

Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

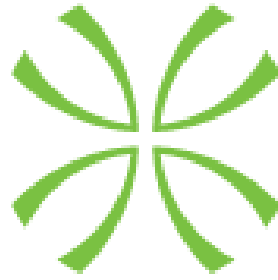
**Dissertação
Garra Robótica**

Pedro André Gomes Gonçalves

IPT/ESTA

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Tomar para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica

Abrantes, Novembro 2022



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

Garra Robótica

Pedro André Gomes Gonçalves

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Tomar para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica

Abrantes, Novembro 2022

© Pedro André Gomes Gonçalves, 2022

Resumo

Segurar, deslocar e colocar os objetos são as capacidades fundamentais e operações comuns para braços robóticos industriais. As garras são um dos componentes com maior relevo para esta indústria, onde estas têm o papel principal na manipulação e realização de tarefas, uma vez que servem como ferramenta, bem como interface mecânica entre robôs ao agarrar objetos. O desenvolvimento das garras para o ambiente industrial foi estimulado por várias necessidades entre elas de adaptar processos e criar sistemas fiáveis. Segurar objetos não requer apenas contacto com os mesmos, mas também evita o risco de potenciais quedas e danos quando os objetos são agarrados e transportados. Para oferecer segurança ao segurar vários tipos de objetos consoante as necessidades de aplicação ao longo do tempo foram desenvolvidas vários tipos de formatos e vários tipos de materiais na sua construção, no entanto, mas com a cooperação de sensores e modos de controlo conseguiu-se aumentar drasticamente a fiabilidade na realização da tarefa. Esta ferramenta no braço robótico pode ser vista como uma extensão da mão humana num robô, onde esta é automatizada e programada para as necessidades exequíveis. Esta dissertação aborda um breve resumo sobre garras robóticas, com foco na versatilidade de aplicação seja em componentes rígidos, como por exemplo na indústria metalomecânica ou até mesmo sensíveis como por exemplo na área da agricultura. Após este desenvolvimento é apresentada uma solução de uma ferramenta acoplada ao braço robótico, onde este possibilita um maior leque de abertura e fecho que a garra original, conseguindo assim satisfazer as necessidades de projeto.

Palavras-Chave: Garra, Braço Robótico, Robô Industrial.

Abstract

Holding, moving and placing objects are the fundamental capabilities and common operations for industrial robotic arms. Grippers are one of the most relevant components for this industry, where they play the main role in manipulating and performing tasks, since they serve as a tool as well as a mechanical interface between robots when grasping objects. The development of grippers for the industrial environment was stimulated by several needs among them to adapt processes and create reliable systems. Gripping objects not only requires contact with them, but also avoids the risk of potential falls and damage when objects are grasped and transported. In order to offer safety in holding various types of objects depending on application needs over time various types of shapes and various types of materials have been developed in their construction, however, but with the cooperation of sensors and control modes it has been possible to drastically increase the reliability in performing the task. This tool on the robotic arm can be seen as an extension of the human hand on a robot, where it is automated and programmed to feasible needs. This thesis addresses a brief summary about robotic grippers, focusing on the versatility of application either in rigid components, as for example in the metalworking industry or even sensitive ones as for example in the agriculture area. After this development, a solution of a tool coupled to the robotic arm is presented, where it allows a wider range of opening and closing than the original gripper, thus satisfying the project needs.

Keywords: Gripper, Robotic Arm, Industrial Robot.

Índice

Resumo	4
Abstract.....	5
Índice	6
Índice de Figuras.....	9
Índice de Tabelas	11
Índice de Abreviaturas	12
Agradecimentos	13
Keywords	14
1. Introdução.....	15
2. Contextualização	16
3. Teoria Garras Robóticas	17
3.1. Classificação.....	17
3.2. Segurar.....	19
3.3. Fases do processo	20
3.4. Estratégias, planeamento e modelos.....	20
4. Metodologias	21
4.1. Garra Pneumática	22
4.2. Garra Hidráulica	23
4.3. Garra por sucção.....	24
4.4. Garra com acionamento elétrico.....	24
5. A utilização de sensores com base nas estratégias de controlo	25
5.1. Sensores de comutação.....	25
5.2. Sensores táteis	26
5.3. Sensores óticos	27
5.4. Sensores de medição	27

6.	Robô	28
6.1.	Kuka KR 6 R1820	28
6.2.	Benefícios	30
6.3.	Parâmetros	30
6.4.	Robôs Colaborativos	31
7.	Metodologia.....	31
7.1.	Necessidade	32
7.2.	Desenvolvimento.....	33
7.3.	Design.....	34
7.4.	Impressão.....	34
8.	Desenvolvimento da garra robótica e componentes.....	35
8.1.	Desenvolvimento do <i>design</i>	35
8.2.	Software.....	35
8.3.	Impressão 3D.....	36
8.4.	Atuador	38
9.	Materiais.....	50
9.1.	Impressão 3D.....	50
9.2.	Produção final.....	51
10.	Adaptação.....	53
10.1.	Adaptação ao robô.....	53
10.2.	Adaptação aos objetos	57
11.	Montagem do sistema em 3D	62
11.1.	Montagem no braço robótico.....	62
11.2.	Montagem no sensor de colisão	63
12.	Peso do conjunto	64
13.	Programação.....	65
13.1.	Kuka Robot Language “KRL”	65
13.2.	Desenvolvimento do programa.....	65

14.	Sistema	66
15.	Ensaio.....	67
16.	Melhorias.....	67
17.	Conclusão	68
18.	Bibliografia.....	69
19.	Anexos.....	71

Índice de Figuras

Fig. 1 - Tipos de atuadores robóticos.....	18
Fig. 2 - Metodologias de classificação.....	18
Fig. 3 - 6 Metodologias utilizadas nas garras robóticas.....	22
Fig. 4 - Garra Pneumática.....	23
Fig. 5 - Garra hidráulica.....	23
Fig. 6 - Garra por sucção.....	24
Fig. 7 - Garra com acionamento elétrico.....	25
Fig. 8 - Kuka KR 6 R1820.....	28
Fig. 9 - Zona de trabalho.....	29
Fig. 10 - Diagrama de carga admissível.....	29
Fig. 11 - Processo de elaboração da dissertação.....	31
Fig. 12 - Diagrama de necessidade.....	32
Fig. 13 - Planeamento das necessidades.....	33
Fig. 14 - Impressão.....	37
Fig. 15 - Impressora 3D Anet A8.....	37
Fig. 16 - Garra com movimento paralelo.....	38
Fig. 17 - Garra com movimento paralelo.....	39
Fig. 18 - Garra com atuação elétrica.....	40
Fig. 19 - Atuador pneumático.....	40
Fig. 20 - Simulação de Força Externa.....	42
Fig. 21 - Tabela de força (N) Vs distância (mm).....	43
Fig. 22 - Simulação de Força Interna.....	43
Fig. 23 - Tabela de força (N) Vs distância (mm).....	43
Fig. 24 - Simulação de Força Externa com centro desviado.....	44
Fig. 25 - Tabela de distância em y (mm) Vs distância em x (mm).....	44
Fig. 26 - Simulação de Força Interna com centro desviado.....	45
Fig. 27 - Tabela de distância em y (mm) Vs distância em x (mm).....	45
Fig. 28 - Deslocações atuador no braço robótico.....	46
Fig. 29 - Cargas admissíveis dos atuadores.....	46
Fig. 30 - Circuito pneumático SMC MHZ2-25D.....	48
Fig. 31 - Vista Explodida SMC MHZ2-25D.....	48
Fig. 32 - Dimensões SMC MGHZ2-25D.....	49
Fig. 33 - Atuador Selecionado em 3D.....	49
Fig. 34 - Carbonfil.....	50

Fig. 35 – Flange de montagem Kuka KR 6 R1820.....	53
Fig. 36 - Flange direta.....	54
Fig. 37 - Flange direta.....	54
Fig. 38 - Impressão 3D Flange Direta.....	54
Fig. 39 - Vista Superior da flange acoplamento ao sensor	55
Fig. 40 - Vista Inferior da flange acoplamento ao sensor	55
Fig. 41 - Impressão 3D flange acoplamento ao sensor	55
Fig. 42 - Ligação flange - atuador.....	56
Fig. 43 - Flange e acessório de ligação ao atuador	56
Fig. 44 - Conjunto com atuador	57
Fig. 45 - Vista Inferior do adaptador	58
Fig. 46 - Vista Superior do adaptador	58
Fig. 47 - Impressão 3D Placa Bidirecional (a).....	59
Fig. 48 - Impressão 3D Placa Bidirecional (b)	59
Fig. 49 - Montagem Placa Bidirecional vista frontal.....	60
Fig. 50 - Montagem Placa Bidirecional vista posterior	60
Fig. 51 - Pino vista lateral	61
Fig. 52 - Pino vista frontal	61
Fig. 53 - Impressão 3D do pino, onde demonstra as dificuldades de impressão devido ao dano do nozzle	61
Fig. 54 - Conjunto com ligação direta Vista Frontal	62
Fig. 55 - Conjunto com ligação direta Vista Lateral.....	62
Fig. 56 - Conjunto com ligação a sensor de colisão Vista Frontal	63
Fig. 57 - Conjunto com ligação a sensor de colisão Vista Posterior.....	63
Fig. 58 - Movimento PTP com paragem exata	65
Fig. 59 - Movimento LIN com paragem exata	66
Fig. 60 – Robô com atuador com flange direta.....	67

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Especificações técnicas Kuka KR 6 R1820	29
Tabela 2 - Tabela de características SMC MHZ2-25D	47
Tabela 3 - Tabela descrição componentes SMC MHZ2-25D	48
Tabela 4 - Abertura máxima vs mínima	49
Tabela 5 - Alcance abertura e fecho do atuador	58
Tabela 6 - Calculo peso total conjunto sem sensor de colisão	64
Tabela 7 - Calculo peso total conjunto com sensor de colisão	64

Índice de Abreviaturas

IPT - Instituto Politécnico de Tomar;

CAD - Desenho assistido por computador;

2D - Computação gráfica de duas dimensões;

3D - Computação gráfica tridimensional;

CNC - Controle Numérico Computadorizado;

FDM - Fused Deposition Modeling;

ABS - Acrilonitrila butadieno estireno;

F – Força;

N – Unidade Newton;

U - Coeficiente de fricção;

M - Massa (Kg);

G - Coeficiente de aceleração ($=9,8 \text{ m/s}^2$);

Mg - Peso do objeto (N);

Z - Valor da margem de segurança recomendada para impactos e variações de velocidade bruscas;

MPa - Unidade padrão de pressão e tensão no Sistema Internacional de Unidades;

KRL - Kuka Robot Language;

PTP - Ponto-a-Ponto;

LIN - Movimento Linear;

PLA - Ácido Polilático.

Agradecimentos

A presente dissertação, Projeto de garra robótica, teve o contributo de diversas pessoas, e assim aproveito para agradecer a todos aqueles que ajudaram a superar algumas dificuldades de natureza institucional, científica e metodológica.

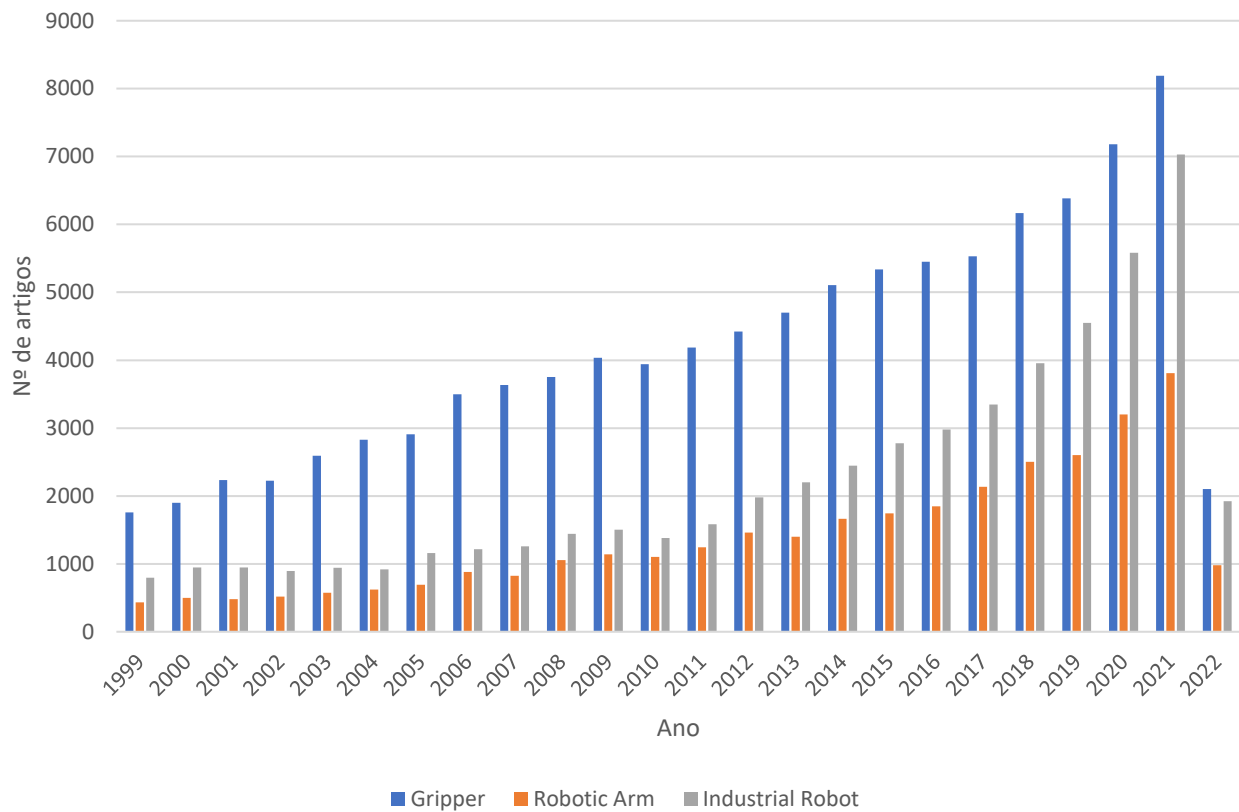
Aos Professores Bruno Chaparro, o meu primeiro agradecimento pela presente orientação temática. Agradeço a confiança depositada no trabalho e enorme disponibilidade.

Aos colegas de mestrado que têm acompanhado este percurso, demonstrando apoio e amizade, os maiores agradecimentos.

A todos os familiares e amigos que apoiaram e acompanharam o trabalho, os mais sinceros reconhecimentos, particularmente quando se viram privados de tempos de convívio e lazer. Aos meus familiares próximos o meu profundo agradecimento, pelo incentivo constante, contributo e apoio prestado.

Keywords

Gráfico - Keywords em função de nº artigos científicos Vs ano (1999 até 2022)



1. Introdução

Os robôs e braços robóticos foram ao longo do tempo desenvolvidos para cooperar ou substituir os seres humanos em trabalhos repetitivos, sujos ou perigosos [1]. As operações que parecem básicas para um ser humano como a simples tarefa de apanhar e deslocar objetos de vários tamanhos, formatos, materiais e superfícies podem ser bastante desafiante para uma garra robótica [2]. Uma garra colocada em um braço robótico tem na sua grande maioria o objetivo de segurar, transportar e colocar objetos num determinado espaço, existindo uma panóplia de diversas montagens que podem fazer abrir e fechar as suas garras, eletricamente, pneumaticamente ou por outro tipo de força que faça o movimento de abertura e fecho da mesma. As garras robóticas são essencialmente componentes dos braços robóticos. Estas comportam-se como mãos dos próprios robôs para executar funções para as quais onde foram programadas. A operação de segurar um objeto com segurança não requer apenas contacto com o mesmo, mas também prevenir potenciais deslizamentos que podem posteriormente danificar o objeto que se está a manipular.

A ideia e o desenvolvimento de um sistema robótico aliou-se com a tecnologia conseguindo-se fazer a união da articulação onde por esta conseguiu unir a articulação dos braços robóticos e garras robóticas graças à automação tendo como objetivo preencher os requisitos e flexibilidade necessária, sendo que estes foram passos de extrema importância na área da engenharia mecânica [3]. Os primeiros modelos de garras modulares foram desenvolvidos há cerca de 30 anos como acessórios *standards*, ou seja, toda a conceção era igual, sendo estas necessárias de aplicar em vários tipos de funções. Desde 1975, as garras tiveram um grande desenvolvimento tecnológico devido ao grande número de diferentes necessidades, diversos objetos e necessidade de adaptar ao meio envolvente de cada aplicação para se conseguir obter um sistema fiável [4]. As primeiras garras foram desenvolvidas para um ambiente industrial, hoje em dia a aplicação das garras robóticas foram expandindo para outras áreas que acabamos por encontrar no nosso dia-a-dia. Após se concluir que uma garra seria uma ótima ferramenta para operação na aplicação de um braço robótico começou a desenvolver-se vários tipos de acoplamento com vários *designs* permitindo uma interligação simples e fiável. Empresas como a *Festo*, *Shunck* e *BTM* começaram a desenvolver garras de diversos *designs* devido à panóplia de necessidades dos clientes conseguindo assim assegurar que em diferentes aplicações exista segurança não só ao segurar e deslocar objetos como garantir fiabilidade no meio onde estes possam ser inseridos. Devido a esta necessidade de adaptação foram criadas quatro categorias generalizadas onde se incluem: “Garra

de impacto” (garras que utilizam uma força de impacto para segurar o objeto), “Garra Intrusiva” (garras que contêm alfinetes, agulhas ou outros acessórios que são utilizados para penetrar fisicamente na superfície do objeto. “Garras Atrativas” (garras que trabalham usando o poder de sucção ou magnetismo) e “Garras Contíguas” (garras que para executar o trabalho necessitam de contactar diretamente a superfície para assim introduzir pressão no objeto) [4]. Para se poder segurar e mover objetos de vários tamanhos e formatos sem existir potenciais deslizamentos e danos enquanto decorre o trabalho é necessário criar uma ordem de operações, inserção de vários sensores e técnicas que possam tornar o movimento mais fiável. Existem inúmeras aplicações onde as garras robóticas podem ser usadas, esta dissertação tem como objetivo elaborar componentes de interligação á flange do robô e adaptar o atuador selecionado para as necessidades propostas.

2. Contextualização

Com o início da nova revolução industrial em curso, os robôs estão a substituir cada vez mais os humanos em tarefas repetitivas, inseguras ou de fabricação pesada. A maioria das indústrias de automóveis, eletrônicos, aeroespacial, entre outras, utilizam manipuladores robóticos com garras robóticas do tipo pinça em linhas de produção de grande escala. Porém, devido às atuais condições de fabricação e montagem, os produtos estão a ser produzidos em menor escala, contudo, mais personalizáveis e variáveis, exigindo robôs com maior adaptabilidade, fácil reconfiguração em *software* e *hardware*, mais flexibilidade e maior capacidade de manipulação.

Conforme *Groover* [2], as garras robóticas mecânicas são fins de curso utilizados para agarrar e manipular objetos durante o ciclo de trabalho. Devido à variedade de formatos, tamanhos e pesos das peças, a maioria das garras devem ser personalizadas, existindo para isso diferentes tipos de garras robóticas utilizadas em aplicações industriais, tais como: garra a vácuo, dispositivos magnetizados e garras mecânicas. Os atuadores mecânicos de duas garras são o tipo mais comum de atuadores, apresentando grande variedade, sendo a sua principal desvantagem a limitação da abertura das garras não garantindo uma compressão segura do objeto, podendo deslizar facilmente caso possua irregularidades.

3. Teoria Garras Robóticas

3.1. Classificação

Na robótica, a garra é a parte principal da manipulação do robô. A garra robótica é a ligação final do mecanismo do robô que está conectado ao final do braço robótico e projetado para interagir com o meio ambiente. Funciona como a mão do robô e permite que este manipule objetos. Ao longo do tempo foi surgindo a necessidade de geração de atuadores para várias tarefas em diferentes campos. Os atuadores robóticos são vitais para uma ampla gama de aplicações - operações de armazéns industriais, militares que envolvem tarefas sujas, tarefas perigosas, como soldadura a alta temperatura, deslocação de materiais radioativos, desarmar bombas e minas. Além disso, são também utilizadas para operações complexas como a fabrico de estruturas microeletrônicas, cirurgias e trabalhos repetitivos. Daí a importância de selecionar, o robô mais adequado no sistema robótico.

Na estrutura mecânica, o atuador robótico existe com diferentes tipos onde este pode ser utilizado em áreas diferentes. Os atuadores mecânicos com a posição das garras paralelas é a mais comum, estas tem garras que se movem paralelamente. Dependendo do desenho do atuador, duas ou mais garras aplicam a forças internas ou externas enquanto seguram o objeto [9]. A diversidade atuador é desenvolvido por ser o mais flexível e multifuncional [9]. Ao usar uma garra robótica multifuncional, é possível segurar uma variedade de objetos e materiais em diversos ambientes de trabalho.

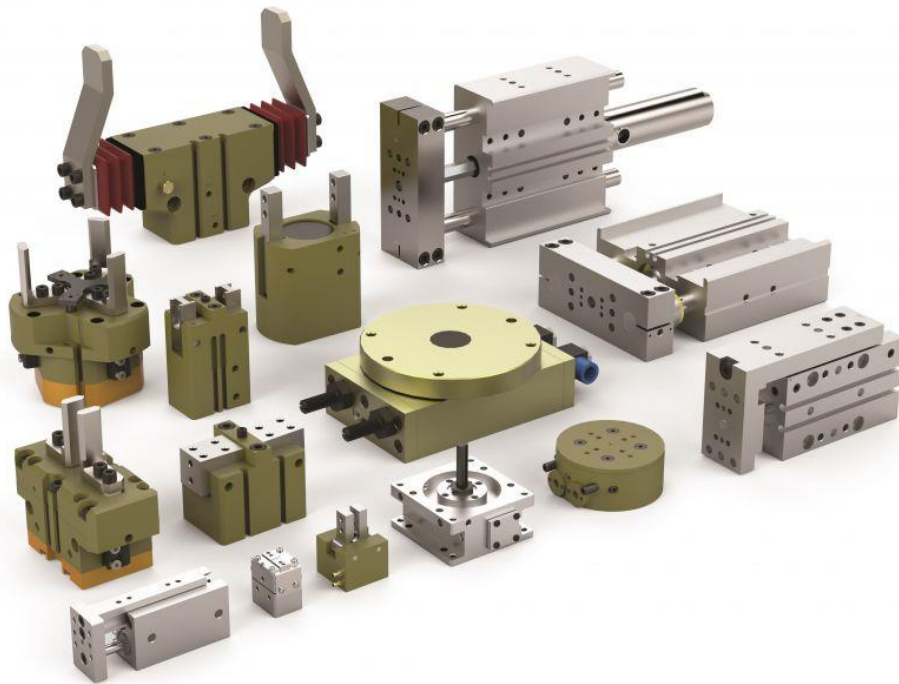


Fig. 1 - Tipos de atuadores robóticos

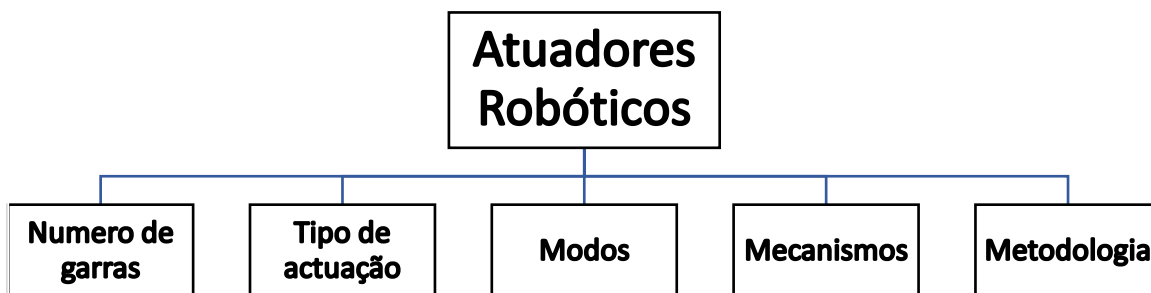


Fig. 2 - Metodologias de classificação

Atuadores robóticos com múltiplas garras promovem segurança ao executar as tarefas, mas o método de controlo tornar-se-á mais complexo. O tipo de atuadores robóticos pneumáticos e elétricos são os mais utilizados na indústria, visto que os pneumáticos garantem um elevado poder de força ao segurar o objeto e os elétricos podem ser precisos e facilmente controláveis. Para aplicações onde é necessário manobrar objetos de elevada carga por norma são utilizados os

atuadores hidráulicos, pois entre os existentes é o sistema que garante mais força de aperto à carga a movimentar.

Os vários modos de segurar o objeto dividem-se em três tipos, estes são, atuadores com garras internas, garras externas e garras externa-interna. Estes modos devem ser selecionados consoante a estrutura do objeto a movimentar.

Segundo o mecanismo os atuadores podem ser divididos em quatro categorias principais como acionado por um parafuso (os atuadores são atuados por um parafuso que gira uniformemente através de um motor com redutor de velocidade), por cremalheira e pinhão, por um mecanismo de came e por um mecanismo de engrenagens helicoidais.

Segundo a metodologia de segurar o objeto esta pode ser dividida em três grupos, os atuadores com garras robóticas de impacto (atuam diretamente no objeto com força em duas ou mais direções), garras robóticas intrusivas (passam pela superfície do objeto), garras robóticas contíguas (utilizam um método sem impacto em que o contacto direto apenas é necessário para criar pressão no objeto numa única direção).

3.2. Segurar

Segurar objetos é uma das necessidades da indústria robótica, e com a automação é articulada com vários tipos de estratégias. A complexidade do processo é muitas vezes subestimada devido à facilidade humana de o fazer, para um atuador robótico todos os fatores irão proporcionar dificuldades desde o formato do objeto, o tipo de material e mesmo o movimento para segurar, deslocar e colocar de forma desejada. Além dos objetos o braço robótico terá de saber o espaço de trabalho e o interagir no seu envolvente. É de extrema importância que seja dada uma informação específica de onde se encontra o seu objeto e posição. Todos estes fatores são planificados anteriormente a qualquer movimento que seja produzido por o mesmo e só assim se consegue obter uma elevada precisão ao manobrar o objeto.

3.3. Fases do processo

Para reduzir conflitos no processo de segurar este deve ser repartido em várias fases. As sete fases do processo do movimento de segurar um objeto com um atuador robótico de duas garras podem ser sumarizadas:

- (1) Aproximação (a garra robótica encontra-se aberta e posicionada para fechar e fazer contacto com a superfície do objeto);
- (2) Contacto (a garra robótica é atuada e estabelece o contacto com a superfície do objeto);
- (3) Aumento de força (as garras da garra robótica imputem uma força na superfície até que seja estável e seguro de segurar o objeto);
- (4) Segurar (as garras param de efetuar força na superfície do objeto quando este atinge o equilíbrio dinâmico para elevar o objeto);
- (5) Elevação (o objeto é deslocado para o local desejado);
- (6) Soltar (a força é removida e pela força da gravidade o objeto é solto);
- (7) Monitorizar a pressão (o contacto efetivo ao segurar necessita de ser monitorizado usando vários sensores, desde sensores de força, de pressão, torque).

3.4. Estratégias, planeamento e modelos

Estratégias, planeamento, modelos podem ser bastantes diferentes consoante a aplicação da garra robótica, estas são as bases ou pontos de partida para se poder definir e abordar como se agarra o objeto [5]. Todos os fatores desde geometria às propriedades mecânicas devem ser analisadas com detalhe, pois irão influenciar o modo em que a garra irá ser configurada, assim como influenciará a estratégia de colocação da garra no objeto para o movimentar e por fim o comportamento do robô ao efetuar o trabalho desde a eficácia à estabilidade do mesmo. Assim podemos identificar a capacidade de um sistema que não é modificado para se adaptar ao objeto, avaliar a segurança e a flexibilidade, avaliar a estabilidade do movimento e o equilíbrio ao libertar o objeto no lugar definido.

4. Metodologias

As metodologias podem-se dividir em quatro grupos, incluindo metodologias mecânicas, metodologias pneumáticas, metodologias químicas e metodologias eletromagnéticas. A metodologia mais frequente é a força mecânica a partir de duas ou mais direções usando garras robóticas paralelas e garras robóticas com múltiplas garras, estas podem ser controladas com a aplicação de micro sensores nos locais onde a garra exerce força na superfície e assim se conseguir medir e controlar em tempo real a força exercida. A vantagem de utilizar metodologias mecânicas são a grande flexibilidade de aplicação, fácil adaptação a vários tamanhos e formatos dos objetos, no entanto para um controlo mais complexo trazem algumas desvantagens. Na metodologia pneumática podemos utilizar o vácuo. As garras por vácuo utilizam a sucção com uma membrana que se adapta a qualquer tipo de objeto. A metodologia pneumática tem vantagens ao elevar objetos com características largas e com superfícies direitas, por isso, facilmente a encontramos na indústria dos semicondutores e da alimentação. Com as metodologias químicas é possível segurar os objetos com a uma reação química que permite criar uma aderência à superfície do objeto. No campo do eletromagnetismo existem duas metodologias que podem utilizar o campo magnético ou campo elétrico, estas dão-se por nome de sensores indutivos e sensores capacitivos. Estas podem ser ativadas por um interruptor on/off diretamente pelo controlador do robô. A maior parte das garras que existem no mercado utilizam sensores indutivos porque com estes consegue-se obter um sistema fiável que se adapta a vários tipos de objetos com diferentes formatos e tamanhos, evitando o uso de múltiplos sensores.

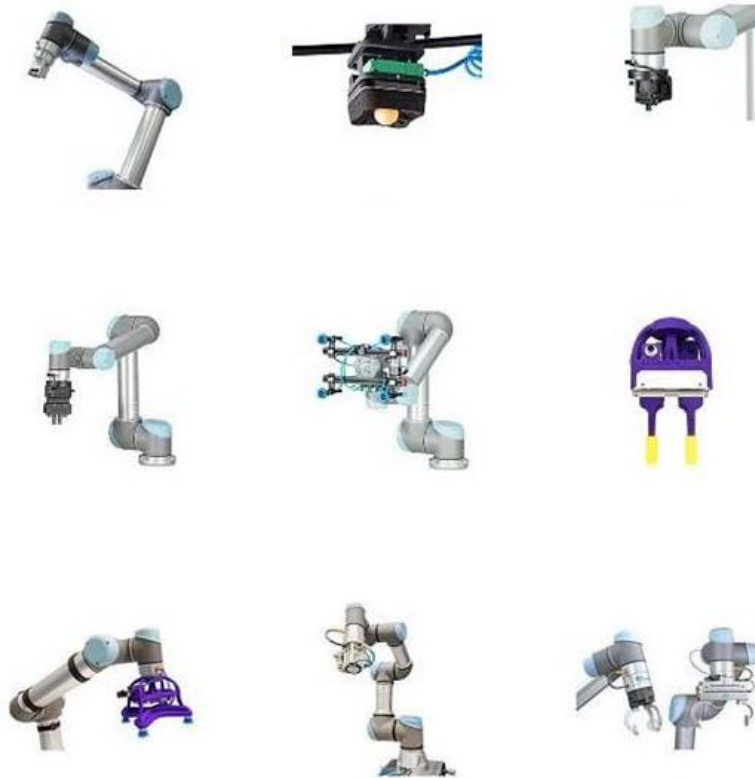


Fig. 3 - 6 Metodologias utilizadas nas garras robóticas

4.1. Garra Pneumática

A garra pneumática funciona através de um sistema com atuador pneumático onde inclui uma multiplicidade de garras para conseguir agarrar e movimentar um objeto. A garra pneumática usa ar comprimido para conseguir mover as garras e são controladas através de válvulas solenoides pneumáticas ou cilindros pneumáticos. Este tipo de garra permite um maior poder de força e velocidade com baixo custo. Uma característica importante da garra pneumática é que força e a velocidade são independentes uma da outra e podem ser facilmente controladas. Este tipo de garra é uma das mais económicas quando se compara a força e a velocidade que podemos ter disponível [12]. A garra pneumática é amplamente utilizada na indústria, devido ao seu peso e tamanho compacto. Na indústria, a garra pneumática mais utilizadas são as de duas garras paralelas e de duas garras angulares [10].



Fig. 4 - Garra Pneumática

4.2. Garra Hidráulica

O princípio de funcionamento da garra hidráulica é o mesmo da garra pneumática, mas em vez de ar comprimido, funciona com líquido incompressível injetado por uma bomba. A garra hidráulica exerce mais força e é por isso que estas são usadas para aplicações que exigem uma força elevada. Estas podem fornecer força 25 vezes [9] maior que um cilindro pneumático como mesmo tamanho. Podem também fornecer pressão desde 135-275 bar [9]. Em comparação com outros tipos de garras, as garras hidráulicas exigem mais manutenção devido à força realizada através da bomba.

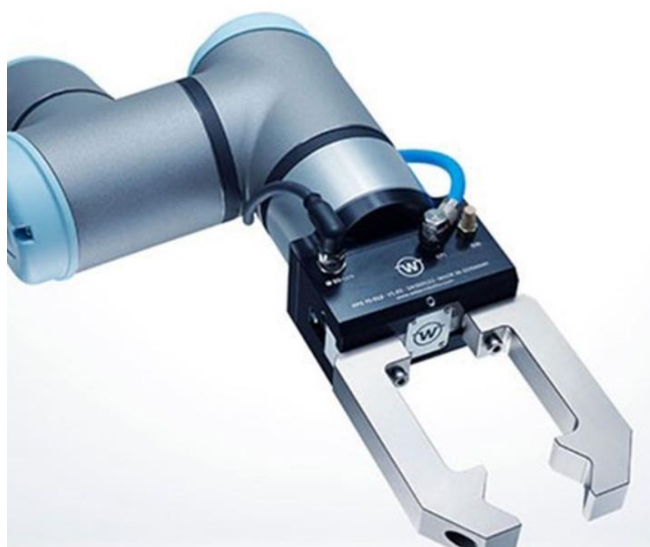


Fig. 5 - Garra hidráulica

4.3. Garra por sucção

A garra por sucção é utilizada para segurar um objeto ou recolocar objetos. Este tipo de garra funciona através dos Princípios de *Bernoulli* [10], em que esta cria um fluxo entre a ventosa do robô e a superfície do objeto. O vácuo gerado é usado para elevar folhas planas e lisas de alguns materiais, como por exemplo madeira, vidro, metal e painéis de plástico [10]. A ventosa normalmente feita de borracha ou poliuretano, sendo que esta pode resistir a temperaturas entre -50°C e 200°C [12]. A face de trabalho das ventosas é adequada para uma ampla variedade de necessidades e circunstâncias. Estas são feitas de materiais elásticos, flexíveis e borracha. O sensor de colisão do robô deve ser adequado para este tipo de garra, pois esta requer uma colisão com pressão no objeto, o que em um sensor tipicamente usado no conjunto de uma garra pneumática pode disparar o sensor.



Fig. 6 - Garra por sucção

4.4. Garra com acionamento elétrico

A garra com acionamento elétrico tornaram-se uma das mais competitivas na indústria, devido ao seu elevado poder de controlo. A garra com acionamento elétrico são acionadas por motores elétricos como um servo motor. Ao contrário das garras de acionamento pneumático, as garras com acionamento elétrico têm controlo preciso e posicionamento e estas possuem um menor custo operacional. As vantagens são o posicionamento e a velocidade que pode ser facilmente controlada. Este tipo de garras estão altamente avançadas e flexíveis sendo úteis para lidar com uma elevada gama de tolerâncias de materiais.



Fig. 7 - Garra com acionamento elétrico

5. A utilização de sensores com base nas estratégias de controlo

A mão humana pode ser vista como uma garra robótica com um sistema complexo que integra vários sensores. Esta oferece uma elevada estabilidade, flexibilidade, fácil adaptação e outras habilidades que permitem criar um ambiente perfeito tudo ao comando do nosso cérebro. As garras robóticas tentam reproduzir o funcionamento da mão humana utilizando várias metodologias e múltiplos sensores, principalmente usando sensores de toque e de perceção visual, com a interação destes sensores a garra não só consegue ser um acessório para segurar um objeto mas também é capaz de analisar toda a informação entre a garra e o objeto.

5.1. Sensores de comutação

Vários tipos de sensores comutáveis são utilizados para receber sinais em sistemas mecânicos, estes podem indicar a posição da garra, se está aberta ou fechada, se a garra conseguiu segurar o objeto ou até mesmo enviar um sinal de binário para ativar outros mecanismos de controlo. Estes sensores de comutação podem ser divididos em quatro grandes categorias:

(1) Sensor de proximidade (permite um controlo sem que seja necessário contato entre garra e objeto, gerando um sinal assim que deteta proximidade. O sinal pode ser realizado por um sensor indutivo, capacitivo ou ótico.);

(2) Sensor de interruptor magnético “*reed switch*” (este funciona criando um campo magnético, se o sensor conter um contato normalmente fechado este irá abrir assim que detetar um campo magnético próximo. Assim que deixar de detetar o sensor volta ao seu estado normal.);

(3) Sensor de interruptor por toque (necessita de exercer contato com o objeto a operar, estes são comuns quando é necessário que desencadeiem ações seguintes. Por exemplo quando se utiliza uma garra que funciona por vácuo a sucção pode ser ativada assim que o sensor deteta que está a tocar na superfície do objeto.);

(4) Sensor de efeito *Hall* (trata-se de um transdutor que, quando sob aplicação de um campo magnético responde com uma variação de tensão de saída. Este tipo de sensores são usuais na indústria, pois, permitem ao robô reconhecer a superfície do objeto a segurar sem que haja contato direto com a garra.

5.2. Sensores táteis

O sensor tátil é um dispositivo que mede informações provenientes da interação física com o seu ambiente. São geralmente modelados a partir do sentido do toque, onde este é capaz de detetar grandezas mecânicas como, pressão, força de contato, aderência da superfície, vibração e temperatura. A resposta da força exercida é um elemento fundamental para a grande maioria das manipulações que envolvem interações físicas entre uma garra robótica e um objeto. As garras podem ser constituídas com este tipo de sensores nas suas pontas onde se exerce o contacto direto com o objeto, retirando assim a informação da força exercida.

A força de toque é a força de rotação sobre o eixo, esta medida é um sinal crucial para controlo e monitorização em tempo real do automatismo das operações a realizar [4]. Os sensores táteis tem sido aplicados ao longo das décadas nas garras robóticas com vários fins, incluindo, na precisão do controlo da resposta. Apesar da performance dos sensores táteis mais avançados, estes ainda se encontram longe da sensibilidade e capacidade do ser humano.

5.3. Sensores óticos

Sensores óticos são sensores que transformam a imagem ótica em sinais eletrónicos, sendo estes os mais adequados para o braço robótico identificar locais e objetos, determinar pontos que deve interagir com o objeto a manipular e identificar obstáculos à sua volta. A informação recolhida com este tipo de sensores é debitada ao controlador do braço robótico e torna possível o controlo de todo o processo [3]. Na categoria de tipos de sensores óticos mais utilizados pela indústria podem se dividir em dois, sensores de mono-câmara e sensores de dual-câmara.

- (1) Os sensores óticos de mono-câmara apenas conseguem produzir uma imagem em duas dimensões usando um sistema de uma câmara.
- (2) Os sensores óticos de dual-câmara utilizam duas ou mais lentes com um sensor integrado em cada uma delas, estas conseguem produzir imagens tridimensionais, dando uma informação mais detalhada do espaço envolvente e do objeto.

5.4. Sensores de medição

Os sensores de medição foram sempre utilizados para medir distâncias entre a garra e o objeto para assim o controlador conseguir receber a informação da distância em que a garra robótica se encontra dos objetos a interagir, ou definir o ajuste da separação da garra do objeto, ou até mesmo outras informações como velocidade, aceleração, força e torque.

Os sensores acústicos também podem ser considerados e utilizados como sensores de medição de distâncias ao utilizar tecnologias de emissão de ultrassons. Este tipo de sensores pode ser encontrado no artigo [6] e [7] onde abordam e desenvolvem o conceito pormenorizado das suas aplicações.

Os sensores táteis como os sensores acústicos podem também ser considerados sensores de medição. Sendo estes transdutores que variam a tensão de saída conseguem retirar informações de força/torque, proximidade e de escorregamento. Este tipo de sensores é abordado nos artigos [8] onde apresentam questões de controlo de garras robóticas com aplicação deste tipo de sensor e a evolução das garras robóticas.

6. Robô

6.1. Kuka KR 6 R1820

A ferramenta que foi desenvolvida nesta dissertação foi especificamente para aplicar no robô Kuka KR 6 R1820 que será utilizado como um braço robótico industrial de pequena dimensão sendo que já não é considerado robô colaborativo devido às suas dimensões, limitação de velocidade e força o que reflete no poder que pode transportar.



Fig. 8 - Kuka KR 6 R1820

O peso do robô é de 168 kg e 6 kg de carga útil. Este é idealizado para tarefas leves de montagem e deslocação de materiais leves, tem uma rotação de 360 graus e uma capacidade de quase 2 metros em extensão.

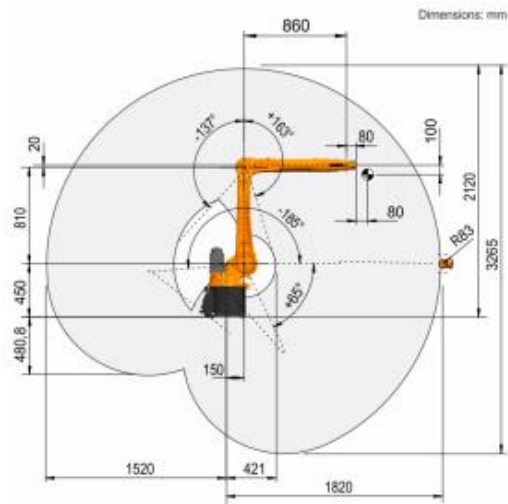


Fig. 9 - Zona de trabalho

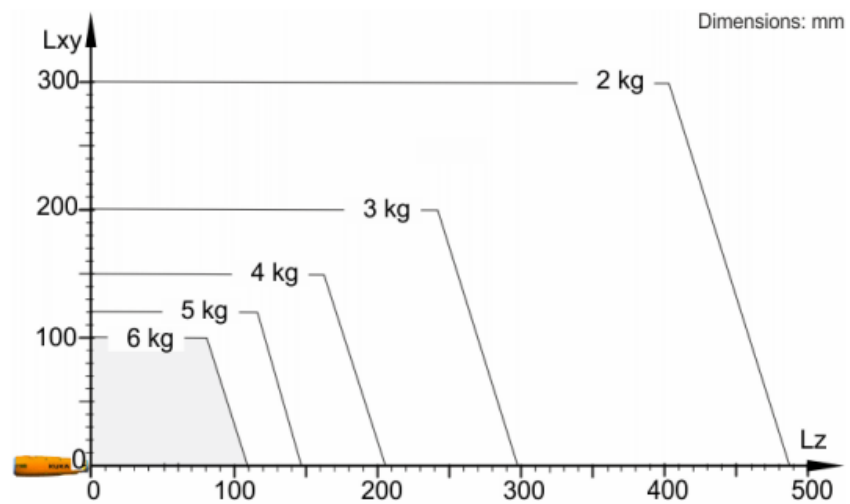


Fig. 10 - Diagrama de carga admissível

Especificações Técnicas:

Tabela 1 - Especificações técnicas Kuka KR 6 R1820

Especificações	Dados
Máximo alcance	1820 mm
Carga nominal	6 kg
Número de eixos	6
Posições de montagem	Chão Teto Parede
Dimensão	333.5 mm x 307 mm
Peso	168

6.2. Benefícios

Mais de 90% das tarefas na indústria são executadas por seres humanos [15]. O volume e as variantes do produto podem ser considerados como a forma mais comum de determinar quando esta é precisa ou não de ser automatizada. Os robôs destinam-se à interação direta e indireta com o ser humano para o transporte de carga útil partilhada com os benefícios no aspeto da ergonomia, produtividade e qualidade. Os robôs industriais têm melhorado continuamente a sua capacidade e eficiência de custos durante muitos anos, embora a implementação de robôs na indústria ainda exija recursos substanciais para a programação, medidas de segurança e manipulação [16]. Ainda existem alguns problemas como a manipulação de componentes complexos e macios, sendo estes os principais problemas que dificultam a sua implementação. Devido aos avanços em diversas áreas, tais como programação, sensores robóticos, reconhecimento ambiente envolvente, interfaces homem-máquina e tecnologia de sistemas de segurança, tornam possível alterar esta situação [16]. Com base nestes avanços é viável colaborar e controlar robôs por operadores sem riscos de segurança nos locais de trabalho.

6.3. Parâmetros

De acordo com diversos artigos publicados, existem vários parâmetros que devem ser considerados de forma significativa enquanto se utiliza os robôs colaborativos na indústria.

Ergonomia: É possível trabalhar com peças pesadas no local de trabalho que podem ser vistas como um risco de segurança para o operador. Por outro lado, é óbvio que a maior parte dos processos de montagem são feitos manualmente pelos operadores. Através da utilização de robôs, é possível remover a tarefa repetitiva e a tarefa que requer maior precisão em termos de garantia de qualidade. Além disso, vários estudos indicam que a ergonomia pode ser um fator chave para justificar o investimento.

Tempo de instalação: Uma das maiores desvantagens da utilização de robôs colaborativos é a reprogramação, esta requer conhecimentos especializados. No entanto, utilizando o modo de “aprendizagem” em alguns robôs que tem esta função disponível, estes podem ser programados ao deslocar o braço do robô e assim demonstrar os movimentos a serem feitos.

6.4. Robôs Colaborativos

Apesar do caso prático não ser aplicado num robô colaborativo este também pode ser adaptado ao mesmo. Devido às baixas capacidades de carga deste tipo de robôs que tem sido introduzidos lentamente nos grandes fabricantes mundiais, o conjunto desenvolvido adapta-se às capacidades máxima de carga. Um robô colaborativo é um robô industrial que consegue executar tarefas em segurança ao lado das pessoas sem necessitar de uma proteção à sua volta. Uma das grandes diferenças entre robôs colaborativos e robôs é a sua limitação de velocidade e força elevando o fator de segurança e poder de disparo imediato quando este contacta com um obstáculo. A flexibilidade e a habilidade cognitiva das pessoas ainda é necessária na indústria, sendo os robôs colaborativos uma ótima ferramenta de integração no ambiente de trabalho. Desde da integração de um operador e um robô colaborativo é expectável um aumento de qualidade e eficiência. Hoje em dia, as empresas estão cada vez mais interessadas no investimento de robôs não colaborativos, sendo apenas uma pequena parte da indústria de montagem manual que aposta neste tipo de máquina [12]. Até mesmo os robôs colaborativos têm o problema de segurança do ponto de vista do operador, o que se torna o principal fator para se conseguir uma aceitação da utilização de um robô deste tipo. Existem várias normas relativas aos robôs, tais como ISO 10218-1, ISO 10218-2 o primeiro é o padrão geral para o próprio robô, enquanto o segundo retrata o sistema e integração do robô [14]. Estes tipos de normas são utilizados para garantir o ambiente de trabalho seguro com os robôs colaborativos [15].

7. Metodologia

Este capítulo descreve os diferentes métodos utilizados para se poder desenvolver este projeto.

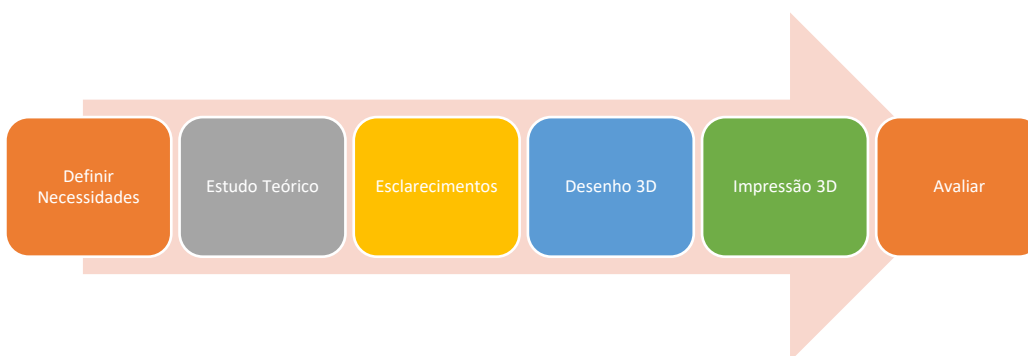


Fig. 11 - Processo de elaboração da dissertação

7.1. Necessidade

Nesta dissertação o problema proposto foi colocado pelo professor orientador do projeto, onde este colocou a necessidade de criar uma metodologia e uma ferramenta adequada para aplicar em um robô que já tinha adquirido. O objetivo foi desenvolver ferramentas que ao serem aplicadas ao braço robótico possam transformar e melhorar o desempenho do equipamento ao ser inserido numa linha de produção. No início do projeto o foco era resolver o problema real na indústria, sem ainda perceber realmente o problema em si, com as várias reuniões, com o debate de pontos de vista e ao encarar o 3D com a realidade foi possível desenvolver acessórios que fossem compatíveis com as necessidades e que tornassem uma ferramenta adaptável.

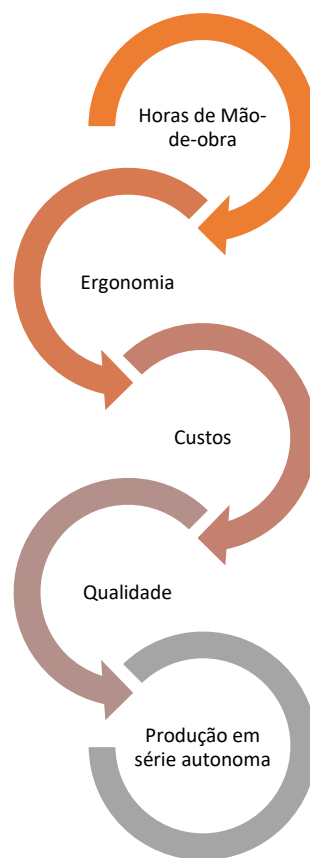


Fig. 12 - Diagrama de necessidade

Definir o problema real e chegar a uma conclusão do trajeto necessário para o resolver, com isto foi possível criar um processo onde se conseguiu demonstrar a rota traçada da análise e assim evidenciar as causas do problema. Este tipo de método é uma forma simples e sistemática de resolver as causas do problema e permitir definir melhor o problema, como normalmente utilizado

diagrama de *Ishikawa*. Neste caso, o problema encontra-se ao automatizar o processo de produção, onde existem duas causas principais, estas são o tempo de produção e a qualidade, e três causas básicas; custo, ergonomia e o custo da mão-de-obra. As causas são identificadas utilizando as especificações do orientador.

7.2. Desenvolvimento

O trajeto para o desenvolvimento é normalmente apresentada sob a forma de três tópicos: criação, definição e solicitação. A tarefa de conceção da dissertação assemelha-se sobretudo à solicitação, uma vez que foi solicitada pelo professor orientador para automatizar um processo de produção. Mesmo sendo uma solicitação de desenvolvimento de projeto temos sempre de reestruturar a ideia final, a fim de idealizar um *design* atrativo e funcional, quais as características ou propriedades que deve ter? Que objetivos podem ser alcançados com a alteração do *design*? Para conseguir resposta a estas questões, preparou-se uma lista de requisitos de conceção adequada onde foi elaborado os objetivos sob os quais os requisitos de conceção foram cumpridos. A figura seguinte mostra como foram seguidos os passos para elaborar a lista de requisitos apropriados para o processo de conceção e desenvolvimento.

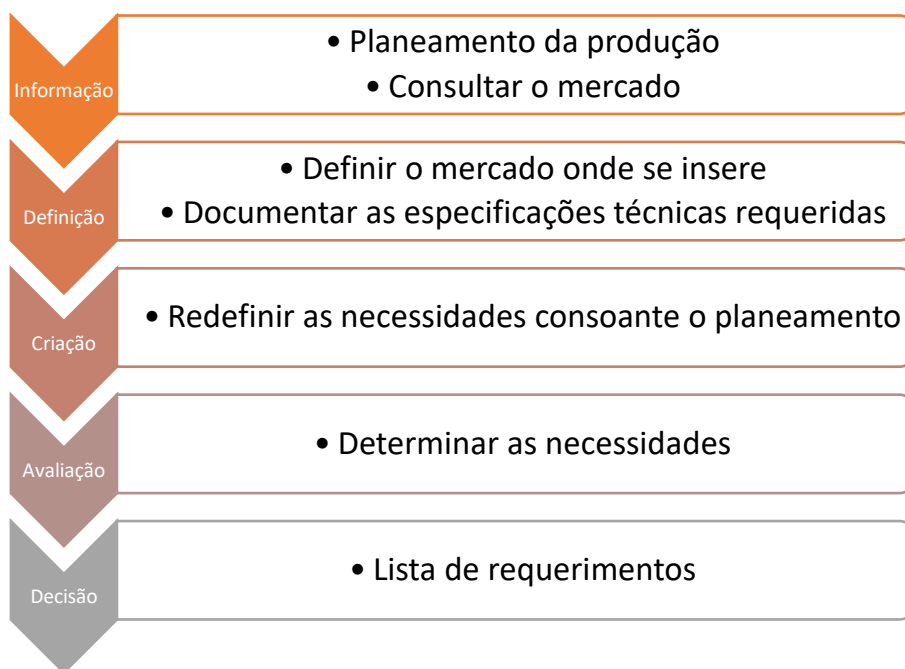


Fig. 13 - Planeamento das necessidades

O foco deste projeto será construir os componentes de adaptação à flange do robô e ao atuador escolhido criando na mesma adaptadores para agarrar e transportar vários objetos de tamanhos

diferentes e colocar e retirar os mesmos em uma máquina de *CNC*, estas são as exigências que têm de ser executadas pelo novo desenho da garra robótica.

7.3. Design

A fase de desenho conceptual é a etapa de clarificação de tarefas, uma vez que a lista de requisitos criados na fase de clarificação de tarefas é um pré-requisito para a fase do desenho. A lista de requisitos elaborados é uma forma benéfica de se centralizar os problemas envolvidos e aumentar o nível de informação detalhada. Por exemplo, alguns requisitos foram: segurar e transportar vários objetos de diferentes tamanhos e libertar os mesmos em uma máquina de *CNC*.. Segurar e transportar vários objetos de tamanhos de diferentes e libertar os mesmos em uma máquina de *CNC* são os requisitos mais significativos e relacionados na fase de conceção. Tendo isso em conta, o desenho é elaborado principalmente por estes requisitos sempre baseados na simplificação.

7.4. Impressão

Este é o passo que gerou o objeto físico a partir do conceito virtual. Após desenvolver o desenho dos componentes no *software* de desenho tridimensional, o software de impressão *3D* cortou a peça em várias camadas transversais e depois cada camada foi impressa de cada vez. Esta etapa resulta do desenho da etapa anterior que foi gerado o ficheiro *CAD* tridimensional do desenho da garra, depois este ficheiro é enviado como entrada para a etapa de impressão *3D* para gerar as peças. Mais á frente será desenvolvido detalhadamente esta etapa do processo.

8. Desenvolvimento da garra robótica e componentes

8.1. Desenvolvimento do *design*

A garra é o componente que interage diretamente com os objetos a manipular sem existir colisões. Para o desenvolvimento de acessórios e escolha da garra adequada para se adaptar às necessidades elaborou-se uma lista de pontos-chave na qual decorreu o desenvolvimento:

Pontos-chave:

- (1) Minimizar o custo de desenvolvimento: utilização de materiais de baixo custo;
- (2) Minimizar a pegada ecológica na produção: utilização de materiais menos poluentes;
- (3) Minimizar o peso do conjunto: aumentar o máximo a capacidade de elevação de objetos;
- (4) Manipular os objetos em segurança: idealizar uma forma segura de manipular objetos;
- (5) Evitar a troca de acessórios: criar acessórios mais abrangentes possíveis;
- (6) Desenvolver uma garra com uma multiplicidade de aberturas: apenas com uma garra garantir manipular vários diâmetros;

8.2. Software

A escolha do software *CAD* utilizado no projeto recaiu no *SolidWorks* devido à maior familiarização com o programa mas também à licença do *SolidWorks Student 2022* ser disponibilizada gratuitamente aos estudantes do *IPT*. Apesar da seleção ter recaído devido ao mencionado acima este é um dos programas mais amplamente utilizado pela indústria.

Alguns dos softwares disponíveis para desenho *CAD* são:

- | | | | |
|--------------|-----------|-------------------|--------------|
| → SolidWorks | → AutoCAD | → Rhino | → IronCAD |
| → Inventor | → CadKey | → Geomagic Design | → Siemens Nx |

8.3. Impressão 3D

Para a construção do conjunto atuador e componentes foi utilizada a impressão 3D. Este processo de fabrico apresenta diversas vantagens tais como:

- Diminuição do tempo de desenvolvimento: os protótipos podem ser mais rapidamente integrados e testados;
- A impressão é um processo aditivo de material em camadas, diminuindo o custo quando comparado com outras técnicas de fabrico tradicionais;
- Permite a customização das peças com as especificações desejadas.

A impressora 3D disponibilizada pelo professor orientador, Bruno Chaparro é uma Anet A8 com extrusão única. Utiliza o método de modelagem por fusão e deposição (*FDM*), que é um dos processos para imprimir em materiais termoplásticos como o *ABS*, elastómeros e poliéster. O material que formará a peça é aquecido a uma temperatura de 260°C e extrudado através do bico extrusor da impressora para uma plataforma. O filamento é depositado em camadas de acordo com o desenho efetuado no sistema *CAD*, que gera as coordenadas linha a linha da peça. A Anet A8 admite filamentos de 1.75 milímetros de diâmetro, uma velocidade de impressão variável de 40 a 120 mm/s e uma precisão de coordenadas (x,y) de 0.012 milímetros. Pode-se definir o espaçamento entre camadas, para aumentar ou diminuir a densidade da peça, entre 0.1 e 0.4 milímetros.

Após especificação da peça num programa *CAD*, utilizou-se o ficheiro, .stl em conjugação com o *software* Cura para imprimir segundo a orientação (x,y,z) mais conveniente. A extensão .stl corresponde a uma aproximação do sólido por triângulos. Quanto maior a complexidade da peça, maior o número de triângulos necessários para a descrever. Um conjunto de boas práticas seguidas para a impressão são:

- Escolher a orientação de impressão para minimizar a quantidade de suporte necessária;
- Evitar curvas de concordância, fazendo, sempre que possível, uma inclinação de 45° na impressão.

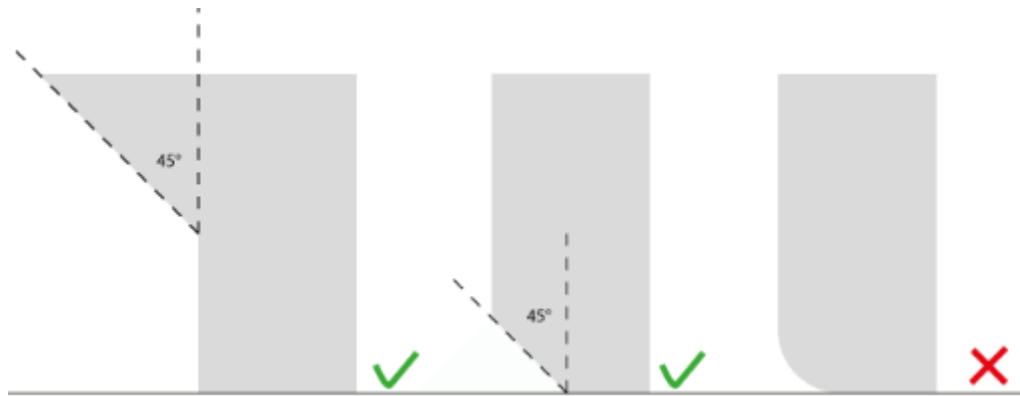


Fig. 14 - Impressão

Esta utilização evita o uso desnecessário de suporte, e como tal, consegue-se cortar o custo total de material e diminuir o tempo da impressão.

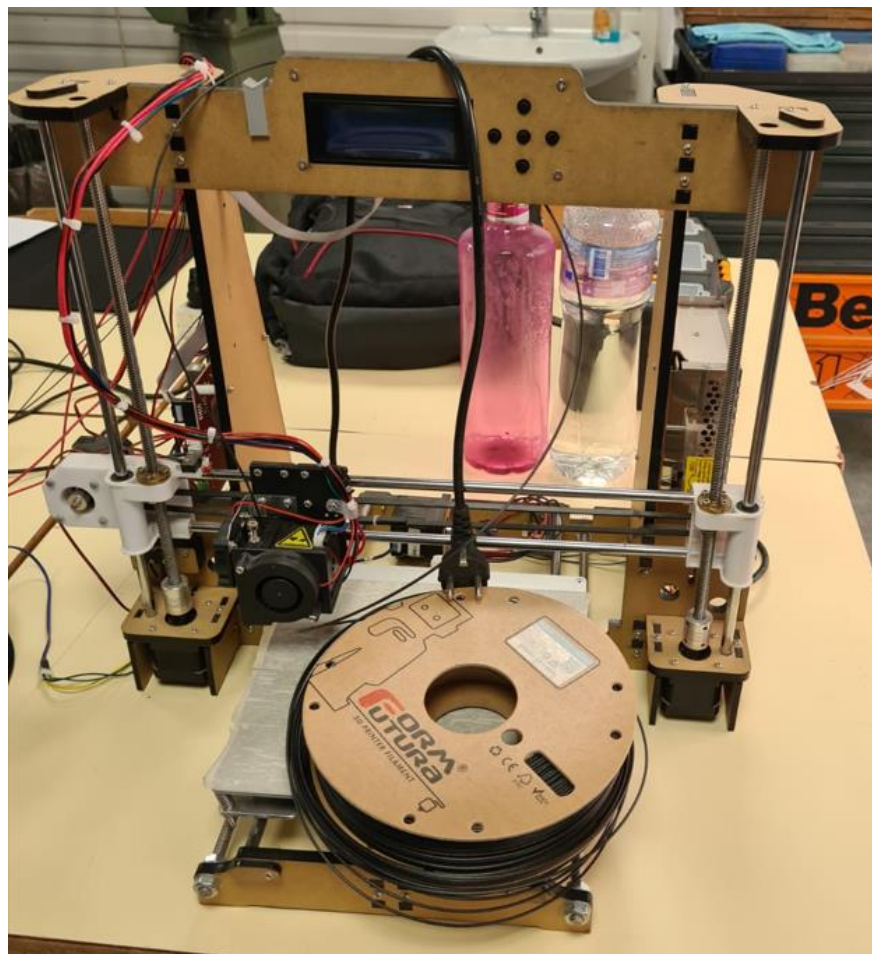


Fig. 15 - Impressora 3D Anet A8

8.4. Atuador

8.4.1. Movimento do atuador

8.4.1.1. Movimento Angular

O movimento angular de uma garra proporciona uma produção com menor custo, mas o seu movimento exige uma maior abertura quando a espessura do objeto altera. Esta normalmente é acionada por um cilindro pneumático onde este limita a abertura através do seu tamanho. Este tipo de garra visível na indústria de máquinas industriais como por exemplo escavadoras.



Fig. 16 - Garra com movimento paralelo

8.4.1.2. Movimento Paralelo

A garra com movimento paralelo é uma das mais utilizada na indústria, apesar de esta não se conseguir adaptar a todos os tipos de objetos. As garras movimentam-se em paralelo em relação ao corpo da mesma. Maioritariamente estas são visíveis em linhas de produção devido ao elevado poder de precisão e velocidade de manipulação.



Fig. 17 - Garra com movimento paralelo

8.4.1.3. Seleção do movimento

Comparando os tipos de movimentos estudados para aplicação do projeto, a escolha recaiu para a garra de movimento paralelo, esta é a mais apropriada para as necessidades do projeto. Sendo as mais simples de utilizar e serem versáteis tendo capacidade para manipular objetos de várias dimensões. Neste caso esta garra robótica poderá ser manipulada através de um cilindro pneumático visto a possibilidade de ser alimentado pelo robô.

8.4.2. Tipo de mecanismo

8.4.2.1. Elétrico

Com o desenvolvimento das ferramentas cada vez mais a escolha recai para a atuação elétrica. Com a facilidade de controlo do movimento tem sido populares na indústria, utilizando-as principalmente quando se pretende sensibilidade na força aplicada e velocidade. Por outro lado em comparação com os sistemas pneumáticos e hidráulicos os sistemas elétricos tem um poder de força inferior.



Fig. 18 - Garra com atuação elétrica

8.4.2.2. Pneumático

O sistema pneumático é o sistema que funciona através da compressão de ar, a sua principal característica é a conversão da pressão em força, ao transformar permite o movimento do pistão podendo ser controlado com um regulador de pressão ou uma válvula reguladora de fluxo. No entanto, a compressibilidade do ar é consideravelmente elevada, o que torna difícil controlar a velocidade do pistão. Quando analisamos os sistemas pneumáticos facilmente identificamos que a pressão do ar e a quantidade de ar utilizado são um dos fatores importantes na escolha do sistema pneumático adequado. Existe dois parâmetros principais na escolha do cilindro certo: Comprimento do curso e diâmetro do pistão. As válvulas de controlo direcional são utilizadas para controlar a direção do fluxo de ar entre os dois lados do cilindro. Há duas formas principais de diferenciar as válvulas de controlo direcional: posições de comutação e tipos de operações. As posições de comutação têm duas características principais: os orifícios e as posições, os orifícios são de entrada e saída de ar e as posições são a saída de ar principal que abre e fecha o cilindro.



Fig. 19 - Atuador pneumático

8.4.3. Seleção do Atuador

Para este projeto, a escolha recaiu para a utilização de uma garra pneumática devido às necessidades, o seu baixo custo de aquisição e desempenho pretendido. Com este tipo de garra será utilizada a alimentação de ar comprimido do robô. Para a escolha da garra adequada com a força necessária foi necessário elaborar um estudo, tendo em conta que as condições podem ser diferentes de acordo com o formato do objeto de trabalho e o coeficiente de fricção entre a garra e o objeto. Segundo os fabricantes deve-se selecionar um modelo que consiga fornecer uma força de 10 a 20 vezes do peso do objeto que se irá trabalhar, ou mais. Se o modo de trabalho do robô contém acelerações repentinas, desaceleração ou impacto durante o movimento, deve-se considerar uma margem segurança. Com base das recomendações recorreu-se aos seguintes cálculos:

Calculo 10 vezes da massa do objeto:

$$F = \frac{mg}{2 \times 0,1} Z = 20mg \quad (1)$$

Calculo 20 vezes da massa do objeto:

$$F = \frac{mg}{2 \times 0,2} Z = 10mg \quad (2)$$

Sendo:

F: Força (N);

U: Coeficiente de fricção;

M: Massa (Kg);

G: Coeficiente de aceleração ($=9,8 \text{ m/s}^2$);

Mg: Peso do objeto (N);

Z: Valor da margem de segurança recomendada para impactos e variações de velocidade bruscas (4: Valor referido pelo fabricante)

Visto que a dimensão dos objetos a movimentar não é elevada e o local de trabalho do braço robótico vai ser isolada atribuiu-se o cálculo de 10 vezes a massa do objeto. Sendo o objeto com uma massa de 4 quilogramas procedeu-se ao seguinte cálculo:

$$F = \frac{4}{2 \times 0,1} \times 4 = 80 \text{ N} \quad (3)$$

Conclui-se que para movimentar e transportar objetos com 4 quilogramas será necessário um atuador que produza 80 N de força de pressão.

Além do cálculo para a força necessária que a garra tem de possuir, foi necessário calcular a força que a mesma executa quando está distante do seu centro. Esta necessidade deve-se aos objetivos deste projeto em criar uma ferramenta com possibilidade de movimentar e transportar componentes de vários diâmetros. Para isso, recorrendo às tabelas do fabricante e com as medidas dos componentes desenvolvidos verificou-se:

Força efetiva

Força efetiva externa

Com a inserção do componente desenvolvido a força será executada a 33.3 milímetros como podemos verificar através da tabela da Fig. 21 para a força necessária de 80 N este fator irá manter a força de pressão de 0.4 Mpa.

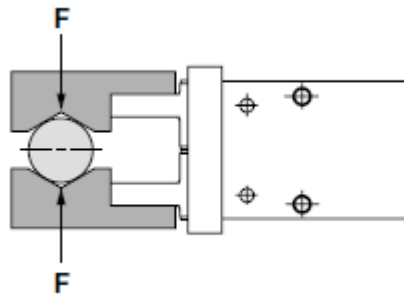


Fig. 20 - Simulação de Força Externa

MHZ2-25D/MHZL2-25D

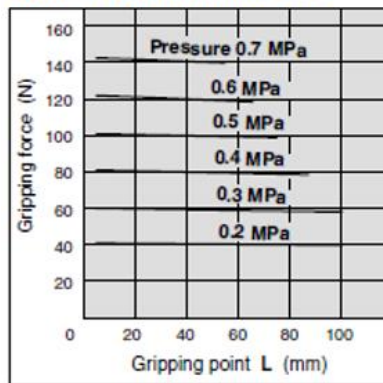


Fig. 21 - Tabela de força (N) Vs distância (mm)

Força efetiva interna:

Em relação á força interna com a deslocação do ponto de pressão de 33.3 milímetros a pressão executada irá aumentar em comparação com a força externa aproximadamente 0.62 Mpa.

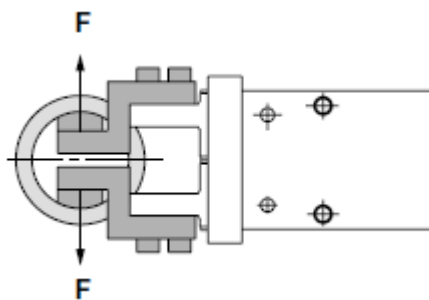


Fig. 22 - Simulação de Força Interna

MHZ2-25D/MHZL2-25D

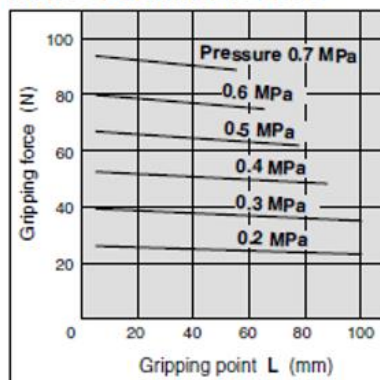


Fig. 23 - Tabela de força (N) Vs distância (mm)

Ponto de pressão

Pressão externa:

Com o ponto de pressão alterado devido ao acoplamento desenvolvido este irá alterar conforme representa a Fig. 24 em H para 33.3 milímetros e em L para 22.5 milímetros. Com a referência das distâncias e verificando na tabela cedida pelo construtor a garra irá exercer uma pressão de 0.7 Mpa.

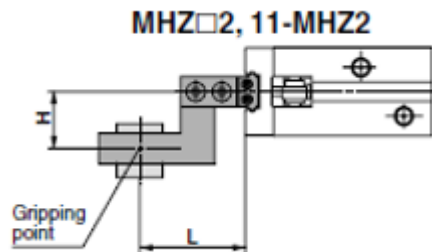


Fig. 24 - Simulação de Força Externa com centro desviado

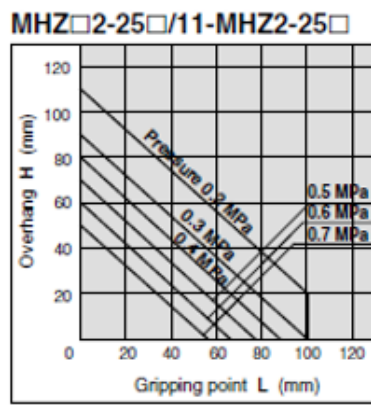


Fig. 25 - Tabela de distância em y (mm) Vs distância em x (mm)

Pressão interna:

A pressão interna tendo a referência das medidas já referenciadas na pressão externa de **H** para 33.3 milímetros e em **L** para 22.5 milímetros localizadas conforme representa a Fig. 26, a garra irá exercer uma pressão de 0.55 Mpa

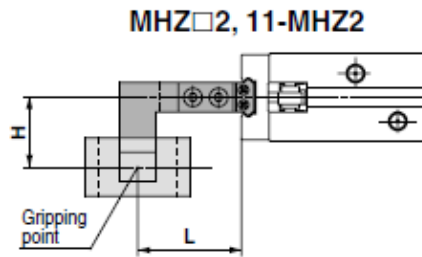


Fig. 26 - Simulação de Força Interna com centro desviado

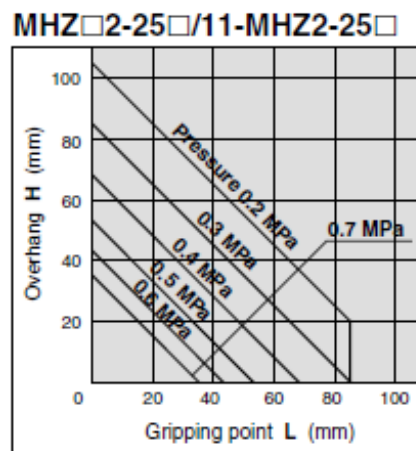


Fig. 27 - Tabela de distância em y (mm) Vs distância em x (mm)

Deslocação

Existe inúmeras deslocações possíveis a executar no braço robótico (Fig. 28) onde será aplicado o atuador. Na família dos atuadores da marca SMC, marca onde procuramos o atuador de referência para este projeto disponibiliza os valores admissíveis de força quando o atuador em questão é submetido (figura).

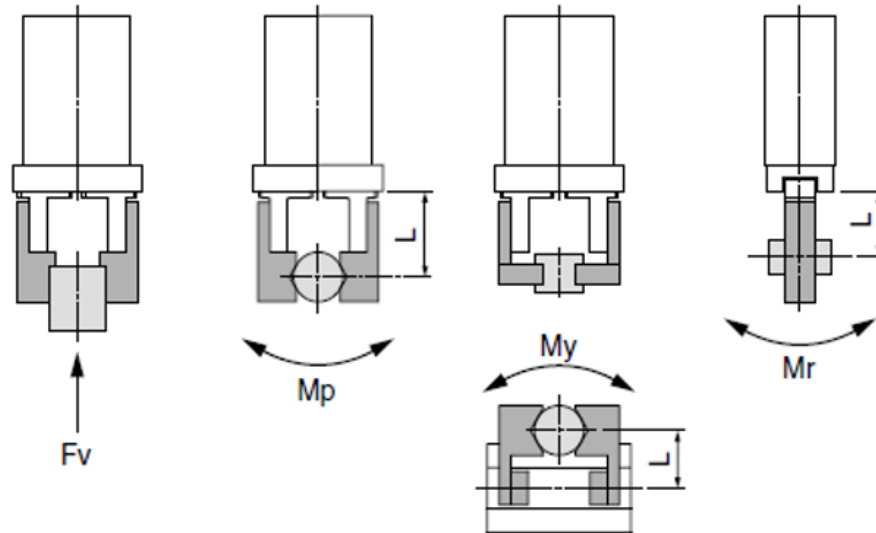


Fig. 28 - Deslocações atuador no braço robótico

Model	Allowable vertical load F_v (N)	Maximum allowable moment		
		Pitch moment: M_p (N-m)	Yaw moment: M_y (N-m)	Roll moment: M_r (N-m)
MHZ□2-6	10	0.04	0.04	0.08
MHZ□2-10	58	0.26	0.26	0.53
MHZ□2-16	98	0.68	0.68	1.36
MHZ□2-20	147	1.32	1.32	2.65
MHZ□2-25	255	1.94	1.94	3.88
MHZ□2-32	343	3	3	6
MHZ□2-40	490	4.5	4.5	9

Fig. 29 - Cargas admissíveis dos atuadores

No presente projeto devido a aplicação de um componente que desvia o ponto de pressão o fabricante indica que existe necessidade de recalculer os valores admissíveis. Calculo executado pela seguinte fórmula:

$$F = \frac{M}{L \times 0,001} \quad (4)$$

Aplicando ao caso real (dados do atuador MHZ2-25D):

$$F = \frac{1,94}{22,5 \times 0,001} = 86,2 \text{ N} \quad (5)$$

Ou seja, suporta uma carga de 86,2 N.

Após a consulta do catálogo técnico do fabricante verificando os fatores fornecidos foi escolhido o atuador SMC MHZ2-25D com um custo aproximado de 30€, a sua versatilidade encaixa nos parâmetros desejados.

8.4.3.1. Características:

Tabela 2 - Tabela de características SMC MHZ2-25D

Fluido		Ar
Pressão de operação	Dupla ação	0,1 / 0,7 Mpa
Temperatura Ambiente		-10 °C / 60 °C
Repetibilidade		+/- 0,01 mm
Lubrificação		Não é requerido
Pressão de aperto por garra	Externo	140 N
	Interno	95 N
Peso		430 ramas

8.4.3.2. Circuito pneumático

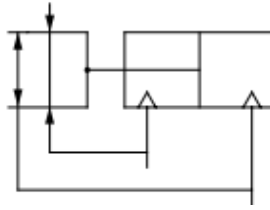


Fig. 30 - Circuito pneumático SMC MHZ2-25D

O circuito pneumático é composto por uma válvula direcional e um cilindro de duplo efeito com haste simples.

8.4.3.3. Vista explodida SMC MHZ2-25D

Tabela 3 - Tabela descrição componentes SMC MHZ2-25D

Numero	Descrição
1	Corpo
2	Pistão
3	Alavanca
4	Guia
5	Garra
6	Guia Interior
7	Veio
8	Suporte
9	O-ring
10	Borracha
11	Esferas
12	Pino
13	Pino
14	O-ring
15	Escape
16	Escape
17	Mola
18	Mola
19	O-ring
20	O-ring
21	O-ring

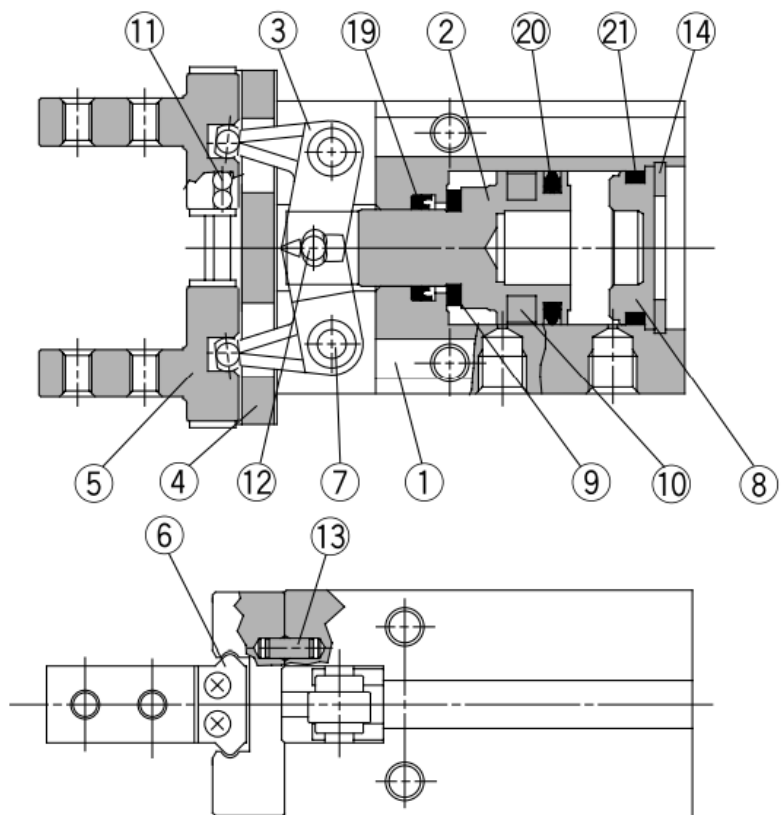


Fig. 31 - Vista Explodida SMC MHZ2-25D

8.4.3.4. Dimensões:

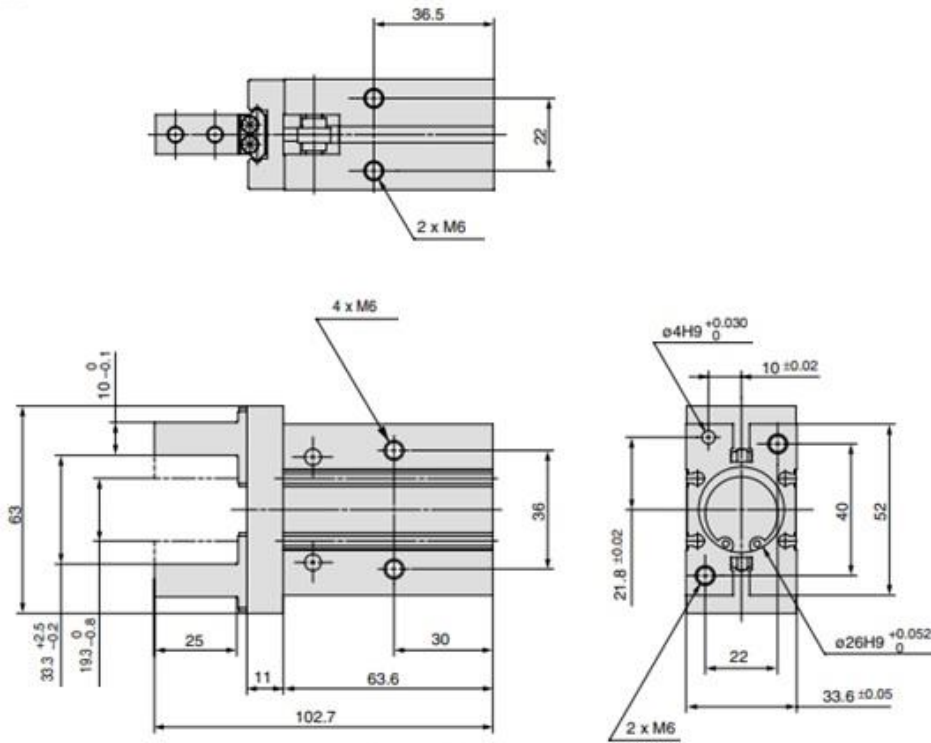


Fig. 32 - Dimensões SMC MGHZ2-25D

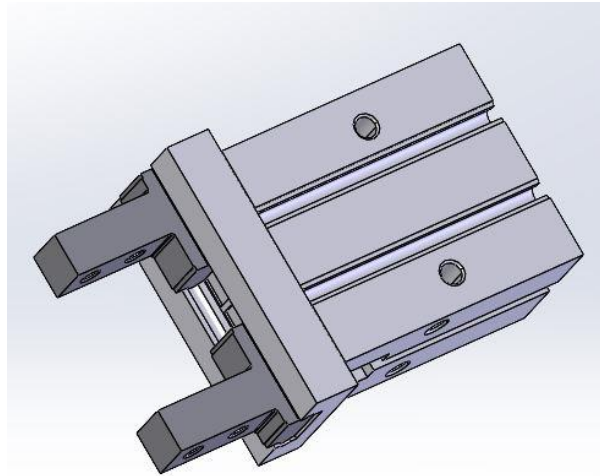


Fig. 33 - Atuador Selecionado em 3D

Tabela 4 - Abertura máxima vs mínima

Abertura	Abertura
Máxima	Mínima
30,3 mm	19,3 mm

9. Materiais

9.1. Impressão 3D

Para produção dos acessórios fabricados por impressão 3D que tiveram como objetivo simular o movimento e trabalho real, foi considerado um material leve mas com elevada resistência. Nos ensaios as peças produzidas entrarão em contacto com a superfície dos objetos a exercer pressão e a movimentar, com este tipo de trabalho exigente optou-se pelo material *Carbonfil*, material com mais resistência ao impacto e ultra leve. O *Carbonfil* é um filamento que atinge alta resistência à compressão, com resistência do *nylon* e tenacidade da fibra de carbono. Baixa absorção de umidade e com filamento de baixa distorção. Este tipo de filamento causou alguns constrangimentos ao projeto devido ao seu elevado atrito ao ser impresso danificando o *nozzle* da impressora.



Fig. 34 - Carbonfil

9.2. Produção final

Para produção final dos acessórios da ferramenta criada foi idealizado um material leve, robusto, com elevada capacidade á corrosão e baixo custo. As características anteriormente referidas na escolha do material devem-se ao baixo poder de elevação de carga do braço robótico e evitando assim obtermos perda de poder de carga devido ao peso da ferramenta desenvolvida, o número de ciclos idealizado para o conjunto funcionar. Para a escolha do material a utilizar foi comparado 3 tipos com base nos fatores com maior relevância para a aplicação e sempre de acordo com a disponibilidade do material para maquinação, incluiu-se:

- Alumínio 7075;
- Alumínio 6061;
- Aço de baixo carbono.

O alumínio é talvez o único metal que é utilizado quanto o aço, quando se trata de produção de componentes onde o peso é um dos principais fatores. O alumínio pesa cerca de um terço do peso do aço e tem excelentes propriedades mecânicas. No entanto, o alumínio vem em diferentes classes e cada classe tem as suas características. Dois dos tipos de liga de alumínio mais usados é o alumínio 7075 e 6061. Os principais pontos para verificar as diferenças entre os mesmos são:

- Propriedades mecânicas;
- Produção;
- Aplicações.

Propriedades mecânicas - Limite de elasticidade do alumínio (A resistência de elasticidade é o máximo de tensão que um material pode reter, deformando-se permanentemente).

O alumínio 7075 tem um limite de elasticidade superior em comparação com o alumínio 6061 e com o aço de baixo carbono. Isso significa que o alumínio 7075 pode suportar mais impacto e pressão sem deformar. Este fator deve-se do tratamento térmico e pela composição química do alumínio 7075. No entanto, em comparação entre o 6061 e o aço de baixo carbono, o 6061 tem um limite de elasticidade de 276 MPa, o que é ligeiramente inferior ao do aço de baixo carbono.

Propriedades mecânicas - Dureza (A dureza de um material é a medida pela forma como ele responde à deformação. Se o material for fácil de amolgar, é considerado duro).

Entre o alumínio 6061 quanto o 7075 são duros o suficiente para resistir à deformação. Ao mesmo tempo, eles são suficientemente flexíveis para evitar fissuras sob pressão. Em comparação o aço de baixo carbono é dos três elementos que é menos duro.

Produção

Neste parâmetro o aço de baixo carbono consegue ter uma vantagem sobre os alumínio devido à sua grande disponibilidade e facilidade de obtenção de matéria-prima, mas em comparação com as suas características o alumínio 6061 tem uma dureza e resistência à tração mais baixa e, portanto, torna-se mais fácil de maquinar.

Aplicações

Em relação às ligas de alumínio estas são usadas na produção de componentes para bicicletas, componentes aeroespaciais e na construção civil, quanto ao aço de baixo carbono é comum nos materiais na indústria, como na indústria automóvel e construção civil. Apesar das ligas de alumínio serem utilizadas no mesmo setor estas são aplicadas em diferentes funções, o alumínio 7075 é utilizado em funções que requerem mais resistência enquanto o alumínio 6061 para funções que requerem mais elasticidade.

Após revisão destes pontos mencionados anteriormente e estudo de mercado da relação preço tonelada remeteram para a seleção do Alumínio 7075, apesar do aço com baixo teor de carbono ser mais barato ao alumínio 7075 irá refletir no peso do conjunto um dos fatores de extrema importância neste projeto, além disso este tem a capacidade de comportar tratamento térmico, contem uma alta resistência à fadiga e ao esforço mecânico.

10. Adaptação

10.1. Adaptação ao robô

10.1.1. Flange de montagem do robô

Os componentes desenvolvidos foram construídos com base na flange de montagem do robô Kuka KR 6 R1820, para assim serem compatíveis com o robô no qual será executado os ensaios e por final aplicado na linha de produção.

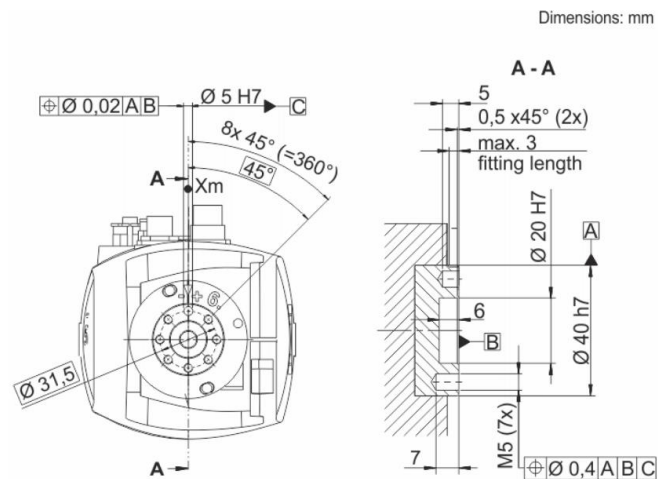


Fig. 35 – Flange de montagem Kuka KR 6 R1820

10.1.2. Flange Directa

Para ser possível a adaptação do atuador selecionado ao braço robótico foi necessário desenvolver acessórios que permitissem a interligação entre os mesmos. Numa primeira fase foi desenvolvido uma flange de ligação direta ao braço robótico, ou seja, uma ligação única que permitisse interligar a flange do robô e que ao mesmo tempo permitisse fixar o atuador nos seus pontos predefinidos.

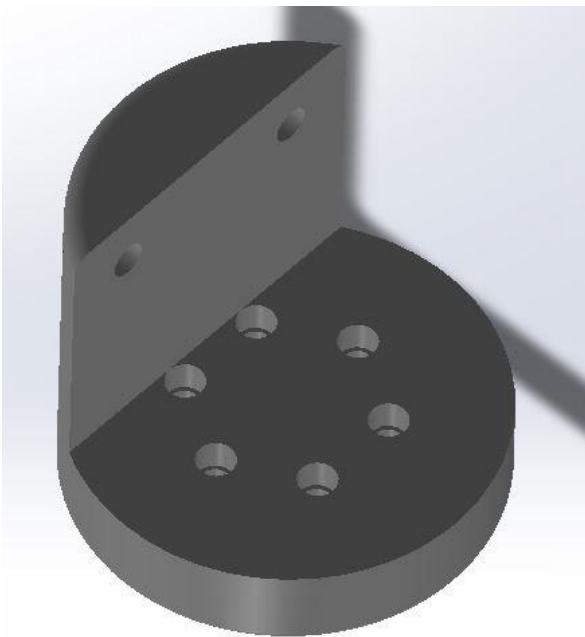


Fig. 36 - Flange direta

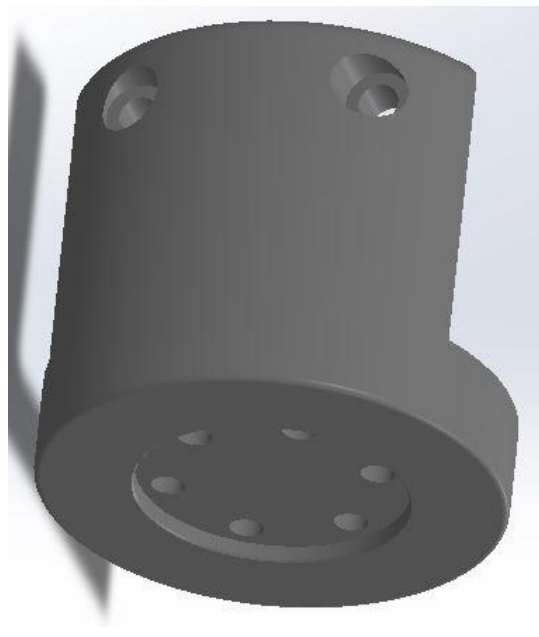


Fig. 37 - Flange direta

Este acessório é composto por seis furos passantes M5 onde a cabeça do parafuso fica embecida, estes fazem a conexão á flange do braço robótico e dois furos passantes M6 com caixa para a cabeça do parafuso que permite a conexão com o atuador selecionado.

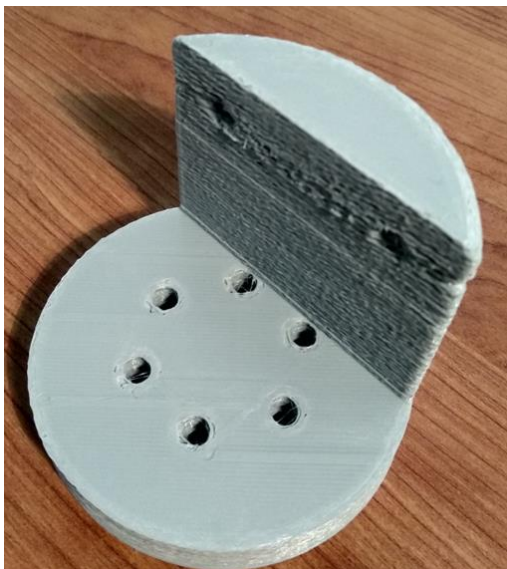


Fig. 38 - Impressão 3D Flange Direta

10.1.3. Flange Indireta

Outro desafio proposto foi a adaptação a um sensor de colisão, ou seja, criar um elo de ligação com um sensor de colisão e aplicação do atuador. Este caso real de aplicação futura de adaptação desenvolveu-se com base nas características de um sensor desenvolvido para aplicação no mesmo braço robótico. Devido ao acoplamento em série com o sensor desenvolveu-se uma flange que conseguisse reproduzir a flange direta do robô e que a mesma conseguisse adaptar á garra.

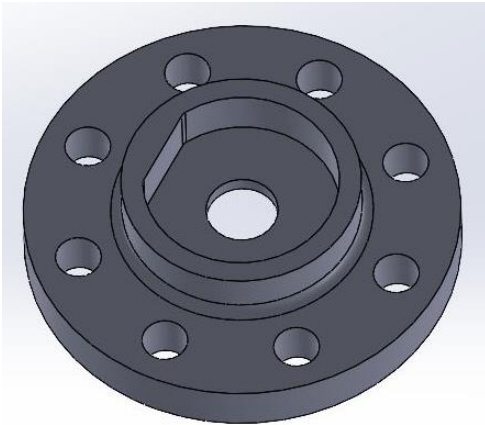


Fig. 39 - Vista Superior da flange acoplamento ao sensor

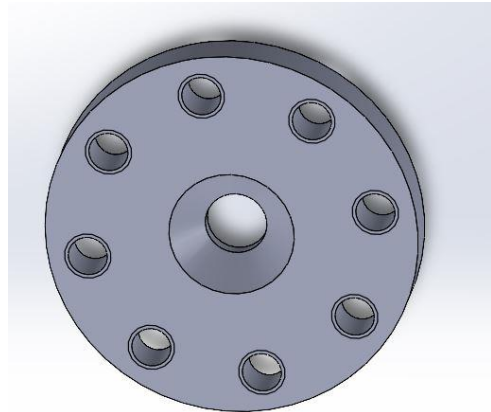


Fig. 40 - Vista Inferior da flange acoplamento ao sensor

Este acessório é composto por oito furos de passagem M5 que fazem a conexão com o acessório que acopla no atuador selecionado e um furo de passagem central M6 que interliga ao sensor de colisão. A chaveta no interior foi construída para encaixe no sensor de colisão tendo assim apenas uma posição de montagem.

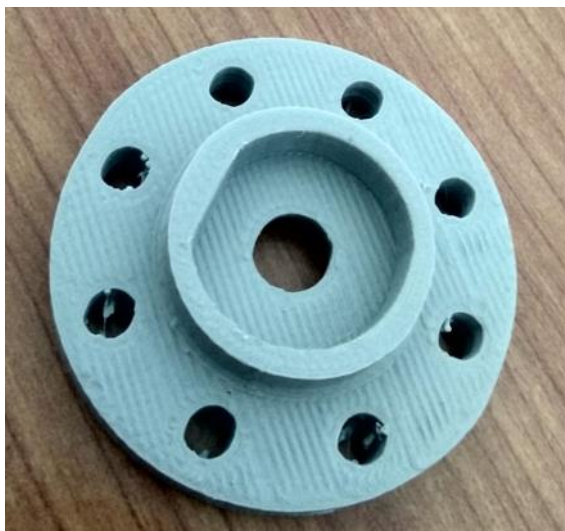


Fig. 41 - Impressão 3D flange acoplamento ao sensor

10.1.3.1. Componente de interligação

Para se conseguir conectar o atuador à flange desenvolvida houve necessidade de criar um acessório para acoplar a flange à fixação original do atuador.

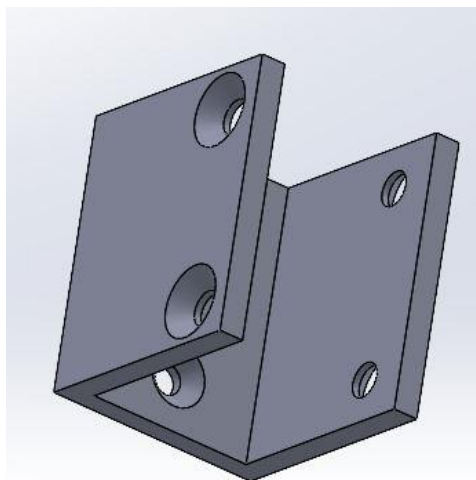


Fig. 42 - Ligação flange - atuador

O acessório é composto por quatro furos de passagem M6 com caixa para embeber a cabeça dos parafusos que fazem conexão com o atuador selecionado, fixando assim nas duas laterais, no topo do acessório é composto com duas furações de passagem M5 para fixar à flange que acopla o sensor de colisão.

Este tipo de acoplamento com dois acessórios foi idealizado como uma ferramenta multiusos podendo-se aplicar a mesma flange de ligação ao sensor de colisão com outro tipo e dimensões de atuadores, substituindo apenas a fixação acoplamento – atuador.

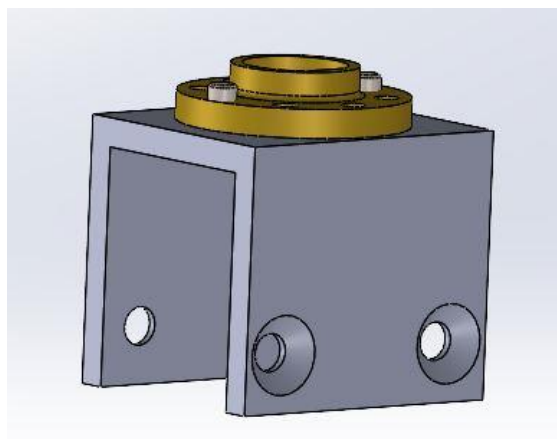


Fig. 43 - Flange e acessório de ligação ao atuador

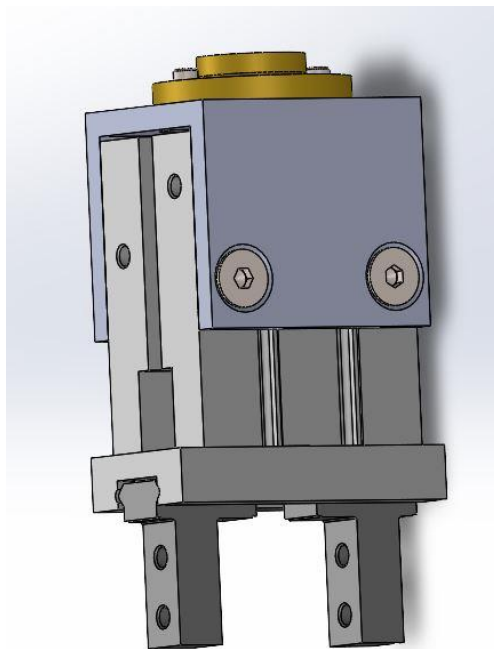


Fig. 44 - Conjunto com atuador

10.2. Adaptação aos objetos

10.2.1. Placa Bidirecional

Devido às necessidades impostas de projeto com o objetivo de executar deslocamentos e trabalhar com vários diâmetros e formatos de materiais foi necessário idealizar um acessório de aplicação ao atuador que fosse robusto, que permitisse obter um poder de abertura e fecho maior que a garra original, num sistema de fácil adaptação que permitisse operar objetos de vários diâmetros e formatos. Com os requisitos de um peso reduzido, abertura máxima de 194 mm e abertura mínima de 39 mm, idealizou-se um sistema de pinos roscados simples, os quais fossem possíveis e acessíveis a um operador de os movimentar e deslocar na furação adequada para cada objeto.

Alcance do atuador robótico com o acessório desenvolvido:

Tabela 5 - Alcance abertura e fecho do atuador

Abertura	Fecho
39 mm	20 mm
104 mm	85 mm
134 mm	115 mm
164 mm	145 mm
194 mm	175 mm

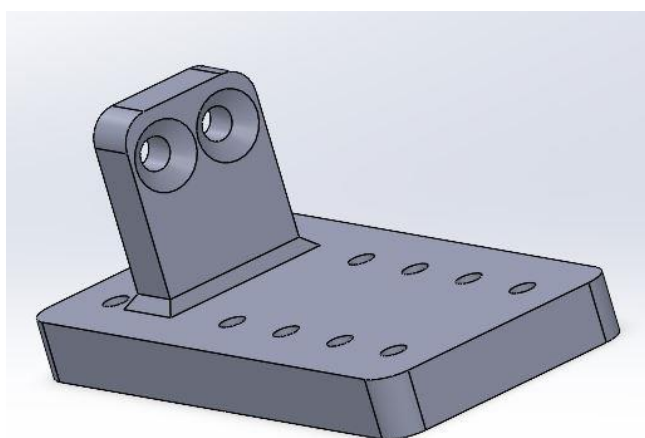


Fig. 45 - Vista Inferior do adaptador

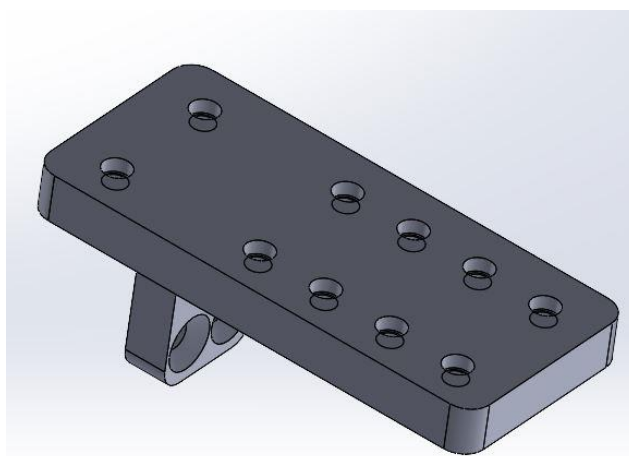


Fig. 46 - Vista Superior do adaptador

Este acessório foi desenvolvido para uma utilização em ambas as garras do atuador, ou seja, na garra direita ou na garra esquerda. Devido a esta ser bidirecional o seu fabrico em uma linha de produção irá sair com um custo mais reduzido. Esta é composta com dez furos M5 roscados, onde posteriormente será roscado os pinos e dois furos M8 de passagem que serão o meio de conexão com a garra seleccionada através de um conjunto de parafusos que fixam nas garras.



Fig. 47 - Impressão 3D Placa Bidirecional (a)

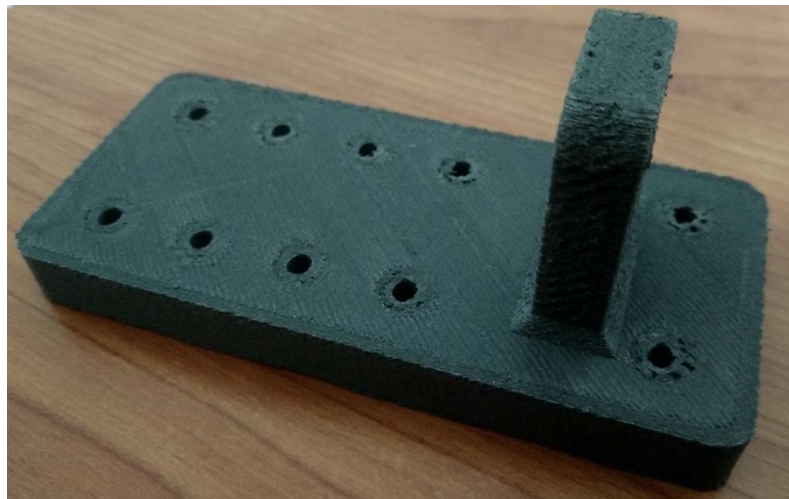


Fig. 48 - Impressão 3D Placa Bidirecional (b)

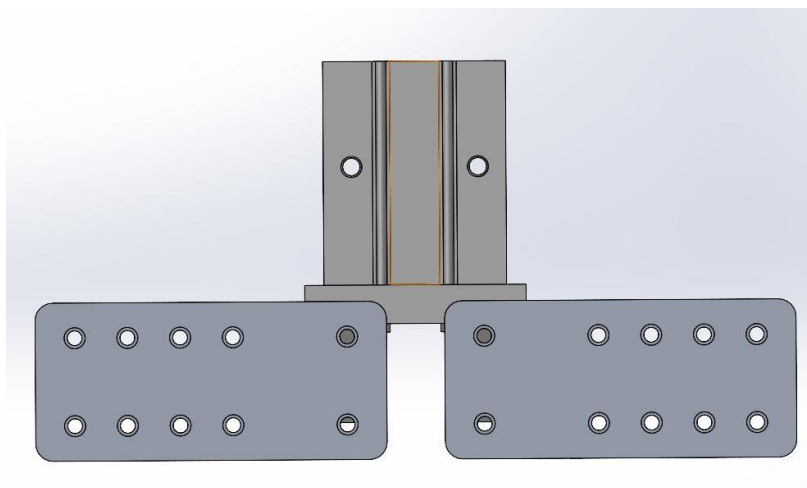


Fig. 49 - Montagem Placa Bidirecional vista frontal

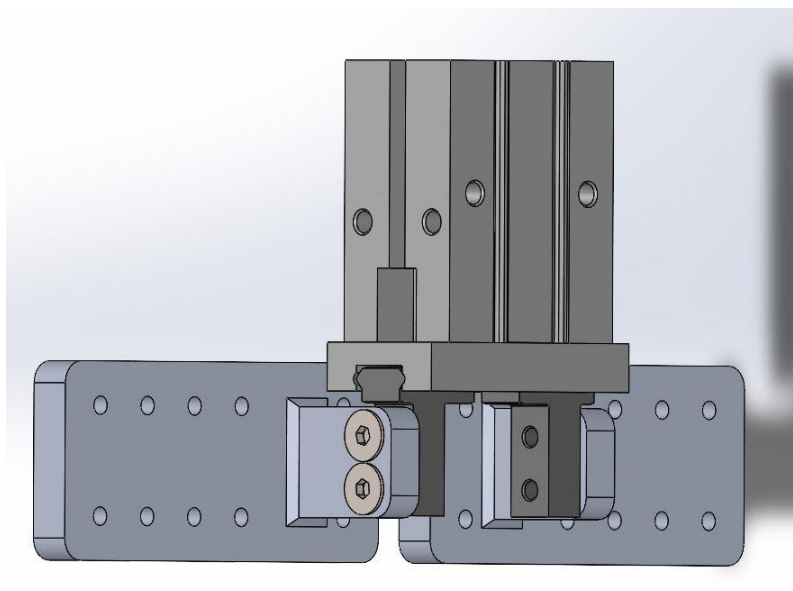


Fig. 50 - Montagem Placa Bidirecional vista posterior

10.2.2. Pino

O pino desenvolvido teve como foco a fácil aplicação e alteração para a medida necessária por um operador e robustez, pois será o elemento de contacto entre a garra e a peça a deslocar. Este pino é constituído no topo por uma chaveta que permite o operador apertar e desapertar com uma chave inglesa na placa bidirecional, no fundo este é composto por uma rosca M5 que irá enroscar na placa ficando com 10 milímetros do corpo no interior do furo o que permite um maior apoio quando é aplicada força no objeto.

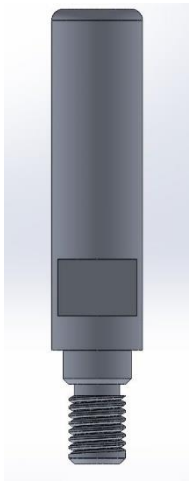


Fig. 52 - Pino vista frontal

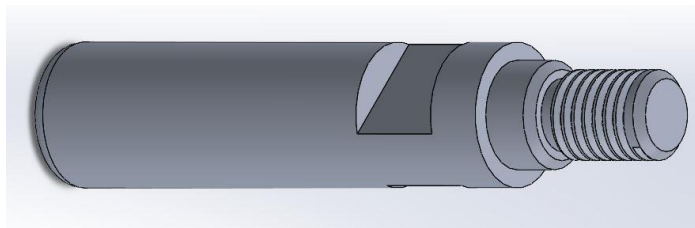


Fig. 51 - Pino vista lateral



Fig. 53 - Impressão 3D do pino, onde demonstra as dificuldades de impressão devido ao dano do nozzle

11. Montagem do sistema em 3D

11.1. Montagem no braço robótico

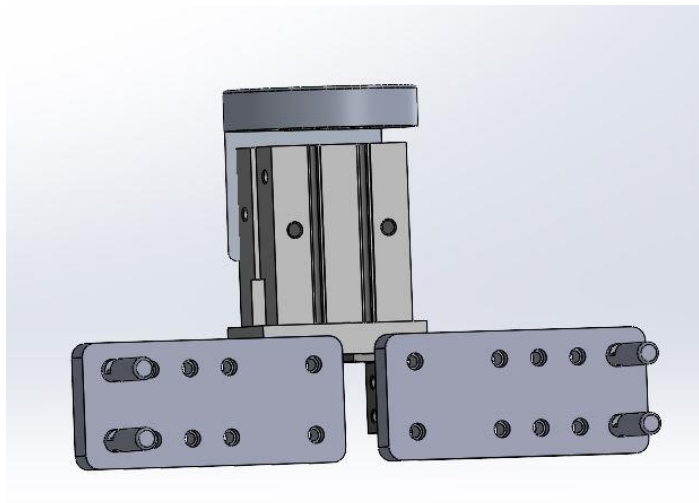


Fig. 54 - Conjunto com ligação direta Vista Frontal

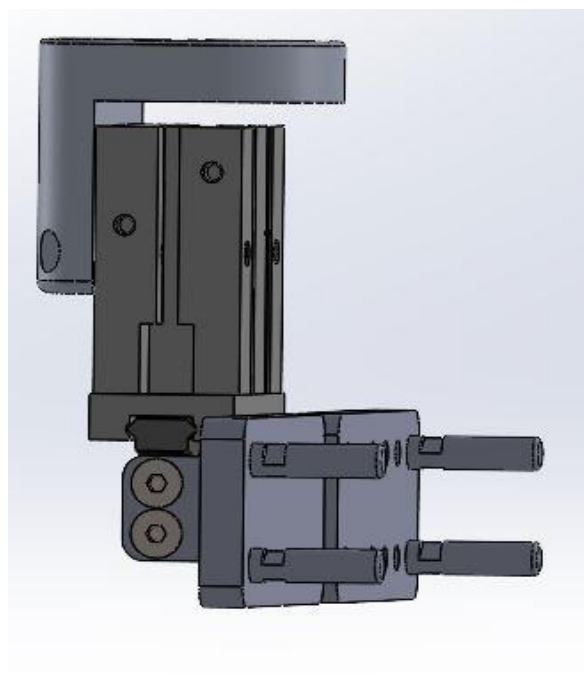


Fig. 55 - Conjunto com ligação direta Vista Lateral

11.2. Montagem no sensor de colisão

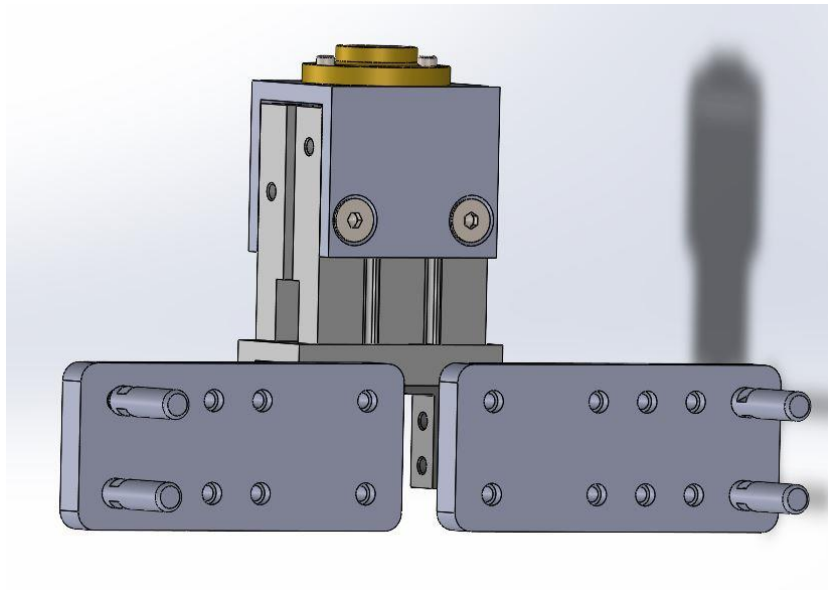


Fig. 56 - Conjunto com ligação a sensor de colisão Vista Frontal

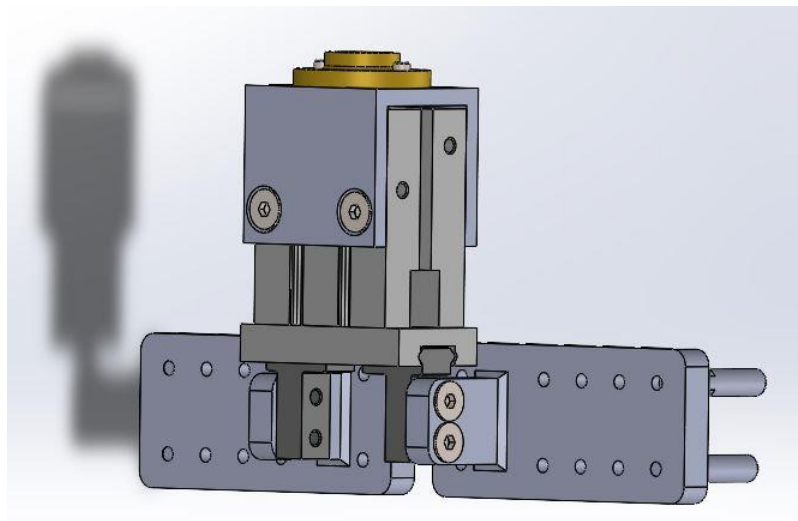


Fig. 57 - Conjunto com ligação a sensor de colisão Vista Posterior

12. Peso do conjunto

Após desenvolvimento dos componentes no *software Solidworks*, foi possível calcular a massa total do conjunto com o material selecionado, o alumínio 7075, e assim verificar a carga máxima suportada pelo braço robótico.

Tabela 6 - Calculo peso total conjunto sem sensor de colisão

Conjunto Sem sensor de colisão	
Flange Direta	231,75 gramas
Placa Bidirecional	138,88 gramas
Parafusos M6	3,63 gramas
Pinos	4,54 gramas
Atuador	420 gramas
Total	983,97 gramas

Tabela 7 - Calculo peso total conjunto com sensor de colisão

Conjunto Com sensor de colisão	
Flange adaptação Sensor colisão - garra	17,05 gramas
Ligação Flange Sensor colisão - Garra	86,58 gramas
Placa Bidirecional	138,88 gramas
Parafusos	36,3 gramas
Parafusos M6	3,63 gramas
Pinos	4,54 gramas
Atuador	420 gramas
Total	855,85 gramas

Após o cálculo é possível verificar que existe aproximadamente um quilograma de perda de capacidade de carga no braço robótico. Sendo a capacidade de carga do braço robótico seis quilogramas, com os acessórios acoplados este diminui para cinco quilogramas, o que se encontra adequado para as funções a desempenhar pelo equipamento.

13. Programação

13.1. Kuka Robot Language “KRL”

Para parametrizar o robô é necessário inserir uma programação e assim poder executar as sequências de movimento automaticamente. Para este tipo de controlo é necessário várias informações como a posição onde o robô se encontra, tipo de movimento, velocidade, aceleração e informação das condições. Para elaborar a programação foi usado a sua linguagem, para este robô o *KRL (Kuka Robot Language)*. Dentro da programação existem várias metodologias que se podem utilizar como: programação online movimentando com o comando, programação offline através do programa Sim da *Kuka* que reproduz em 3D a realidade e também o *Kuka OfficeLite* este é baseado em texto e tem a ajuda da visualização da interface de utilizador *SmartPAD*.

13.2. Desenvolvimento do programa

Para programação do robô foi utilizado o comando da consola, a partir do mesmo pode-se gravar uma série de movimento pretendidos. Por isso, para o desenvolvimento do programa, são adicionados os movimentos pretendidos diretamente na rotina ativa.

Os dois tipos de movimento que podem ser programados são:

- Movimento *Point-to-Point (PTP)* ou interpolação das juntas: o movimento é descrito através da evolução angular das juntas, por isso, o trajeto do robô não é previsível com precisão. Nos movimentos PTP com paragem exata é feita a deslocação ao ponto de destino, com paragem na posição exata deste.

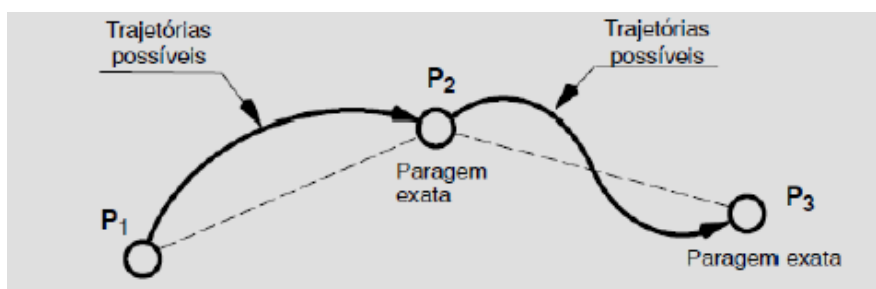


Fig. 58 - Movimento PTP com paragem exata

- Movimento Linear (LIN) ou interpolação linear: o ponto de referência da ferramenta é movimentado em direção ao ponto de destino numa trajetória linear. É utilizado quando é necessário obter um trajeto linear entre dois pontos.

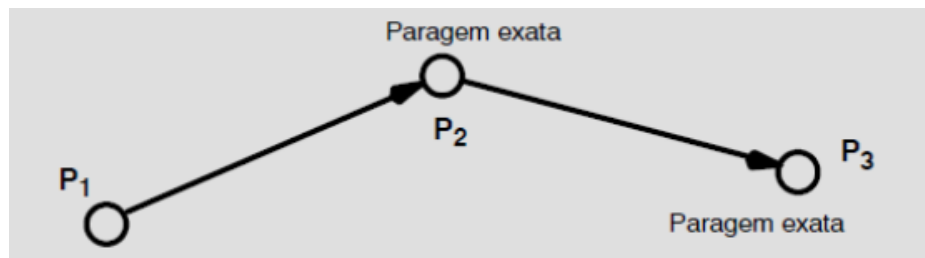


Fig. 59 - Movimento LIN com paragem exata

14. Sistema

O sistema idealizado a partir deste projeto verificou a possibilidade de uma garra multifuncional movimentar vários tipos de objetos com diferentes formatos e tamanhos. No processo de desenvolvimento e desenho considerou-se todos os fatores que podem ter um impacto direto na funcionalidade, como o desenho dos componentes, peso e assim por diante. O resultado da dissertação demonstra a análise da garra selecionada, os componentes desenvolvidos e a simulação do processo de montagem. Na análise do atuador verificou-se que o mesmo tem capacidade de suportar a carga necessária para a recolha, movimentação e colocação. De acordo com o desenho do sistema desenvolvido para o projeto, este pode ser integrado em outros tipos de robôs tendo a atenção da adaptação á flange original com o objetivo de aumentar a eficiência e melhorar postos de trabalho. Esta análise contribui para uma compreensão mais clara da eficiência de uma garra multifuncional, tendo em conta a seleção de uma garra e tornar a mesma mais abrangente tendo em conta a força necessária dos componentes.

15. Ensaios

Após os ensaios com o componente “Flange direta” produzido com a impressora Anet 8 serem de acordo com o pretendido de projeto passou-se para o seguinte passo, a produção real em alumínio 7075. Componente que cumpre as funções pretendidas efetuando a conexão da flange do robô com o atuador SMC MHZ2-25D.



Fig. 60 – Robô com atuador com flange direta

16. Melhorias

Seria necessário mais investigação e mais trabalho prático para aplicar este desenvolvimento de uma forma mais prática para testar e avaliar a garra num ambiente de trabalho real a manipular peças de diferentes tamanhos e formatos, verificando assim os limites dos componentes desenvolvidos. Outra melhoria será a seleção do material para produção dos componentes em 3D, apesar da tentativa de utilização de *Carbonfil* em todos os componentes da garra não foi possível devido aos danos criados pelo mesmo no *nozzle*, devido á sua elevada rugosidade a passar pelo mesmo. Não tendo outra alternativa em que os restantes componentes tivessem sido impressos em PLA. O PLA tem durabilidade para a recolha, deslocação e colocação, mas não serve para o desempenho necessário para execução de ensaios e recolher informações fidedignas.

17. Conclusão

Esta dissertação teve como objetivo automatizar um processo de produção em série, utilizando uma garra robótica multifuncional desenvolvida para o feito. O objetivo central foi a conceção de componentes que permitissem melhorar um atuador pré-concebido por um fabricante, neste caso a *SMC*, adaptando-se às necessidades impostas. Com a escolha do material para produção final dos componentes foi possível alcançar o objetivo de não perder força de carga do braço robótico, ficando este com uma elevação máxima de objetos de cinco quilogramas sendo os objetos a manobrar serem de peso máximo de quatro quilogramas. O sistema de pinos desenvolvido irá permitir a fácil adaptação da garra a vários tipos de objetos, devido á facilidade de montagem e desmontagem o tempo de quebra de produção por alteração dos objetos a manobrar será reduzida, não danificando tempos de produção e elevados custos de paragem de uma linha fabril. A simplicidade do sistema desenvolvido não criou restrições relevantes, pois a simplicidade construtiva integrada com um sistema adaptativo possibilita o movimento de objetos com vários tipos características.

18. Bibliografia

- [1] Tai, K., El-Sayed, A.-R., Shahriari, M., Biglarbegian, M., Mahmud, S., 2016. State of the art robotic grippers and applications. *Robotics* 5, 11.
- [2] Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M.R., Lipson, H., Jaeger, H.M., 2010. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 18809–18814.
- [3] Wolf, A., Steinmann, R., Schunk, H., 2006. *Gripper in motion*. Springer.
- [4] Monkman, G.J., Hesse, S., Steinmann, R., Schunk, H., 2007. *Robot grippers*. John Wiley & Sons (Livro online):
https://books.google.pt/books?hl=ptPT&lr=&id=mJyOOe2ohq8C&oi=fnd&pg=PR5&ots=uBf55xsYL7&sig=dMQ6JhCb8bLJYqZBW05pEOBlnF0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [5] Blanes, C., Mellado, M., Ortiz, C., Valera, A., 2011. Technologies for robot grippers in pick and place operations for fresh fruits and vegetables. *Spanish J. Agricultural*
- [6] Jiang, L.-T., & Smith, J. R. (2012). Seashell effect pretouch sensing for robotic grasping. In *ICRA*
- [7] Brosted, F., Santolaria, J., Aguilar, J., Guillomía, D., 2012. Laser triangulation sensor and six axes anthropomorphic robot manipulator modelling for the measurement of complex geometry products. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*
- [8] Dollar, A.M., Howe, R.D., 2006. A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*
- [9] Carlos Gonzalez, “What’s the Difference Between Pneumatic, Hydraulic, and Electrical Actuators?”, Apr 16, 2015. Retrieved from: <https://www.machinedesign.com/linearmotion/whats-difference-betweenpneumatic-hydraulic-and-electrical-actuators>
- [10] Patakota Venkata Prasad Reddy and V V N Satya Suresh, "A Review on Importance of Universal Gripper in Industrial Robot Applications," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 255-264, April 2013.
- [11] Oberc, H., Prinz, C., Glogowski, P., Lemmerz, K., & Kuhlenkötter, B. (2019). Human Robot Interaction – learning how to integrate collaborative robots into manual assembly lines. *Procedia Manufacturing*, 31, 26-31. doi:10.1016/j.promfg.2019.03.005
- [12] Razali, Z. B., Othman, M. H., & Daud, M. H. (2016). Optimum Design of Multi-Function Robot Arm Gripper for Varying Shape Green Product.

[13] “DESIGN CONSTRAINTS OF VACUUM GRIPPER OF ROBOTS–AS A PICK AND PLACE OPERATING TOOL”, AK Jaiswal, B Kumar – International Journal of Science and Technology, 2016.

[14] B. Matthias, S. Kock, H. Jerregard, M. Kallman, I. Lundberg, and R. Mellander, "Safety of collaborative industrial robots: Certification possibilities for a collaborative assembly robot concept," in Assembly and Manufacturing (ISAM), 2011 IEEE International Symposium on, 2011, pp. 1-6.

[15] Fast-Berglund, Å, Palmkvist, F., Nyqvist, P., Ekered, S., & Åkerman, M. (2016, May 11). Evaluating Cobots for Final Assembly. Retrieved June/July, 2019,

[16] Grahn S, Langbeck B. Benefits of collaborative robots in assembly-an evaluation scheme. In: Swedish Production Symposium. ; 2014.

19. Anexos

(Conteúdo confidencial)