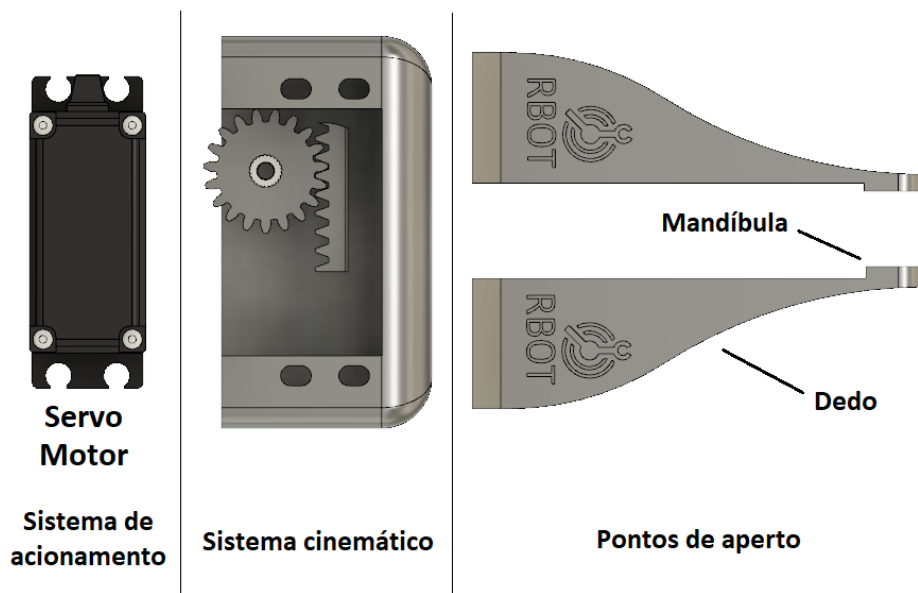
2.2.4 *Impactive*

As garras *impactive* realizam a preensão do objeto através do movimento de dois ou mais dedos capazes de realizar forças que agem contra a superfície do objeto. Tais forças são aplicadas através de elementos integrados à garra, responsáveis por pegar e segurar os objetos durante todo o processo de manipulação. As garras *impactive* são versáteis, podendo variar bastante de acordo com a tarefa e objeto a ser manipulado. Normalmente, a superfície de contato é projetada de acordo com a superfície da peça de trabalho. Podendo ser revestida em material macio com alto coeficiente de atrito para melhorar o contato entre o objeto e a garra (Chen et al., 2017).

Dentre os quatro grupos, esse tipo é o mais utilizado devido a sua capacidade de adaptação a diversos tipos de objetos. Além disso, pesquisas sobre garras adaptativas tiveram grandes avanços com a introdução de novos mecanismos (Liu; Chiu, 2018) e (Choi et al., 2017) e também com novos projetos para controle de garras (Sadun; Jalani; Jamil, 2016).

A fim de facilitar o entendimento deste trabalho, é importante desenvolver alguns conceitos e termos sobre garras *impactive*. Os principais componentes e estruturas das garras *impactive* podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – Componentes da garra *impactive*



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

O **sistema de acionamento** é responsável por mover os dedos para agarrar a peça de trabalho. Conta com um atuador, que transforma uma determinada forma de energia de

entrada (elétrica, hidráulica ou pneumática) em energia mecânica translacional ou rotacional. Cada tipo de acionamento tem suas vantagens e desvantagens que variam principalmente em velocidade, força, facilidade de uso, custo, acurácia e contaminação. Esses fatores são analisados visando atender os requisitos da garra.

Considerando uma preensão com dois dedos, o **sistema cinemático** é o mecanismo responsável por transmitir o movimento do sistema de acionamento para os dedos, incluindo a transmissão de força de um eixo para outro ou mudança da velocidade de rotação e torque. A relação entre a velocidade do atuador e do dedo e a relação de força aplicada no objeto são parâmetros a serem analisados no momento da escolha do mecanismo. Além disso, é o mecanismo que define a trajetória do movimento dos dedos durante a preensão, que pode ser: (a) translação retilínea, (b) translação curvilínea, (c) rotação, ou (d) roto-translação (CARBONE, 2012).

Os **pontos de aperto** incluem os dedos e a mandíbula, que é a parte que entra em contato com o objeto de trabalho e é responsável por aplicar força sobre sua superfície. Como pode-se esperar, um bom contato entre a garra e a peça de trabalho é essencial para uma preensão segura e geralmente é obtido usando (1) ajuste de forma ou (2) ajuste de força. A primeira técnica usa forças relativamente mais baixas e incorre em menos interferência com a peça de trabalho. Já a segunda, depende do atrito entre os dedos e a peça de trabalho e, portanto, para garantir uma preensão segura, exige forças mais elevadas.

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE GARRA

Este trabalho foca apenas nas garras *impactive*, elas apresentam estabilidade posicional, mantendo a posição e orientação do objeto. Por ter componentes rígidos, é possível saber com maior precisão a localização do objeto durante sua manipulação baseando-se apenas na posição e orientação do braço robótico. Essa é uma grande vantagem quando se compara com os outros tipos de garras citados anteriormente.

Outro ponto importante, é o procedimento para pegar o objeto de trabalho. Dependendo do cenário, os objetos podem ficar distribuídos aleatoriamente na região de trabalho ou organizados de forma a facilitar a tarefa de pegar o objeto. Saber onde o objeto está e sua orientação, permite utilizar garras sem sensores, uma vez que o robô consegue calcular as distâncias e movimentação necessária para alcançar o objeto com a garra.

O cenário proposto nesse trabalho será detalhado na seção 5.1, entretanto, nele, os objetos

de trabalho ficam dispostos em posições pré-definidas. Dessa forma, é possível utilizar uma garra *impactive* rígida sem sensores.

Tabela 1 – Comparação dos tipos de garra de acordo com seu uso

Tipos de objetos	Tipos de Garra			
	<i>Impactive</i>	<i>Ingressive</i>	<i>Astrictive</i>	<i>Contigutive</i>
Sólido com Superfície Plana				
Sólido com Superfície Curva				
Sólido com Forma Irregula				
Folhas Flexíveis				
Folhas Rígidas				
Objetos Frágeis				
Normalmente utilizada				
Raramente utilizada				
Não utilizada				

Fonte: Adaptada de (TAI et al., 2016)

De acordo com o que foi mostrado até aqui e conforme pode ser visto na Tabela 1, adaptada de Tai et al. (2016), dentre os diferentes tipos de garras, o *impactive* é o mais adequado para a tarefa de manutenção do plano frontal de uma ERB e seus equipamentos de comunicação.

A escolha reside no fato do objeto de trabalho ser rígido, possuir um formato irregular (com ressaltos e reentrâncias) e requerer um alto nível de precisão para ser inserido e removido corretamente de uma porta de interface do equipamento.

As garras *ingressive* seriam inviáveis uma vez que não é possível perfurar o objeto de trabalho sem causar dano a sua estrutura. Além de prover baixa precisão em sua manipulação. Assim, esse tipo de garra não foi considerada como uma opção logo de início. Alguns tipos particulares de garras *astricive*, conseguem pegar e manipular cabos e conectores, entretanto, não fornecem a precisão posicional exigida pela tarefa. Os outros tipos de garras *astricive*, magnéticos e de sucção, não conseguiriam pegar o conector por ele não ser magnético ou ter pequena área superficial, respectivamente.

Já as garras *contigutive*, também não se mostraram adequadas por não conseguirem fornecer uma força de preensão alta de forma confiável. Assim, as garras *impactive* se mostraram as mais adequadas e com maior chance de sucesso para manipular e realizar a tarefa com segurança.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

No escopo dessa dissertação de mestrado foi feita uma busca na base de publicações científicas IEEE Xplore pela combinação dos termos "Gripper", "Connector", "RJ45" and "Manipulation" que foram publicados entre os anos 2010 e 2020. A pesquisa no IEEE Xplore retornou 58 artigos. Através de uma análise pelos títulos e resumos dos artigos encontrados, não foi encontrada pesquisa relacionada e dedicada a garras robóticas para manipulação de cabos em equipamentos de rede.

Embora não se tenha conhecimento de uma solução que esteja diretamente relacionada à manipulação de cabos e conectores de comunicação, como o RJ45, pode-se argumentar que os trabalhos anteriores foram os responsáveis, em grande parte, por direcionar o projeto apresentado nesta dissertação. Além disso, algumas das soluções apresentadas aparecem no mesmo contexto geral, manutenção industrial com robôs e manipuladores robóticos.

3.1 GARRAS ROBÓTICAS

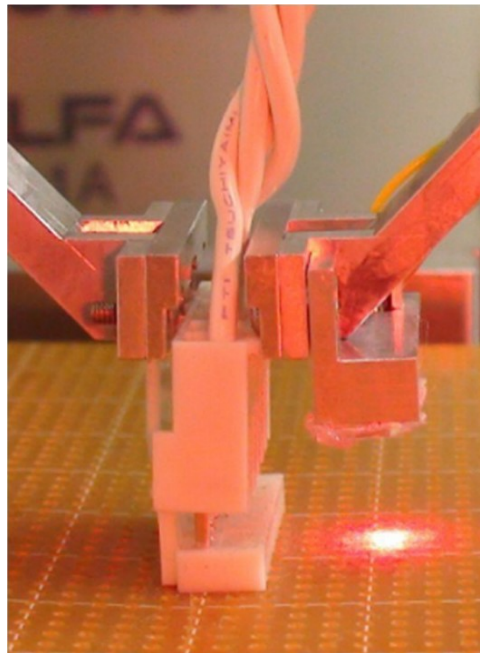
Em um cenário de automação, a maioria das peças de trabalho é adaptada ao efector final, seja na forma como estão dispostas ou pela sua própria estrutura. Por outro lado, os objetos do dia à dia são confeccionados para serem manipulados pela habilidosa mão humana. Comparando a quantidade de objetos que uma garra robótica consegue manipular, é compreensível estimar que será uma quantidade menor que a mão humana. Entretanto, não foi isso que os autores em Carbone (2012) apresentaram. Através de estudos estatístico, foi analisada a relação entre o número de dedos de uma garra, sua capacidade de manipular diferentes tipos de objetos e a complexidade do projeto. Foi apresentado no artigo que garras com dois dedos podem segurar de 60% a 70% dos objetos cilíndricos, paralelepípedos e piramidais. Isso justifica o elevado número de garras robóticas com dois e três dedos utilizadas na indústria.

Normalmente, as garras são projetadas para pegar apenas um tipo de objeto ou trabalhar em uma única tarefa. Nestes casos, são utilizadas garras específicas que, embora não sejam habilidosas, apresentam baixa complexidade e bom desempenho para a tarefa designada. Para tarefas onde a peça é bem definida e conhecida, o desafio para desenvolver uma garra é melhorar seu desempenho, tornando-a mais rápida, robusta, precisa e/ou inteligente. Em geral, é difícil projetar uma garra que seja hábil e de baixa complexidade ao mesmo tempo. A

habilidade vem da adaptabilidade de pegar e manipular diferentes peças de trabalho.

Apesar do aumento no número de pesquisas voltadas para garras capazes de agarrar vários tipos de objetos, elas ainda são complexas e pouco práticas para a maioria das tarefas que requerem precisão.

Figura 4 – Garra para cabos de PCB



Fonte: (CHEN et al., 2012)

Uma garra inteligente feita de alumínio e equipada com vários sensores foi desenvolvida por Chen et al. (2012). A tarefa desta garra é manipular cabos conectados à placa de circuito impresso, do inglês *Printed Circuit Board* (PCB), conectando-os e removendo-os da PCB. A garra *impactive* com dois dedos apresenta o formato desenvolvido especificamente para os conectores utilizados na PCB, como pode ser visto na Figura 4, e para acomodar vários sensores.

Como os conectores são objetos rígidos e com tolerâncias estreitas, a garra não precisa ser habilidosa. A garra conta com um sensor de proximidade a laser, um sensor para detectar a posição do conector através de uma câmera, um sensor flexível de carga para medir a força de preensão, um sensor infravermelho para medir distâncias dos objetos no cenário e um outro sensor de força para medir a força de encaixe dos conectores. Com esses sensores, a garra consegue detectar o alinhamento do conector, a deformação do PCB, a proximidade de objetos e a força de preensão durante o processo de conexão.

Os autores ainda desenvolveram um modelo para identificar o encaixe correto dos co-

nectores. Ainda segundo Chen et al. (2012), as garras da indústria eletrônica passaram por poucas mudanças e são tipicamente garras *impactive*, rígidas e apresentam elevada precisão dimensional.

Figura 5 – Garra com diferentes objetos e variação de posição



Fonte: (DOLLAR; HOWE, 2010)

Apesar de não ser relacionada com conectores, a garra desenvolvida por Dollar e Howe (2010) demonstra a importância de dispositivos que contribuam para um posicionamento preciso necessário para algumas tarefas que utilizam garras. A garra *subatuada* apresenta quatro dedos articulados e apenas um atuador elétrico. Através de dedos com mecanismos compatíveis, do inglês *compliant mechanism*, a garra é capaz de acomodar a incerteza do cenário não estruturado. Ela permite agarrar vários tipos de objetos com sucesso, inclusive na presença de grandes erros de posicionamento, como demonstrado na Figura 5.

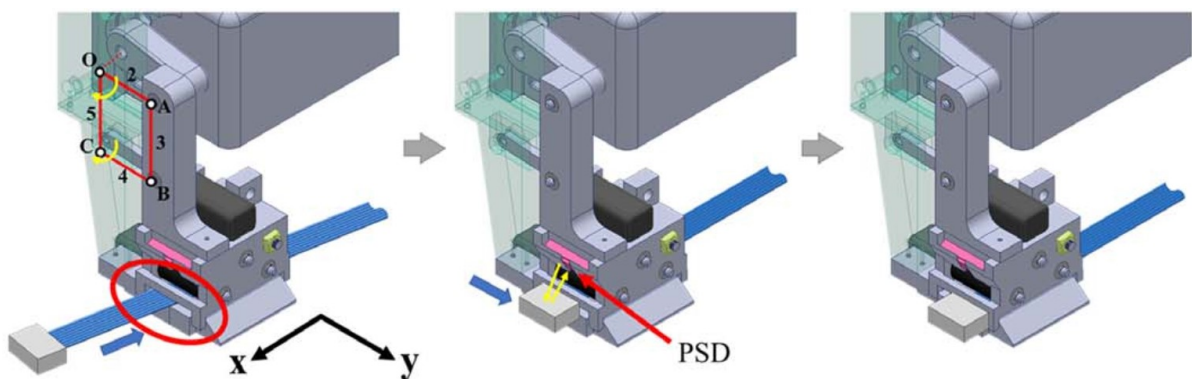
Embora seja interessante para algumas tarefas, este tipo de garra gera uma grande variação posicional, interferindo na posição do objeto em relação ao sistema de coordenadas do robô. Para alguns processos de automação, é imperativo que o sistema saiba com exatidão onde está o objeto de trabalho.

Em outro artigo, os mesmos autores examinam um acoplamento de junta para garras *subatuadas*. Variando a configuração dos dedos para maximizar a apreensão bem-sucedida e

variando o número de atuadores do mecanismo, os autores provaram que não existe melhora significativa no uso de um atuador para cada dedo em relação ao uso de um único atuador para o movimento de todos os dedos, (DOLLAR; HOWE, 2011). Demonstrando assim, que há vantagens em simplificar o projeto da garra. A redução de componentes, complexidade de manipulação e custo computacional são fatores importantes a serem considerados durante o projeto. Apesar de ser contraintuitivo, a simplicidade pode trazer mais confiabilidade para a manipulação.

Segundo Yi et al. (2021), existem duas abordagens principais para reduzir o erro de posicionamento do objeto de trabalho. A primeira é utilizar sensores para localizar o objeto com precisão. Essa abordagem exige um processamento maior e mais componentes especializados. O segundo, mais simples, é utilizar atuadores e aproveitar a forma da própria garra para determinar a posição do conector. Utilizando atuadores para alinhar passivamente cabos *flat*, em Yi et al. (2021), os autores desenvolveram uma garra, ver Figura 6, capaz de pegar, alinhar e conectar cabos *flat* a seu conector correspondente. Sobre uma esteira, o cabo é movimentado pela garra dentro do próprio corpo, fazendo com que a topologia da garra alinhe o cabo. Com ajuda de outro atuador, o cabo é deslocado sempre para a mesma posição, reduzindo o erro de posicionamento do cabo.

Figura 6 – Etapas do processo de alinhamento do cabo



Fonte: (YI et al., 2021)

Os autores obtiveram um resultado satisfatório envolvendo todas as etapas do processo de manipulação proposto, ou seja, identificação, prensão, alinhamento e conexão do cabo. É importante salientar que a garra trabalha apenas com cabos *flat*, devido ao seu formato, e em um ambiente simulado onde o receptor fica em um local isolado. Uma vez que o mecanismo de posicionamento do objeto de trabalho torna o tamanho da garra grande, a garra não consegue

trabalhar em ambientes com outros cabos próximos, por exemplo, em uma ERB.

3.2 SISTEMAS PARA AUTOMAÇÃO

Em relação a sistemas para automação de tarefas com braço robótico ou em equipamentos de rede, foram encontradas duas soluções disponíveis na academia e comercialmente. A primeira é um sistema estruturado e modular de automação robótica utilizado para programar robôs a realizarem tarefas de forma autônoma, desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer para Engenharia de Manufatura e Automação IPA, (PITASC..., 2020). Um exemplo de aplicação controlada pelo software Pitasc é a utilização de dois braços robóticos para realizar o cabeamento automático em um painel elétrico, conectando os conectores nos terminais e passando os cabos pelos trilhos. Entretanto, esse sistema foca na automação da tarefa e não em garras para manipulação de cabos e conectores. Embora essa solução não seja destinada a tarefas de manutenção, ela apresenta um bom trabalho em termos de manipulação de cabos e montagem do painel elétrico em ambientes estruturados.

A segunda solução é um sistema de gerenciamento remoto, da Tripp Lite (ROBOTIC..., 2021), para uso em centrais de rede. É um sistema para equipamentos de fibra ótica especialmente desenhado para modificar suas conexões de forma autônoma, aumentando a eficiência e flexibilidade da operação. Agir mais rápido é a chave para reduzir o tempo de inatividade e a automação torna as redes de fibra mais confiáveis e flexíveis. O sistema é fechado de forma que o equipamento de rede e o mecanismo de manipulação dos cabos são integrados.

Apesar de os dois exemplos trabalharem com cabeamento, eles não permitem a integração em sistemas já disponíveis, como por exemplo, uma ERB existente. É necessário adaptar todo o ambiente e equipamentos para seu uso. Além disso, os focos dos sistemas não são a manipulação dos conectores, mas sim, as soluções para automação.

Como já foi mencionado no Capítulo 1, a garra desenvolvida neste trabalho foi utilizada para integrar o sistema de manutenção RBOT, (SADOK et al., 2021), um sistema robótico focado na manutenção do plano frontal de ERB. A garra foi um dos elementos que possibilitou realizar testes em laboratório e validar o RBOT. Em conjunto com o sistema de visão para identificação dos conectores, do braço robótico para movimentação dos cabos e do sistema de controle para orquestrar todos os subsistemas, a garra se mostrou eficiente para o cenário proposto. A seguir, será descrito com mais detalhes o desenvolvimento da garra e os resultados obtidos.

4 GARRA PROPOSTA

Nessa seção, será descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento da garra proposta. A metodologia adotada foi adaptada para desenvolvimento de produto a partir da metodologia *Lean Startup* (LS) (GHEZZI; CORTIMIGLIA; BORTOLINI, 2018), uma vez que essa é para desenvolvimento de negócios. O fluxo da LS passa, de forma iterativa, pelas etapas formulação dos modelos de negócios, construção de experimentos, medição de resultados e aprendizado. O processo iterativo e de aprendizado através dos experimentos possibilita a rápida e contínua melhoria do negócio, ou no caso dessa dissertação, melhoria do produto. Para o desenvolvimento da garra, foram adotadas as etapas definição dos requisitos, modelagem, prototipação e testes. A seguir, cada etapa da metodologia será detalhada de forma a mostrar os principais pontos do desenvolvimento do projeto.

Como apresentado no capítulo anterior, o sistema para manutenção de ERB, o RBOT, necessita de uma garra para pegar e manipular cabos e conectores. A garra, capaz de pegar com segurança os conectores do dispositivo, trabalhando em conjunto com o sistema de visão, o braço robótico e o núcleo de processamento, permite o RBOT ser totalmente operacional. Ou seja, além de identificar os problemas através do sistema de visão e da lógica implementada, a garra permite interagir fisicamente com os equipamentos, permitindo trocar cabos defeituosos ou realizar conexões de forma autônoma ou teleoperada. Em outras palavras, a garra é uma parte essencial do sistema de manutenção e um fator determinante no sucesso ou fracasso do mesmo.

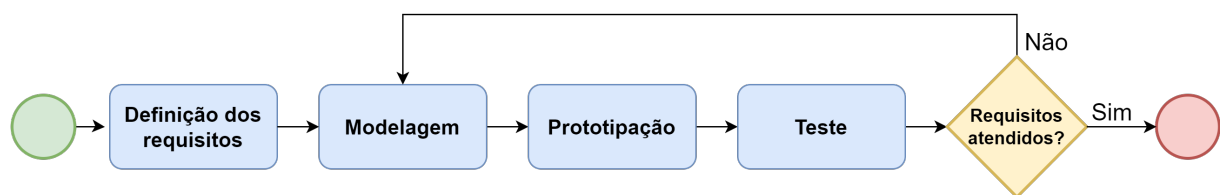
Antes de embarcar no desenvolvimento da garra para o RBOT, experimentou-se duas garras disponíveis em kits robóticos, que serão descritas posteriormente nesta seção. Logo percebeu-se que nenhuma dessas poderia remover os cabos da ERB. Em seguida, foi feita uma pesquisa no mercado, em busca de garras comerciais que pudessem ser adaptadas e serem utilizadas no projeto. Essa abordagem foi descartada por duas razões principais. Primeiro, as garras existentes são caras, com preços na faixa de dezenas de milhares de reais, especialmente quando se considera o nível necessário de precisão milimétrica que a aplicação exige. O segundo obstáculo foi a ausência de uma garra no mercado especificamente desenvolvida para lidar com conectores de comunicação.

Os dois pontos acima motivaram a concepção e o desenvolvimento de uma garra customizada. Embora seja custoso desenvolver uma garra do zero, o custo de produção reduzido

e a economia potencial superou o tempo e o esforço necessário para tal finalidade. Após a concepção do design da garra, será relativamente mais fácil modificar, adaptar, introduzir refinamentos durante os vários ciclos de design e no final deste processo a possibilidade de desenvolver uma nova garra que lida com outros tipos de conectores.

4.1 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Figura 7 – Metodologia iterativa adotada para o desenvolvimento da garra



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

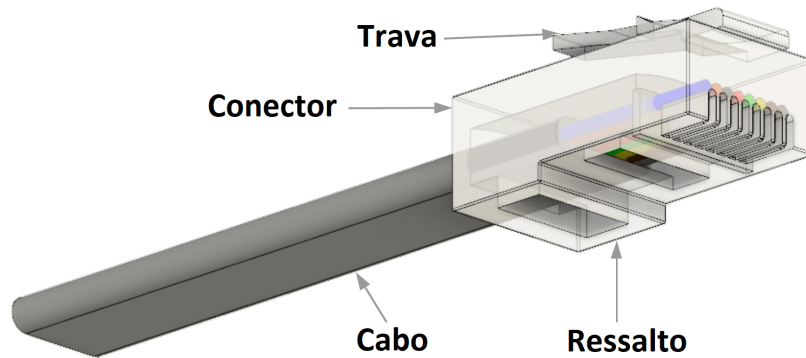
Como já mencionado anteriormente nesta seção, a metodologia de desenvolvimento de negócios LS foi adaptada para desenvolvimento de produto, onde o fluxo adotado é ilustrado na Figura 7. O processo iterativo, promovendo aprendizado através da prototipação e testes realizados, possibilita testar várias soluções até chegar na solução que alcance os requisitos propostos inicialmente. Para isso, o cenário e as restrições da tarefa são estudados e analisados na primeira etapa do fluxo, a definição de requisitos. Os requisitos guiarão o desenvolvimento da garra e determinarão o sucesso do projeto. Com os requisitos definidos, passa-se para a etapa de modelagem, onde ocorre a ideação da solução e seu projeto. A seguir, na prototipação, ocorre a criação do produto físico, guiado pelo projeto desenvolvido na etapa anterior. Os protótipos são então avaliados na etapa de teste, onde são averiguados por problemas no projeto, prototipação e se atendem aos requisitos propostos. Caso algum problema seja encontrado, o processo volta para a etapa de modelagem até todos os requisitos serem atendidos. Assim, a próxima iteração vai conter modificações e ajustes necessários para resolver os problemas da iteração atual.

4.1.1 Definição de requisitos

Foram estabelecidos os requisitos do projeto necessários e precisos para projetar a garra. Eles incluíram a definição concisa de ambos, o objeto de trabalho específico e a movimentação necessária para realizar a tarefa. Conforme descrito em Figura 8, o objeto de trabalho é o

conector modular Ethernet 8P8C crimpado em um cabo Ethernet padrão. Por ser comum na área de redes e comunicações nesta dissertação será referenciado como conectores RJ45.

Figura 8 – Descrição conector RJ45



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

A tarefa da garra é segurar e manipular conectores RJ45, mais precisamente, o braço robótico deve conectar e desconectar os conectores das portas do equipamento de telecomunicação. Observe que o equipamento de telecomunicação pode ter mais de um cabo já conectado, assim, realizar a tarefa com os cabos nas regiões vizinhas torna-se uma tarefa trabalhosa e difícil de ser realizada. O espaço reduzido e a presença de fios não orientados, podem interferir na movimentação da garra. Para cumprir este objetivo, os requisitos de design relacionados à movimentação da garra serão descritos a seguir. É preciso considerar que a garra deve ter um controle fino de abertura dos dedos para permitir a preensão do conector em situação de espaço reduzido. Caso a garra tenha apenas duas posições de abertura, totalmente fechada e totalmente aberta, impossibilitará a preensão do conector em algumas posições do equipamento de telecomunicação. A garra deve segurar o conector de forma adequada apesar do movimento do braço robótico utilizar diferentes velocidades e alta aceleração.

Como foi visto anteriormente, além do peso do objeto de trabalho, é preciso contar com as forças dinâmicas que surgem durante sua movimentação. Esse é um ponto importante já que o conector é relativamente leve quando comparado com as forças dinâmicas e as forças necessárias para superar a resistência no momento da desconexão. Também deve-se garantir que o conector não vai cair ou escorregar pelos dedos da garra. Além disso, ao remover um conector de uma porta, a garra deve ser capaz de movê-lo e garantir que o conector não mude de orientação em relação à garra. Desta forma, ele pode ser colocado de volta exatamente onde estava antes de sua remoção baseando-se somente no posicionamento do braço robótico. Um

pequeno desalinhamento pode impedir a conexão em uma porta devido às pequenas tolerâncias exigidas.

Portanto, o objetivo principal e esses pontos gerais acarretam nos seguintes requisitos específicos para o projeto da garra:

- Ter controle fino sobre a abertura da garra;
- Alcançar os conectores mesmo na presença de outros conectores próximos;
- Manter o conector preso de forma segura e firme em relação braço robótico, considerando grandes forças inerciais;
- Manter a orientação do conector durante sua movimentação;
- Garantir que a garra não vai danificar fisicamente os conectores e os equipamentos.

4.1.2 Modelagem

A garra foi modelada com dimensões precisas para os conectores RJ45 a serem manipulados. Especificamente, cada um de seus componentes foi bem determinado, medido, e sua posição na garra foi calculada com precisão. Após esta primeira fase, foi iniciada a modelagem dos projetos 3D e a impressão tridimensional física das peças. Refinamentos sucessivos foram frequentemente necessários como resultado da fase de teste. Foi utilizado o Fusion 360¹, programa CAD da Autodesk, para realizar a modelagem das peças do projeto.

4.1.3 Prototipação

Após a modelagem, iniciou-se a fase de prototipagem com modelos impressos em uma impressora de Fabricação com Filamento Fundido (FFF). A utilização de uma impressora 3D permitiu testar diferentes versões da garras de forma mais rápida do que as técnicas de fabricação tradicionais, como usinagem ou injeção de plástico. As vantagens adicionais de usar a impressão 3D incluem versatilidade de design e baixo custo, pois não há necessidade de projetar e construir moldes de máquinas, que apresentam custos elevados. De acordo com Abdullah et al. (2019), os benefícios do uso de impressão 3D durante o ciclo de desenvolvimento

¹ <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

para produção de uma prótese nasal inclui redução de custo, alta precisão de reprodução e velocidade, usando uma impressora 3D FFF. Conforme demonstrado por Sowmya N et al. (2015), máscaras de solda com abertura de largura de 0,3 mm podem ser feitas por impressoras 3D FFF, mostrando ser preciso o suficiente para o nível de dimensão exigido pela garra. Nessa fase, foi possível testar várias ideias de design antes decidir uma solução considerada potencialmente adequada para manipular conectores RJ45.

Para fabricar as principais peças da garra, foi utilizado o Plástico Ácido Polilático (PLA). De acordo com Wittbrodt e Pearce (2015), PLA é um dos materiais mais utilizados por impressoras 3D FFF devido às suas inúmeras vantagens. Isso inclui boa resistência a tração, capaz de produzir sólidos duráveis, e o baixo fator de encolhimento, resultando em partes dimensionalmente mais estáveis.

É importante notar que a impressão 3D foi usada durante a fase de prototipagem do projeto, bem como na versão final da garra. Após a realização de vários testes, a garra impressa mostrou-se robusta o suficiente para ser utilizada como nosso design final.

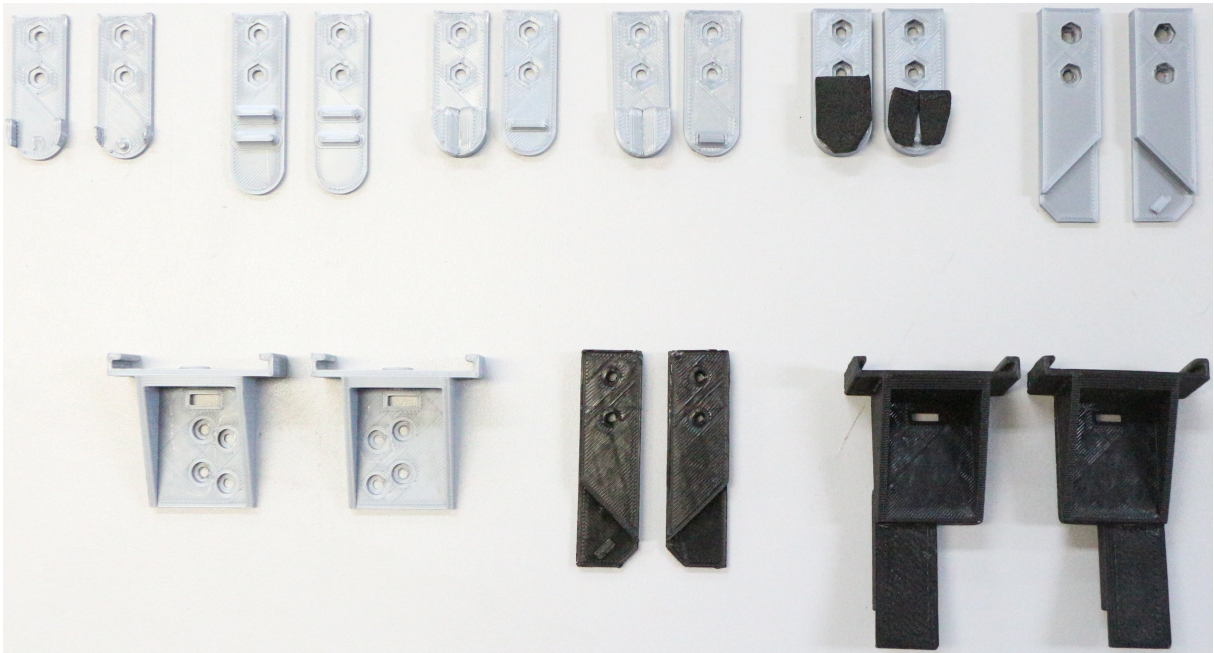
4.1.4 Testes

A fase de testes ocorreu sempre que uma peça era impressa e para testar novos conceitos. Inicialmente, eram examinadas a presença de folgas indesejadas, folgas no mecanismo e a estabilidade em segurar o objeto de trabalho. Depois de montar a garra no braço robótico, eram testados e analisados possíveis falhas no movimento do dedo e no próprio mecanismo. Também foram conduzidos testes manuais para analisar a capacidade da garra em manipular conectores RJ45.

Para o teste manual, um operador controlava o braço robótico e a garra através de um controle ou painel de controle. A tarefa realizada era conectar e remover o conector RJ45 de portas do equipamento de rede. Esse processo foi executado usando conectores plugados em diferentes portas e foi repetido várias vezes.

Quando um problema de design, conceito ou execução durante a fase de testes era identificado, todas as fases anteriores eram revisitadas, começando pela modelagem 3D até chegar à prototipagem de uma versão mais nova da garra. Posteriormente, a fase de teste para o modelo mais novo era repetida.

Figura 9 – Evolução das pontas da garra



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

4.2 EVOLUÇÃO DO DESIGN DA GARRA

Como foi mencionado na Seção 4.1.2, a garra passou por várias iterações de projeto, incluindo muitos designs intermediários, antes de chegar ao modelo final. Esta seção resume as principais versões e as etapas realizadas para produzi-las. A Figura 9 mostra uma visão geral das várias iterações realizadas, apresentando as diferentes mandíbulas que foram testadas nos vários protótipos.

Para cada variante de projeto, foi realizada uma série de testes, identificando suas limitações e, conseqüentemente, gerando um protótipo aprimorado. Esta seção apresenta três versões principais onde são listados os desafios enfrentados, mostrando as alterações introduzidas em cada versão e são explicados os pontos-chave junto com as justificativas de cada decisão tomada.

Parte do estudo e análise para desenvolvimento da nova garra ocorreu com as duas garras comerciais disponíveis no laboratório, uma garra PhantomX Parallel AX-12 da Trossen Robotics (DYNAMIXEL, 2006a) e uma garra LG-NS Robot Gripper por Lynxmotion (LYNX-MOTION..., 2021). Apesar de nenhuma delas ter conseguido desconectar os conectores do equipamento da ERB. Com base nos testes que foram feitos, foi observado que o principal problema foi o escorregamento do conector pelos dedos da garra. Para esse problema, foi

atribuído a força insuficiente que ambas as garras exerciam ao remover o conector. Como as mandíbulas das garras não tinham ajustes de formas, projetadas especificamente para o formato do conector usado, elas necessitariam aplicar mais força para segurar o conector sem permitir o deslizamento, fato que não era possível utilizando o atuador delas.

Embora ambas as garras não tenham funcionado corretamente, o design de garra desenvolvida foi influenciado por tais garras. De tal forma que foi decidido projetar uma garra *impactive* com dois dedos e mandíbulas com ajuste de forma. Esse ajuste de forma aproveita o formato característico do conector tornando mais difícil o seu escorregamento. Além de aumentar a confiabilidade da preensão, o formato da mandíbula exige forças reduzidas para segurar os conectores com segurança.

4.2.1 Versão 1

Figura 10 – Garra paralela PhantomX AX-12



Fonte: (DYNAMIXEL, 2006a)

A primeira versão da garra tinha como objetivo principal pegar o conector sem levar em consideração as dimensões da garra e os obstáculos ao seu redor. Como já mencionado, foi testado inicialmente a garra PhantomX Parallel AX-12 (DYNAMIXEL, 2006a), que consiste em dois dedos que se movem linearmente (ver Figura 10), e permanecem paralelos durante todo o movimento sendo acionado pelo servomotor Dynamixel AX-12 (DYNAMIXEL, 2006b).

Ao testar esta garra, foi notado que, quando tentava-se desconectar o conector, na maioria

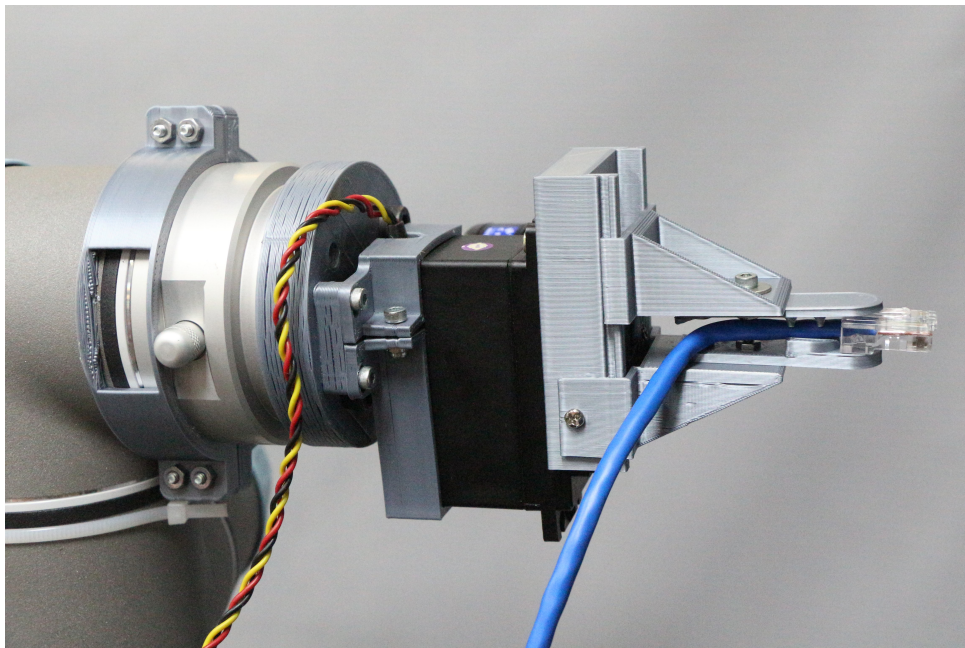
dos casos, ele escorregava levemente entre os dedos. Isso aconteceu porque o conector não estava preso de forma segura, seja por força insuficiente aplicada ou porque os dedos não o envolveram adequadamente.

Como era de se esperar, esta versão não contemplou todos os requisitos elicitados no começo do projeto. Apenas atendeu a dois requisitos: o controle de abertura fino da garra e não ser capaz de danificar o conector. Embora, não tenha sido eficaz na remoção e inserção dos conectores, esta garra ajudou na concepção e desenvolvimento da primeira iteração da garra. Particularmente, foi aproveitado o mecanismo de acionamento para modificar apenas os dedos e as mandíbulas. Entretanto foi percebido que o servo motor responsável por movimentar os dedos não conseguia aplicar a força necessária para alguns testes. Assim, foi proposto avançar com o desenvolvimento da próxima versão da garra.

4.2.2 Versão 2

Na segunda iteração de projeto (versão 2.1), o mecanismo de atuação foi adaptado (Figura 11 para usar o servo HS-805BB: que é maior, capaz de aplicar um torque maior e, consequentemente, segurar o conector com mais força. Além disso, também foi modificada a mandíbula para incluir um ressalto retangular que se encaixasse no conector e conseguisse segurá-lo sem

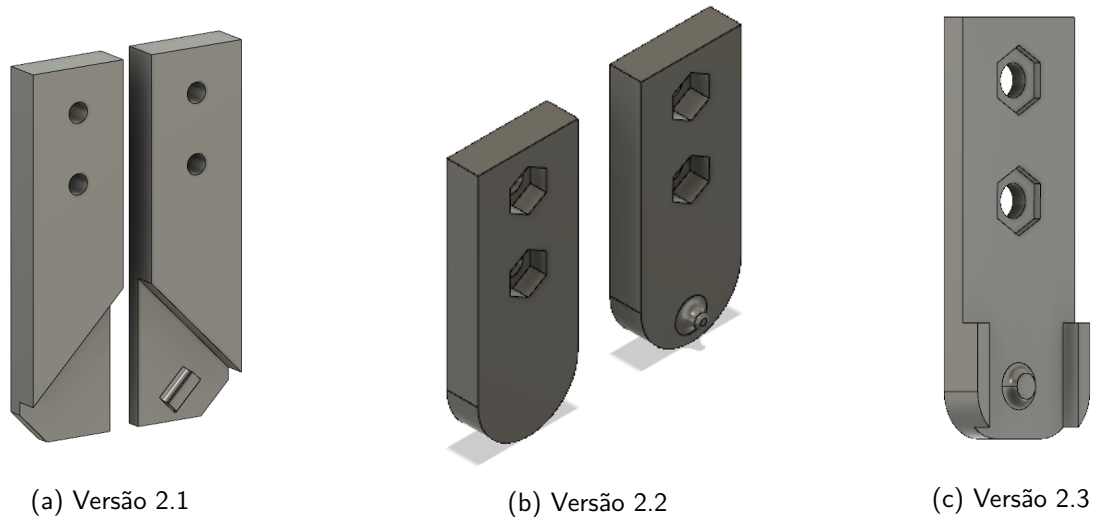
Figura 11 – Adaptação do mecanismo para o servo HS-805BB



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

escorregar (Figura 12a). Com esse novo formato, foi possível remover com sucesso o RJ45 do equipamento de telecomunicação, mas ainda havia outras melhorias a serem realizadas, principalmente no que diz respeito à flexibilidade e facilidade para segurar os conectores.

Figura 12 – Evolução da garra Versão 2



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Com os testes e observações derivados da versão 2.1, foi criado um novo design com algumas modificações adicionais focadas na capacidade de remover o conector do equipamento. Como é possível ver na Figura 12b, esta iteração continha um ressalto circular em vez de retangular, o que melhorou a flexibilidade quanto à orientação da garra para segurar o conector. Além disso, foram removidas quaisquer outras partes que pudessem atrapalhar a fixação do conector. No entanto, o ressalto circular não restringia eventuais rotações do conector e até mesmo o próprio peso do cabo conseguia mudar sua orientação de forma aleatória. Desta forma, era difícil inserir o conector de volta no equipamento. Mais precisamente, a pose do conector (posição e orientação) era desconhecida pelo sistema, tornando a solução problemática para aplicar em processos de automação. Um vez que é necessário conhecer, com precisão, a posição dos objetos a serem manipulados pela garra.

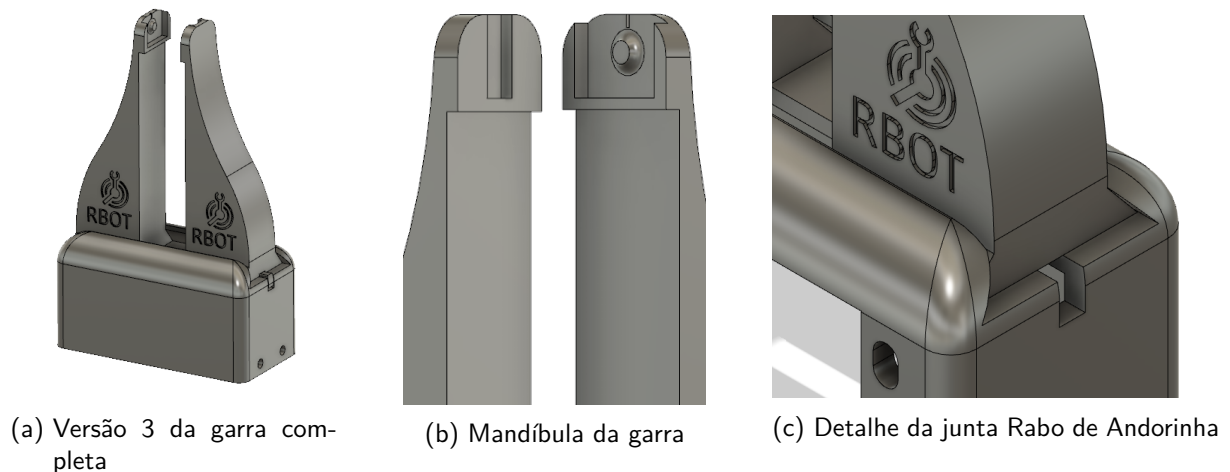
O problema mencionado acima foi resolvido com a versão 2.3 da garra, observe a Figura 12c. Na mandíbula, foi projetado ressaltos nas laterais de acordo com o formato do conector, evitando que ele mude de orientação durante sua movimentação. Além disso, tendo em vista que um dos principais pontos a serem considerados no projeto da garra era o espaço disponível entre os conectores (em torno de 3 mm) nesta versão foi considerado o dimensionamento da garra para que ela pudesse atuar em um espaço relativamente pequeno. Durante os testes, esta versão obteve bons resultados, sendo capaz de segurar, remover, movimentar e colocar

o conector em uma porta diferente do equipamento com sucesso. Assim, além dos requisitos alcançados na primeira versão, foi possível atender mais dois requisitos, completando 4 dos 5 requisitos. A saber, os seguintes requisitos foram contemplados nessa versão: segurar o conector RJ45 com segurança e não permitir que o conector mudasse de orientação.

4.2.3 Versão 3

Até a versão 2.3 o foco principal ficou na parte da mandíbula da garra, mas como foi obtido bons resultados pela versão 2.3, foi decidido aperfeiçoar a garra como um todo até atender todos os requisitos. A Figura 13a apresenta a última iteração realizada com a garra. Como é possível ver na Figura 13b, a mandíbula do dedo foi importada da versão 2.3, mas o dedo foi projetado como uma peça única e com um perfil mais fino. Dessa forma, essa versão conseguiu atender também ao requisito de alcançar espaços apertados. Também foi redesenhado o sistema de acionamento e cinemática. A base da garra passou a utilizar um servo menor (HS-422), possui um dedo fixo e outro que se move linearmente em um trilho no formato de rabo de andorinha construído na base da garra (Figura 13c).

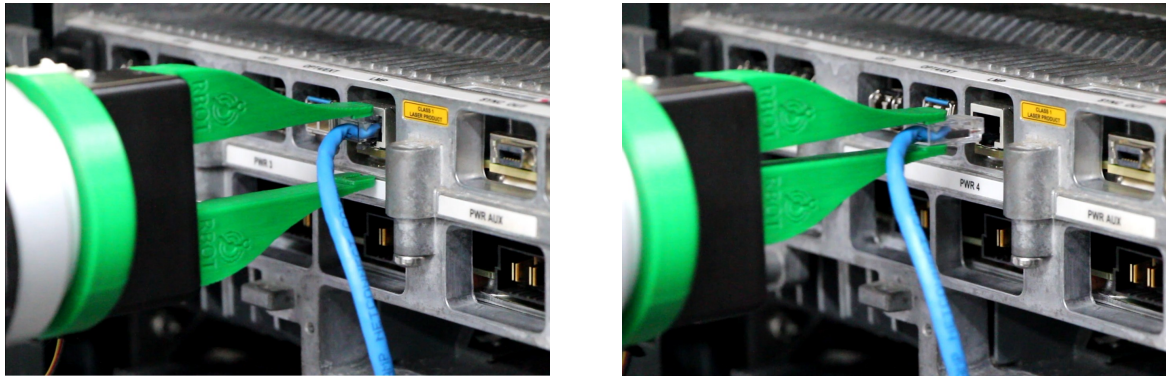
Figura 13 – Detalhes da versão 3 da garra



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Como já era esperado, a garra usa um servo motor elétrico como atuador para abrir e fechar o dedo, mas por possuir movimento rotativo, usou-se um conjunto de cremalheira e pinhão para obter o movimento linear necessário. Este mecanismo oferece boa conversão de torque, pois o diâmetro do pinhão é relativamente pequeno e compacto em comparação com a distância do movimento do dedo e também possui uma força uniforme ao longo de todo

Figura 14 – Garra Versão 3 em operação



(a) Momento do encaixe

(b) Retirando o cabo do equipamento

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

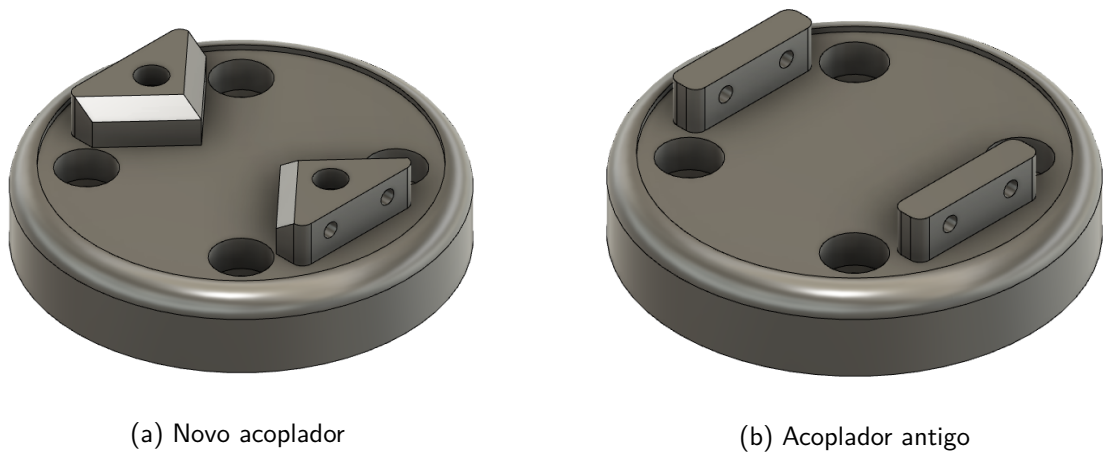
o movimento do dedo (MONKMAN et al., 2007). O pinhão, fixado ao eixo do servo motor, possui 19 dentes e a cremalheira é fixada ao dedo móvel. O servo motor é controlado por um Raspberry 3 rodando o sistema operacional Linux que executa programas para a teleoperação do braço robótico.

Durante os testes, foi identificada a dificuldade para o operador determinar a posição ideal da garra de forma que quando os dois dedos móveis fechassem, acertasse a posição correta do conector, podendo causar dois problemas que inviabilizavam a preensão. O primeiro ocorria quando a garra pegava o conector deslocado para o lado, impedindo o encaixe da mandíbula. Já o segundo, quando um dos dedos alcançava o conector antes do outro, forçando o conector e impedindo a garra de aplicar a força correta para preensão. O novo design com dedo fixo facilitou a determinação da posição ideal para o fechamento dos dedos, já que o dedo fixo, contendo o ressalto, é encaixado no conector (Figura 14a) antes de mover o dedo móvel para fechar a garra e segurar o conector (Figura 14b). Desta forma, a posição da garra é estabelecida e identificada antes do processo de preensão.

Em um dos testes para avaliar o uso da terceira versão da garra com o braço robótico UR5, o acoplador (ver Figura 15b) quebrou devido a um impacto da garra com a ERB. O acoplador é responsável por fixar a garra na extremidade do braço robótico. Para tornar o conjunto mais robusto, foi projetado um novo acoplador adicionando mais material à parte de conexão com a garra e fixando-a com um parafuso na base do acoplador, como pode ser visto na Figura 15a. Esse acoplador segue as dimensões do padrão ISO 9409-1-50-4-M6, adotado pela indústria, assim é possível acoplar a garra em outros braços robóticos que seguem o mesmo padrão.

Na Tabela 2, é apresentada de forma resumida as três versões da garra e as melhorias

Figura 15 – Acoplador da garra para o braço robótico UR5



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

que foram introduzidas durante a fase de desenvolvimento. Como pode-se ver, após algumas iterações e testes, foi possível desenvolver uma garra que atendesse aos requisitos especificados inicialmente, garantindo sua robustez, capacidade de manipular conectores RJ45 com segurança e alcançar as portas da ERB mesmo na presença de muitos cabos conectados ao equipamento.

Tabela 2 – Comparação das garras quanto aos requisitos

Requisitos	Versão 1	Versão 2	Versão 3
Segurar conector RJ45 com segurança		X	X
Alcançar espaços apertados			X
Controle fino da abertura da garra	X	X	X
Não danificar o conector e equipamentos	X	X	X
Não permitir que o conector mude de orientação		X	X

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

5 VALIDAÇÃO ATRAVÉS DE TESTES

Neste capítulo será descrito os testes realizados para validar a garra. Os testes foram de dois tipos: teleoperados e automáticos realizados em laboratório além de um questionário que foi aplicado com os usuários para obter *feedback*. O cenário dos testes é detalhado na subsecção 5.1 enquanto os resultados serão apresentados no final desse capítulo.

5.1 CENÁRIO

O cenário adotado, ilustrado na Figura 16, apresenta uma ERB, um braço robótico UR5, a garra feita em plástico PLA impressa em 3D, uma câmera conectada à garra e uma câmera externa com a visão completa dos equipamentos (as câmeras não aparecem na imagem). O terminal de teleoperação é um computador que exibe a tela de operação transmitindo os vídeos das câmeras e um controle, popularmente chamado por *gamepad*, para controlar o braço robótico UR5 e a garra.

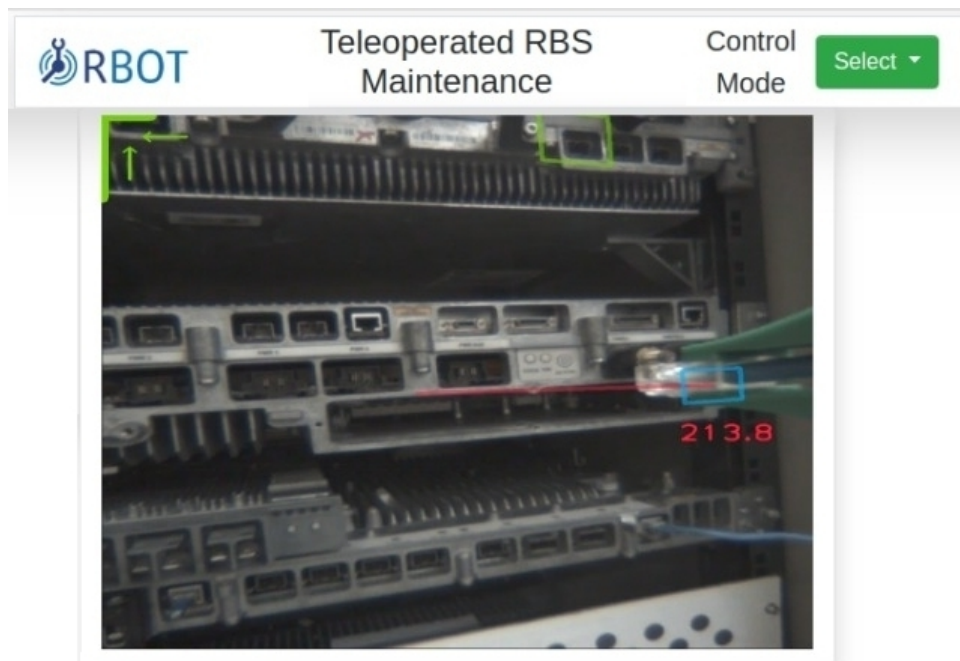
Figura 16 – Cenário de teste



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

O terminal de teleoperação foi controlado por usuários distantes do braço robótico para que o operador não tivesse visão direta do cenário, a visão seria apenas por meio da câmera acoplada ao braço robótico e da câmera externa ao sistema. A tela de teleoperação exibiu o vídeo da câmera onde o operador pôde escolher entre a câmera acoplada ao braço robótico, a câmera externa ou ambas ao mesmo tempo. O operador controlou o braço robótico e a garra por meio de um controle onde foi possível mover e rotacionar a garra nos três eixos cartesianos (X, Y, Z), mudar a visualização das câmeras a qualquer momento e abrir e fechar a garra.

Figura 17 – Interface de realidade aumentada para teleoperação



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

O vídeo da câmera acoplada à garra apresentava alguns elementos de realidade aumentada para auxiliar na realização da tarefa. Essa interface foi desenvolvida para o sistema RBOT e utilizada para a realização dos testes descritos nessa dissertação. Conforme mostrado na Figura 17, esses elementos indicavam as distâncias (nos três eixos) entre o ponto central da ferramenta, do inglês *Tool Center Point* (TCP), e a porta para inserir o conector. No canto superior esquerdo da imagem, setas dinâmicas verdes mostravam em qual direção no plano frontal do equipamento (eixos X e Y) a garra deveria mover-se para alinhar com a porta. Um retângulo verde, na parte superior da imagem, ressaltava a porta de interesse. Já no centro lateral da imagem, um retângulo azul destacava o conector preso à garra. No eixo Z, a profundidade foi representada por uma linha dinâmica vermelha saindo do centro do retângulo azul. Em complemento à linha, a distância em milímetro da garra para o plano frontal do

equipamento foi escrita em vermelho próximo ao retângulo azul.

5.2 TESTE

O teste para desconectar o cabo consistiu em realizar uma tarefa de remoção do conector enquanto conectado em uma das portas RJ45 da ERB. O objetivo do teste foi testar o uso da garra através da teleoperação e avaliar sua robustez colocando-a à prova em um cenário simulando o uso real. O teste foi realizado com 30 pessoas que tiveram seus primeiros contatos com o braço robótico e a teleoperação da garra durante o teste. Ao todo, participaram do teste 23 homens e 7 mulheres com idades entre 20 e 43 anos, e todos tinham curso superior como formação. Apesar de não ter ninguém que trabalhasse com manipulação robótica, todos declararam que apresentavam afinidade com uso de computador e *gamepad*. Cada pessoa executou a tarefa três vezes seguidas. Durante o teste, foi contado o número de vezes que a tarefa foi realizada com sucesso, o tempo que levou para completar a tarefa e, por fim, foi aplicado um questionário. A razão para conduzir um teste apenas de desconexão é que conectar o cabo é mais desafiador, e até mesmo um pequeno desalinhamento pode impedir o conector de entrar na porta. Como nenhum dos participantes tinha experiência anterior, escolhemos a tarefa de remoção do conector apenas. Ressalta-se que este tipo de operação seja executada apenas por técnicos treinados quando forem realizados em um cenário de manutenção de ERB.

Antes de iniciar os testes, a atividade foi cuidadosamente explicada a todos os participantes, junto com os comandos de teleoperação que eles precisavam usar. Cada pessoa pôde usar o robô por um curto período de tempo antes de iniciar o teste para entender a manipulação e os controles necessários para o teste. Durante o teste, o avaliador não auxiliou na execução da tarefa e restringiu-se a responder apenas as perguntas sobre os comandos do sistema.

Realizados os testes, os dados foram processados e analisados. O desempenho da garra foi medido pela frequência com que o conector foi removido com sucesso em relação ao total de tentativas realizadas e o tempo médio que cada usuário levou para executar as tarefas.

Para maior agilidade durante o teste e garantindo que todos estavam usando o mesmo equipamento, foram disponibilizadas três garras sobressalentes idênticas, caso alguma quebrasse durante o teste.

Um questionário do tipo escala de usabilidade do sistema, do inglês *System Usability Scale* (SUS), (BROOKE, 1995), foi escolhido para avaliar a experiência do usuário quanto ao uso da garra por meio do terminal de teleoperação. Este questionário, em detalhe no Anexo A,

foi conduzido após o usuário realizar cada operação de um total de três para desconectar o cabo. Foi utilizada a tela do terminal de teleoperação para apresentar os formulários online. Comentários também foram registrados pelo avaliador para serem analisados posteriormente. O principal objetivo do teste foi avaliar como a garra funciona em um ambiente real, identificar se havia algum problema que impedisse o usuário de executar a tarefa e como o usuário percebeu a usabilidade da garra.

Em relação ao teste automático, foi realizado usando o braço robótico UR5 da Universal Robotics. Este teste simulou um cenário de uso real, onde o sistema de manutenção funciona desconectando e conectando conectores repetidamente. Primeiro, o braço robótico foi configurado para desconectar e conectar o conector e, em seguida, configurado para repetir as tarefas em loop. Além disso, a velocidade linear máxima do TCP foi definida para atingir 1 m/s, pois é considerada a velocidade padrão do braço robótico. O TCP determina o ponto de trabalho exato da ferramenta no sistema de medição do robô.

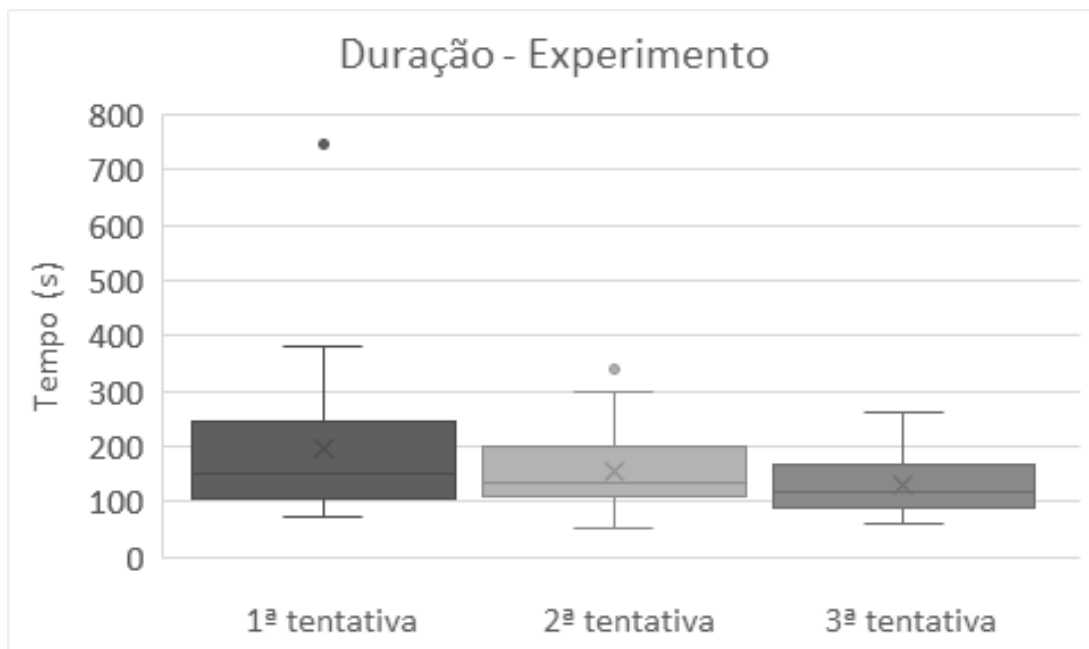
O teste inicialmente começou com o cabo conectado na porta da ERB. O robô desconectou o conector da ERB e conectou-o novamente. Após repetir esta operação 90 vezes, foi analisado se havia algum problema com a prensão dos cabos. Embora funcionasse totalmente por si só, todo o processo foi supervisionado caso alguma intervenção fosse necessária. Durante os primeiros dez ciclos, foi realizado o teste usando apenas o conector RJ45 para verificar se estava funcionando adequadamente. Nos ciclos seguintes, a tarefa foi realizada utilizando um conector com um cabo UTP com 1 m de comprimento. A razão para usar o cabo e o conector sozinhos em testes separados foi para garantir que o peso do cabo não iria interferir na tarefa. Assim, foi verificado se a tarefa estava sendo realizada sem problemas com ambas as formas.

Antes de discutir os resultados, é fundamental informar alguns pré-requisitos que foram seguidos antes de iniciar o teste. Primeiro, foi garantido que o cabo usado estivesse ligeiramente inclinado para o lado para não interferir com a garra. Como a trajetória da garra acontecia por trás do conector, o cabo não pôde ser alinhado a ele; caso contrário, a garra iria colidir com o cabo e não conseguiria agarrar o conector. Em segundo lugar, o conector deve ser inserido de forma adequada na porta. Se o conector não fosse inserido corretamente na porta da ERB, ele não se encaixaria na mandíbula da garra. Ou seja, a garra poderia ter dificuldade para remover o conector e colocá-lo de volta na ERB.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O teste foi conduzido com 30 pessoas onde todos foram capazes de realizar as três tarefas de remoção do cabo da ERB. O tempo para completar a tarefa variou de 51,0 s a 380,5 s, excluindo um ponto fora da curva que atingiu uma duração considerável de 747,3 s. Na maioria das vezes, o conector foi removido com uma única tentativa. Ou seja, o conector encaixou na mandíbula corretamente e foi removido da ERB. Nos casos em que foi necessário tentar mais de uma vez, foi descoberto que a falta de retorno de informação da garra foi um problema significativo. Uma vez que não há sensor na garra que aponta para uma preensão completa, os usuários devem inferir se houve a preensão apenas a partir das imagens das câmeras. Portanto, a falta de experiência também foi um fator significativo que acarretou uma grande variação de tempo de execução do teste. Apesar disso, o tempo médio para retirar o cabo foi de 160,2 s com desvio padrão de 97,3 s. Os tempos de operação alcançados foram considerados adequados, pois os usuários foram capazes de completar a tarefa com sucesso, embora eles não tivessem experiência anterior na área de operação de braço robótico.

Figura 18 – Diagrama de caixa do tempo de execução



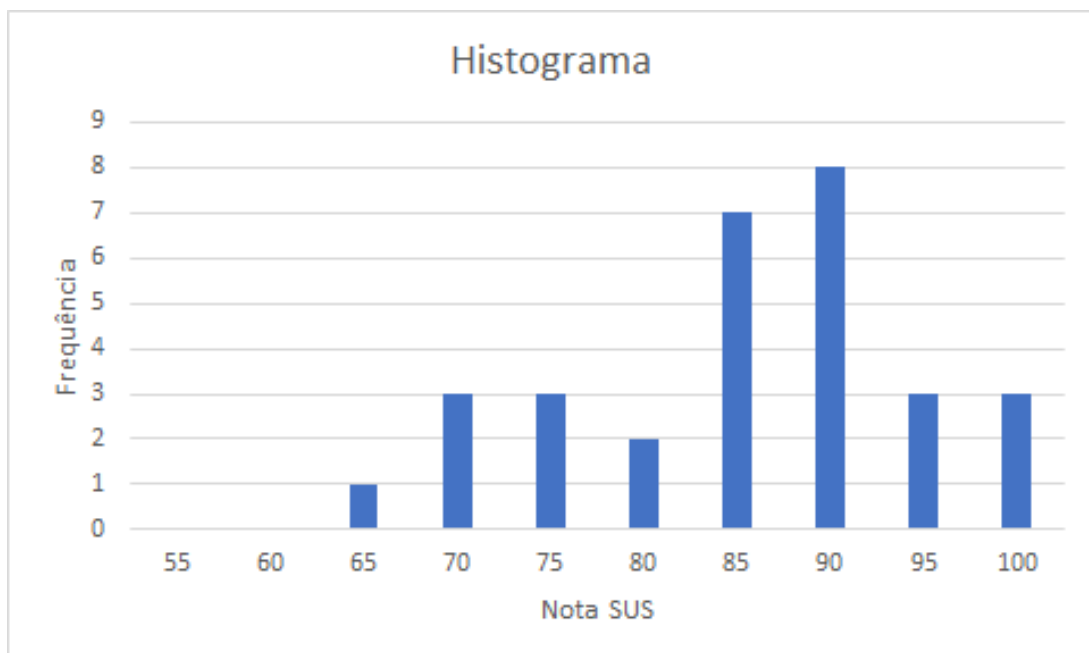
Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Os tempos de execução dos testes foram analisados posteriormente e para cada tentativa, um diagrama de caixa foi traçado, como visto na Figura 18. O diagrama mostra uma clara curva de aprendizado com os tempos de execução sendo reduzidos a cada vez que o teste foi

realizado. O tempo médio da primeira à segunda execução foi reduzido em 19%, enquanto que da segunda para a terceira interação, observamos uma redução de 16%. Além disso, os resultados são bem dispersos nas três execuções. Durante o teste de teleoperação, nenhuma parte da garra ficou danificada, o que mostrou a resistência do design da garra. Em situações em que a garra colidiu com o equipamento da ERB, o sistema de proteção do próprio UR5 entrou em ação, protegendo tanto a garra quanto o equipamento do teste.

O questionário SUS, parte do processo de avaliação, mostrou o uso da garra como uma experiência positiva. A pontuação média do questionário dada pelos usuários foi 84 (de uma pontuação máxima de 100), representando uma boa avaliação da experiência. De acordo com a discussão em Sauro e Lewis (2016), a pontuação média geral do SUS contando com mais de 5.000 respostas é de 68 pontos, apresentando desvio padrão de 12,5 pontos. A pontuação obtida pelo teste é equivalente aos 5% melhores sistemas avaliados por Sauro e Lewis (2016). O desvio padrão de todas as pontuações foi relativamente baixo, 9,82 e a mediana foi 83,75, conforme ilustrado no histograma da Figura 19 que apenas três pontuações estavam abaixo de 70, enquanto a grande maioria das pontuações observadas permaneceu entre 80 e 90.

Figura 19 – Histograma da pontuação do SUS



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Mais importante ainda, os comentários dos usuários sobre a operação da garra forneceu algumas ideias importantes. A maioria dos usuários declararam que, embora fosse fácil de operar, a informação sobre a força da garra poderia ajudar a segurar o conector.

Com relação ao teste usando o braço robótico UR5 em modo automático, todos os 90 ciclos de operação para desconectar e inserir o conector foram realizados sem qualquer falha. Todo o teste levou 100 minutos para ser concluído, onde a garra operou continuamente sem deformar plasticamente, quebrar, nem apresentar qualquer sinal de mau funcionamento. Em resumo, a mesma garra resistiu a todo teste de desconexão com os usuários, além do teste automático de conectar e desconectar. Desta forma, foi concluído que a garra é robusta e pode ser usada com segurança como o manipulador do sistema de manutenção autônomo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de automação de tarefas vêm avançando na indústria com o intuito de agilizar e aumentar a confiabilidade dos serviços. Para isso, a automação de uma tarefa depende de vários subsistemas que trabalham interligados. Um dos subsistemas que apresenta grande importância é a manipulação robótica. Responsável por interagir com o mundo físico, existem diversas propostas de garras robóticas, cada uma desenvolvida para uma gama limitada de tarefas. Apesar do grande empenho de pesquisadores, a área de manipulação ainda tem muito a evoluir.

Este trabalho descreve a concepção e o desenvolvimento de uma garra robótica capaz de manipular conectores RJ45. Utilizada como manipulador do sistema de automação de manutenção de equipamentos de telecomunicação RBOT, a garra foi desenvolvida desde os requisitos até a prototipação final. Após pesquisa na literatura onde não foram encontradas garras que pudessem manipular conectores dos equipamentos de telecomunicação, nem obtido êxito com garras disponíveis no mercado, foi proposto nessa dissertação a concepção e o desenvolvimento de uma nova garra.

Assim, pesquisou-se por garras robóticas desenvolvidas para manipular objetos de trabalhos semelhantes e que pudessem fornecer informações sobre as técnicas de preensão utilizadas na indústria. Antes de iniciar a concepção da garra, os seus requisitos foram elicitados. De forma iterativa, o design passou por três versões principais antes de chegar no resultado final que conseguisse atender a todos os requisitos propostos. Todas as versões foram projetadas em CAD e prototipadas utilizando uma impressora 3D. Um servo motor elétrico é o responsável por mover um dos dois dedos da garra. Os dedos apresentam, em suas mandíbulas, um formato especialmente desenvolvido para encaixar nos conectores RJ45, e com isso, fazer uma preensão segura.

Utilizando um braço robótico UR5 para movimentar a garra, três testes foram realizados a fim de validar a garra em uso automático e teleoperado. Inicialmente, um teste com 30 usuários, teleoperando o braço robótico, foi realizado para medir a performance da garra. Após os experimentos, os usuários responderam um questionário de usabilidade e indicaram suas opiniões sobre a garra. Para finalizar, um experimento automático foi realizado simulando a manutenção autônoma do equipamento de telecomunicação. Os resultados foram positivos e mostraram o bom desempenho da garra, que conseguiu segurar os conectores RJ45 de forma

eficiente e confiável.

É importante ressaltar as contribuições científicas e técnicas que o desenvolvimento dessa pesquisa possibilitou. Primeiramente foi a publicação do artigo (REIS et al., 2021) sobre a garra para manipular conectores RJ45. A pesquisa também contribuiu com o desenvolvimento do sistema de automação RBOT, que resultou na publicação do artigo (SADOK et al., 2021). No quesito técnico, a garra robótica foi projetada e produzida.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Sobre os trabalhos futuros, alguns pontos foram levantados a partir dos experimentos e dos comentários recebidos através dos usuários. Ficou evidente que a instrumentação da garra com sensores melhoraria sua usabilidade e confiabilidade. Como descrito na subseção 5.3, a falta de informação sobre se a garra estava fazendo força suficiente no conector prejudicou os experimentos em alguns casos. Assim, é proposto avançar no desenvolvimento de uma garra inteligente que forneça informações sobre o ambiente além das imagens adquiridas pelo sistema de manutenção.

Também é visto como importante expandir a quantidade de conectores compatíveis com a garra, dando uma maior flexibilidade em seu uso. Permitindo, assim, realizar a manutenção de forma mais completa já que o sistema conseguiria manipular mais conectores. Devido ao design adotado no desenvolvimento da garra, espera-se que mudanças apenas na mandíbula da garra permita esta evolução.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A. M.; MOHAMAD, D.; DIN, T. N. D. T.; YAHYA, S.; AKIL, H. M.; RAJION, Z. A. Fabrication of nasal prosthesis utilising an affordable 3d printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 100, n. 5-8, p. 1907–1912, 2019.
- BROOKE, J. Sus: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, v. 189, 11 1995.
- CARBONE, G. *Grasping in Robotics*. [S.l.]: Springer London, 2012. (Mechanisms and Machine Science). ISBN 9781447146643.
- CHEN, F.; SEKIYAMA, K.; SUN, B.; DI, P.; HUANG, J.; SASAKI, H.; FUKUDA, T. Design and application of an intelligent robotic gripper for accurate and tolerant electronic connector mating. *Journal of Robotics and Mechatronics*, v. 24, n. 3, p. 441, 2012.
- Chen, X.; Peng, J.; Zhou, J.; Chen, Y.; Wang, M. Y.; Wang, Z. A robotic manipulator design with novel soft actuators. In: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1878–1884.
- Choi, M.; Lee, D.; Park, H.; Kim, Y.; Jang, G.; Shin, Y.; Park, J.; Baeg, M.; Bae, J. Development of multi-purpose universal gripper. In: *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1421–1424.
- D'AMORE, G. Rf testing for wireless network base stations. *High Frequency Electronics*, p. 24–25, 05 2009.
- DOLLAR, A. M.; HOWE, R. D. The highly adaptive sdm hand: Design and performance evaluation. *The International Journal of Robotics Research*, v. 29, n. 5, p. 585–597, 2010.
- DOLLAR, A. M.; HOWE, R. D. Joint coupling design of underactuated hands for unstructured environments. *The International Journal of Robotics Research*, v. 30, n. 9, p. 1157–1169, 2011.
- DYNAMIXEL. *PhantomX Parallel AX-12 Gripper*. 2006. <<https://www.trossenrobotics.com/p/phantomx-parallel-ax12-gripper.aspx>>. Acesso em: 11-07-2020.
- DYNAMIXEL. *User's Manual Dynamixel AX-12A*. [S.l.], 2006.
- FANTONI, G.; SANTOCHI, M.; DINI, G.; TRACHT, K.; SCHOLZ-REITER, B.; FLEISCHER, J.; Kristoffer Lien, T.; SELIGER, G.; REINHART, G.; FRANKE, J.; Nørgaard Hansen, H.; VERL, A. Grasping devices and methods in automated production processes. *CIRP Annals*, v. 63, n. 2, p. 679–701, 2014. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850614001887>>.
- FUSTER, A. M. G. *Gripper design and development for a modular robot*. Dissertação (B.S. thesis) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- GHEZZI, A.; CORTIMIGLIA, M.; BORTOLINI, R. Lean startup: a comprehensive historical review. *Management Decision*, ahead-of-print, p. 1–20, 08 2018.
- KU, Y.-D.; YANG, J.-H.; FANG, H.-Y.; XIAO, W.; ZHUANG, J.-T. Optimization of grasping efficiency of a robot used for sorting construction and demolition waste. *International Journal of Automation and Computing*, Springer, v. 17, n. 5, p. 691–700, 2020.

Liu, C.; Chiu, C. Design and prototype of monolithic compliant grippers for adaptive grasping. In: *2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 51–55.

LYNXMOTION - Little Grip Kit (no servos). 2021. Acesso em: 11-02-2021. Disponível em: <<http://www.lynxmotion.com/p-161-little-grip-kit-no-servos.aspx>>.

MONKMAN, G. J.; HESSE, S.; STEINMANN, R.; SCHUNK, H. *Robot grippers*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

PITASC - Application and Use. 2020. Acesso em: 29-07-2020. Disponível em: <<https://www.pitasc.fraunhofer.de/en/application.html>>.

Rahman, A.; Jin, J.; Cricenti, A. L.; Rahman, A.; Kulkarni, A. Communication-aware cloud robotic task offloading with on-demand mobility for smart factory maintenance. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 5, p. 2500–2511, 2019.

RAVAL nbspSamir; PATEL nbspBhavesh K. A review on grasping principle and robotic grippers. *International Journal of Engineering Development and Research*, v. 4, p. 483–490, 2016.

REIS, G.; DANTAS, M.; BEZERRA, D.; NUNES, G.; DREYER, P.; LEDEBOUR, C.; KELNER, J.; SADOK, D.; SOUZA, R.; LINS, S. et al. Gripper design for radio base station autonomous maintenance system. *International Journal of Automation and Computing*, Springer, v. 18, n. 4, p. 645–653, 2021.

ROBOTIC Fiber Patch Panel System, LC Duplex, Multimode: Tripp Lite. 2021. Acesso em: 15-01-2021. Disponível em: <<https://www.triplite.com/robotic-fiber-panel-system~NRFP500MMCP>>.

Ronny Salim Lim; La, H. M.; Zeyong Shan; Weihua Sheng. Developing a crack inspection robot for bridge maintenance. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China: IEEE, 2011. p. 6288–6293.

SADOK, D.; BEZERRA, D.; DANTAS, M.; REIS, G.; LEUCHTENBERG, P.; LEDEBOUR, C.; SOUZA, R.; LINS, S.; MARQUEZINI, M.; KELNER, J. Rbot: development of a robot-driven radio base station maintenance system. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, Springer, p. 1–18, 2021.

Sadun, A. S.; Jalani, J.; Jamil, F. Grasping analysis for a 3-finger adaptive robot gripper. In: *2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

SAURO, J.; LEWIS, J. R. *Quantifying the user experience: Practical statistics for user research*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2016.

Sowmya N; Oraon, N.; Sen, S.; Rao, M. Development of 3d shadow mask using 3d printer. In: *2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5.

TAI, K.; EL-SAYED, A.-R.; SHAHRIARI, M.; BIGLARBEGLIAN, M.; MAHMUD, S. State of the art robotic grippers and applications. *Robotics*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 5, n. 2, p. 11, 2016.

TOMOKAZU, T.; KIKUCHI, S.; SUZUKI, M.; AOYAGI, S. Vacuum gripper imitated octopus sucker-effect of liquid membrane for absorption-. In: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2929–2936.

UR5 Collaborative Robot Arm: Flexible and lightweight robot arm. 2021. Acesso em: 29-01-2021. Disponível em: <<https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>>.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. The effects of pla color on material properties of 3-d printed components. *Additive Manufacturing*, v. 8, p. 110 – 116, 2015. ISSN 2214-8604.

WOLF, A.; STEINMANN, R.; SCHUNK, H. *Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005.

YI, J.-S.; YUMBLA, F.; AUH, E.; ABAYEBAS, M.; LUONG, T. A.; MOON, H. Passive Aligning of Ribbon Cable in Sliding Surface Gripper for Assembly Task. *Journal of Mechanisms and Robotics*, v. 13, n. 2, 01 2021. ISSN 1942-4302. 025001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4048915>>.

ZHANG, B.; XIE, Y.; ZHOU, J.; WANG, K.; ZHANG, Z. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 177, p. 105694, 2020. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920311030>>.

ANEXO A – QUESTIONÁRIO SUS

Questionário pré-teste [examinador]

Procedimentos pré-teste:

1. Colocar cabo no local determinado
2. Selecionar os questionários marcados com a ordem de execução
3. Abrir interface e questionários SUS em janelas separadas
4. Selecionar a primeira interface a ser utilizada
5. Convidar o usuário

1. Nome

Avaliação de usabilidade 1

2. 1. Eu acho que gostaria de usar esse sistema com frequência.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

3. 2. Eu achei o sistema desnecessariamente complexo.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

4. 3. Eu achei o sistema fácil de usar.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

5. 4. Eu acho que precisaria de ajuda de uma pessoa com conhecimentos técnicos para controlar remotamente o robô.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

6. 5. Eu acho que as várias funções do sistema estão muito bem integradas.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

7. 6. Eu achei o sistema muito inconsistente.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

8. 7. Eu imagino que as pessoas aprenderão como controlar o robô rapidamente.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

9. 8. Eu achei o sistema complicado de usar.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

10. 9. Eu me senti confiante ao usar o sistema.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

11. 10. Eu precisei aprender várias coisas novas antes de conseguir usar o sistema.

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente	☐	☐	☐	☐	☐	Concordo totalmente

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários