



Automatização do Processo Manual de Pesagem de Pigmentos

DIOGO GONÇALO LIMA DE FREITAS

outubro de 2023

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Automatização do Processo Manual de Pesagem de Pigmentos

Diogo Gonçalo Lima de Freitas

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Outubro, 2023

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Automação e Sistemas.

Candidato: Diogo Gonçalo Lima de Freitas, N.º 1180919,
1180919@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Manuel Silva, mss@isep.ipp.pt

Empresa: Continental Mabor, Lda.

Orientador: Rodrigo Antunes, rodrigo.antunes@conti.de



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Outubro, 2023

Agradecimentos

Ao longo deste projeto de tese de mestrado, e do meu percurso académico, foram várias as pessoas que me ajudaram, partilharam conhecimentos comigo e se disponibilizaram para me formar pessoal, académica e profissionalmente. Por ser exaustivo enumerá-las a todas, redijo estas palavras como demonstração da minha profunda gratidão.

A algumas pessoas e entidades, pelo carinho especial que me ofereceram, gostaria de lhes agradecer particularmente. Assim:

Primeiramente, quero agradecer aos meus pais pelo acompanhamento e o apoio constante que me deram durante as várias etapas da minha vida. Sem vocês ao meu lado, este percurso não seria possível. Vocês sabem o quão agradecido eu estou, e por isso, obrigado!.

À minha família e aos amigos da família, agradeço pelo apoio que me deram durante a minha vida académica e por me ajudarem a crescer da maneira correta.

Aos meus amigos, João, Paulo, Nuno, Duarte, Alexandre, Carina, Carolina, agradeço por me apoiarem em todos os momentos da minha vida, por me orientarem e ajudarem quando mais precisei. Sem vocês nada disto seria possível.

Ao João Dias, ao Ismael, ao Stéphane Monteiro, ao Stéphane Oliveira, ao Ulisses, ao Manuel, ao João Fonseca, agradeço pelos momentos de convívio e de aprendizagem passados, e por toda a paciência e companheirismo que demonstraram durante estes cinco anos da minha vida.

Ao corpo docente do ISEP, agradeço pelo compromisso e por todo o conhecimento partilhado ao longo destes cinco anos de formação académica e pessoal.

Ao Eng.^o Manuel Silva, como orientador, agradeço pelo acompanhamento exaustivo durante esta reta final, tornando este desafio mais acessível e enriquecedor.

À Continental Mabor - Indústria de Pneus (CMIP), agradeço a oportunidade que me foi concedida, acolhendo este projeto de tese de mestrado e potencializando aprendizagens e experiências enriquecedoras.

Ao Eng.^o Pedro Miranda, agradeço imenso por me dar a oportunidade de representar a empresa Continental Mabor - Indústria de Pneus (CMIP), por me acompanhar durante todo o estágio, corrigindo e aconselhando nos momentos corretos, fazendo-me crescer pessoal e profissionalmente.

Ao Doutor Rodrigo Antunes, que orientou o meu trabalho na empresa, agradeço pelo acompanhamento, pelos desafios propostos e pelos conselhos que valorizaram o trabalho desenvolvido, e por me formar enquanto pessoa e profissional.

À Eng.^a Ana Costa, agradeço pela confiança e apoio durante este período e pela ajuda disponibilizada ao longo do projeto. Sem ti, esta experiência não seria possível. Muito obrigado por confiares em mim!

Aos Eng.^o Artur Moreira, Doutor Jorge Mendes, Eng.^a Áurea Salgado, Eng.^o Eduardo Moreira, Eng.^o Carlos Pinto, Eng.^o Ricardo Silva e à Eng.^a Sara Fernandes, agradeço pelo excelente acolhimento, pela ajuda e pela disponibilidade demonstrada, que tornou, a adaptação à empresa, mais fácil e a experiência, mais enriquecedora.

Resumo

O presente projeto de tese de mestrado com o tema “Automatização do Processo Manual de Pesagem de Pigmentos” foi desenvolvido em contexto industrial, na empresa Continental Mabor - Indústria de Pneus (CMIP), localizada em Lou-sado. Esta dissertação apresenta, no seu conteúdo, uma análise do processo atual de pesagem de pigmentos, um estudo e projeto de uma solução para automatização do respetivo processo, tendo sido encontradas diferentes soluções possíveis. Foi ainda implementado um robô colaborativo para possibilitar testar uma parte da solução idealizada.

O projeto iniciou com a identificação e estudo do processo atual de pesagem dos pigmentos que, à data, consistia num processo totalmente manual de manipulação dos pigmentos e dos sacos de plástico utilizados para o seu transporte. O processo em questão foi caracterizado, tendo sido descrito cada etapa do processo, as ferramentas e o espaço de trabalho existente. Foram também listados e caracterizados os pigmentos utilizados no processo. Além disso, foi realizado um estudo, obtendo dados representativos do processo atual e que servem de base para o projeto da solução futura.

Após uma primeira fase de reconhecimento e caracterização do processo atual, foram propostos os requisitos necessários para cada equipamento da solução futura idealizada. Este projeto acabou por estar dividido em duas partes: o doseamento dos pigmentos e a manipulação dos sacos de plástico. Para a primeira parte, já existia um conceito pré-identificado, onde apenas foi necessário efetuar alguns ajustes ao conceito inicial e realizar a escolha dos componentes necessários, conforme os requisitos propostos inicialmente. Após essa escolha, foi implementado um primeiro protótipo funcional do conceito, no qual foram realizados alguns testes de desempenho. Através destes testes, foi possível obter os primeiros dados do possível sistema de doseamento, mais especificamente, dos tempos de ciclo do robô colaborativo. Na segunda parte, foi necessário investigar quais as soluções presentes no mercado que se enquadravam melhor nos requisitos estabelecidos. Foram encontradas três tecnologias diferentes, tendo sido projetado uma solução com cada tecnologia. Para além disso, foi preparada uma descrição de das soluções, com as vantagens e desvantagens, e o respetivo orçamento necessário para a sua implementação.

Em forma de conclusão, os resultados obtidos dos testes realizados apresentam um tempo de ciclo elevado, em relação do processo atual. Porém, em termos de

ergonomia e bem-estar, esta solução torna todo o processo e a área de trabalho associada mais acessível e adequada para a presença do humano. Esta automação do processo afasta os operadores do trabalho duro e repetitivo, passando-os para a tarefa de supervisão e/ou tarefas extras.

Palavras-Chave: Automação, Pneus, Pigmentos, Robô Colaborativo, Indústria 4.0, Robótica Industrial

Abstract

This master's thesis project, entitled "Automatization of the Manual Pigment Weighing Process", was carried out in an industrial context, at the company CMIP, located in Lousado. The content of this dissertation includes an analysis of the current pigment weighing process, a study and design of a solution to automate the process, and different possible solutions were found. A collaborative robot was also implemented to test part of the idealized solution.

The project began by identifying and studying the current pigment weighing process, which at the time consisted of a completely manual process of handling the pigments and the plastic bags used to transport them. The process in question was characterized, describing each stage of the process, the tools and the existing workspace. The pigments used in the process were also listed and characterized. In addition, a study was carried out, obtaining data representative of the current process and serving as a basis for the design of the future solution.

After a first phase of recognizing and characterizing the current process, the necessary requirements were proposed for each piece of equipment in the idealized future solution. This project ended up being divided into two parts: the dosing of pigments and the handling of plastic bags. For the first part, a pre-identified concept already existed, where it was only necessary to make some adjustments to the initial concept and choose the necessary components, according to the requirements initially proposed. After this choice, a first functional prototype of the concept was implemented, in which some performance tests were carried out. Through these tests, it was possible to obtain the first data on the possible dosing system, more specifically, the cycle times of the collaborative robot. In the second part, it was necessary to investigate which solutions on the market best met the established requirements. Three different technologies were found and a solution was designed with each technology. In addition, a description of the solutions was prepared, with the advantages and disadvantages, and the respective budget required for their implementation.

In conclusion, the results obtained from the tests carried out show a high cycle time compared to the current process. However, in terms of ergonomics and well-being, this solution makes the entire process and the associated work area more accessible and suitable for human presence. This automation of the process takes

operators away from hard, repetitive work and into supervisory and/or extra tasks.

Keywords: Automation, Tire, Chemicals, Colaborative Robotics, Industry 4.0, Industrial Robotics

Índice

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Acrónimos	xi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Definição do Problema	2
1.2.1 Objetivos	3
1.2.2 Resultados Esperados	3
1.3 Plano de Trabalho	4
1.4 Organização da Dissertação	5
2 Fundamentação Teórica	7
2.1 Robótica Colaborativa	7
2.1.1 Evolução da Robótica Colaborativa no Mercado	7
2.1.2 Aplicações da Robótica Colaborativa	9
2.1.3 Comparação entre Humanos e Robôs	14
2.1.4 Tipos de Colaboração entre Robôs Colaborativos e Humanos	15
2.1.5 Comparação entre Robótica Colaborativa e Robótica Industrial	18
2.2 Tecnologias de Manipulação de Sacos de Plástico	19
3 Caracterização do Processo Atual	23
3.1 Constituição de um Pneu	23
3.2 Etapas da Construção de um Pneu	24
3.3 Pesagem e Mistura dos Pigmentos: Caracterização do Processo	25
3.3.1 Apresentação do Espaço de Trabalho Atual	26
3.3.2 Tipologia dos Pigmentos	30
3.3.3 Mapeamento do Processo Atual	31
3.3.4 Estudo do Tempo de Ciclo Atual	34
4 Caracterização do Processo Futuro	35
4.1 Solução para Doseamento de Pigmentos	35

4.1.1	Descrição do Conceito da Solução Proposta	36
4.1.2	Requisitos do Sistema de Pesagem de Pigmentos	36
4.1.3	Mapeamento do Processo da Solução Proposta	40
4.1.4	Arquitetura do Sistema da Solução Proposta	42
4.2	Solução para a Manipulação dos Sacos	42
4.2.1	Requisitos da Solução para a Manipulação dos Sacos	42
4.2.2	Apresentação dos Conceitos das Soluções Propostas	44
4.2.3	Estimativa de Custos das Soluções	48
5	Validação Experimental do Sistema de Doseamento de Pigmentos	51
5.1	<i>Setup</i> Experimental	51
5.1.1	Esquema de Montagem do Robô Colaborativo	52
5.1.2	Programação do Robô	53
5.1.3	Programação do Algoritmo de Enchimento	54
5.2	Testes e Resultados	55
5.2.1	Algoritmos de Esvaziamento da Tulha	56
5.2.2	Pesagem do Pigmento pela Ferramenta do Robô	56
5.2.3	Tempo de Ciclo Parcial (Viagem do Robô)	61
5.2.4	Comparação entre Solução Atual e Solução Proposta	62
6	Conclusões	67
6.1	Conclusões	67
6.2	Trabalho Futuro	68
	Referências	70
	Anexo A Testes Realizados à Válvula Doseadora	75
	Anexo B Funções Básicas do Robô	83
	Anexo C <i>Datasheet</i> das Guias Telescópicas	87

Lista de Figuras

1.1	Instalações da Continental Mabor em Lousado [2]	2
1.2	Plano de Trabalho do Projeto	4
2.1	Colaboração entre o Humano e os Robôs [3]	8
2.2	Evolução do Mercado dos Robôs Colaborativos nos Últimos 5 Anos [6]	8
2.3	Principais Indústrias Associadas à Utilização de Robôs Colaborativos [8]	10
2.4	Solução de <i>Bin Picking</i> [9]	11
2.5	Solução de Paletização [10]	11
2.6	Solução de Aparafusamento [11]	12
2.7	Solução de Lixagem e Polimento [12]	12
2.8	Solução de Brasagem e Soldadura [13]	13
2.9	Solução para Testes de Qualidade e Inspeção [14]	14
2.10	Espaços de Trabalho dos Trabalhadores e dos Robôs [18]	16
2.11	Os Vários Níveis de Cooperação entre um Trabalhador Humano e um Robô [18]	16
2.12	As Quatro Formas de Colaboração - ISO 10218 [21]	18
2.13	Robôs Colaborativos <i>versus</i> Robôs Industriais [23]	18
2.14	Ventosas de Vácuo para Manipulação dos Sacos [24]	20
2.15	Máquina Ensacadora Vertical [25]	20
2.16	Sistema de Carrossel dos Contentores [26]	21
3.1	Constituição de um Pneu [27]	24
3.2	Processo Atual da Construção de um Pneu	24
3.3	Processo Atual da Pesagem e Mistura dos Pigmentos	26
3.4	Representação 2D da Estação de Trabalho	26
3.5	Estação de Trabalho: 1- <i>Human-Machine Interface (HMI)/Programmable Logic Controller (PLC)</i> ; 2-Balança Digital; 3-Dispensador de Sacos; 4-Plataforma de Tulhas; 5-Seladora de Sacos, 6-Tapete Rolante + Caixa de Armazenamento	27
3.6	Copos Medidores	27
3.7	HMI/PLC	28
3.8	Balança Digital	28

3.9	Dispensador de Sacos	29
3.10	Sistema de Transporte e Deslocamento das Tulhas	29
3.11	Etapa Final do Processo	30
3.12	Tipos de Pigmentos Existentes no Processo	30
3.14	Saco Vazio na Balança	31
3.13	Diagrama do Processo Atual	32
3.15	Processo de Enchimento de Saco	33
3.16	Últimas Etapas do Processo	33
4.1	<i>Design</i> da Ferramenta com Pega Lateral para o Robô	38
4.2	Diagrama do Processo Futuro - Parte 1	40
4.3	Diagrama do Processo Futuro - Parte 2	41
4.4	Diagrama da Arquitetura do Sistema Proposto	43
4.5	Ventosas de Vácuo - Representação 2D	45
4.6	Máquina Ensacadora Vertical - Representação 3D	46
5.1	Montagem da Estação de Testes	52
5.2	Posição de Enchimento	52
5.3	Trajetória do Robô - Posições Definidas	53
5.4	Diagrama do Movimento de Procura de Pigmento	54
5.5	Método de Pesagem 1	58
5.6	Método de Pesagem 2	59
5.7	Trajetória para o Processo de Enchimento	61
5.8	Regressão Logarítmica - Tempo de Ciclo Parcial da Válvula	64
5.9	Tempo de Ciclo Total Estimado para as Três Receitas Seleccionadas	65
5.10	Tempo de Ciclo Total Estimado para as Três Receitas Seleccionadas - Apenas Dosagem Fina	66
B.1	Definição do <i>Tool Center Point</i> (TCP) da Ferramenta do Robô [31]	84
C.1	<i>Datasheet</i> - Velocidades	87

Lista de Tabelas

2.1	Comparação das Capacidades e Limitações entre Humanos e Robôs [15]	14
2.2	Comparação entre Robôs Colaborativos e Robôs Industriais	19
3.1	Resultado dos Testes Realizados	34
4.1	Requisitos para o Robô Colaborativo	36
4.2	Requisitos para a Ferramenta do Robô	37
4.3	Estudo da Ferramenta - Distribuição Média de Peso dos Pigmentos p/Saco	38
4.4	Requisitos para a Válvula Doseadora	39
4.5	Requisitos para a Solução para a Manipulação dos Sacos	44
4.6	Vantagens e Desvantagens do Conceito das Ventosas de Vácuo	45
4.7	Vantagens e Desvantagens do Conceito da Máquina Ensacadora Vertical	46
4.8	Vantagens e Desvantagens do Conceito do Carrossel de Contentores	47
4.9	Comparação dos Custos dos Conceitos - Conceito 1	48
4.10	Comparação dos Custos dos Conceitos - Conceito 2	48
4.11	Comparação dos Custos dos Conceitos - Conceito 3	49
5.1	Testes Propostos para a Implementação do Robô	55
5.2	Algoritmos de Esvaziamento da Tulha	56
5.3	Teste de Pesagem - Peso Calibrado 0,5 kg	57
5.4	Teste de Pesagem - Peso Calibrado 1 kg	57
5.5	Teste de Pesagem - Peso Calibrado 2 kg	58
5.6	Método de Pesagem 1	59
5.7	Pesagem - <i>Sugar Powder</i>	60
5.8	Pesagem - <i>Chocolate Chips</i>	60
5.9	Tempo de Ciclo Parcial (Viagem do Robô)	61
5.10	Divisão do Tempo de Ciclo Total	62
5.11	Tabela de Tempos de Doseamento da Válvula	63
5.12	Tempo de Ciclo da Válvula - Receita A	64

Lista de Acrónimos

CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CMIP	Continental Mabor - Indústria de Pneus
E/S	Entrada/Saída
HMI	<i>Human-Machine Interface</i>
HRC	<i>Human-Robot Collaboration</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>
UE	União Europeia
UR	Universal Robots

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo vai ser feita uma breve contextualização sobre a empresa na qual o projeto foi realizado (Continental Mabor) e será explicado o problema que serve de base para o projeto proposto e os respectivos objetivos. De seguida, vão ser apresentados os resultados esperados para o projeto e qual o plano proposto para a sua realização. Por fim, vai ser feita uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo presente nesta dissertação.

1.1 Contextualização

A Continental Mabor iniciou as suas operações industriais em julho de 1990. Nessa época, resultou de uma parceria entre a Mabor (40%) e a Continental (60%). A partir de 1993, mediante aquisição das ações restantes, a Continental tornou-se a única acionista da empresa, o que perdura até hoje. Ao longo dos anos, a empresa realizou vários projetos de expansão e também de aprimoramento das condições de trabalho. Em relação à expansão da unidade industrial, em 1990, a área coberta era de 38 736 m² e, atualmente, essa área chega a 258 760 m², conforme demonstrado na Figura 1.1. No que diz respeito ao volume, a Continental Mabor aumentou a sua produção de 5 000 pneus por dia para mais de 50 000 pneus por dia em pouco mais de vinte anos. Além da produção de pneus leves, a Continental Mabor também fabrica pneus para a agricultura. Para além disso, possui um Centro de Avaliação e Testes de pneus agrícolas e industriais. No âmbito das tecnologias inaugurou um centro

de desenvolvimento de soluções de informação que após o seu teste em Lousado são replicadas para outras fábricas do Grupo [1].



Figura 1.1: Instalações da Continental Mabor em Lousado [2]

Atualmente, a Continental Mabor tem tomado medidas e aplicado esforços com vista a melhorar a eficiência dos seus processos, a ergonomia do local de trabalho, bem como a sua sustentabilidade e valorização. O projeto descrito nesta dissertação tem como objetivo estudar e projetar um conceito de automatização de um processo, onde o posto de trabalho tem fraca atração devido às condicionantes do meio envolvente e que devido à sua morfologia representa uma preocupação para a organização, nomeadamente no que se refere aos aspetos ergonómicos.

1.2 Definição do Problema

A pesagem de químicos na indústria da borracha é um processo parcialmente automático. Existem no mercado inúmeras soluções para a pesagem de químicos, porém, a sua flexibilidade é extremamente baixa, visto que é necessário um silo para cada químico. Por outro lado, as soluções automáticas não permitem a pesagem de todos os tipos de químicos, pelo que existe a necessidade que sejam pesados manualmente. Para além da parte técnica do problema, um dos principais motivos para a realização deste projeto é a melhoria das condições de trabalho. No processo atual, o operador encontra-se exposto a uma elevada carga de trabalho, por ser um trabalho repetitivo e pouco ergonómico para a condição física do ser humano.

Com o objetivo de automatizar esse processo e proteger o humano do trabalho pesado e repetitivo, foi pensada uma solução que consiste na introdução de um robô colaborativo, que irá ter a tarefa de transporte dos pigmentos para os sacos utilizados no processo atual. Além de melhorar as condições de trabalho para os operadores, a

incorporação de um robô nesse processo poderá proporcionar maior capacidade de trabalho, uma vez que o robô não precisará fazer pausas durante o seu horário de atividade.

De forma a complementar a solução anterior, foi apresentado outro problema que consiste na manipulação automática dos sacos de plástico utilizados no processo, que, atualmente, é realizada pelo operador humano. Desta forma, pelos motivos acima referidos, pretende-se idealizar uma solução que congregue todas as tarefas realizadas pelo operador, automatizando quase totalmente o espaço de trabalho utilizado para o processo de pesagem e enchimento de sacos de plástico.

1.2.1 Objetivos

Para a realização deste projeto, foram definidos alguns objetivos com o intuito de haver um processo de aprendizagem completo sobre os processos de uma indústria de pneus, especialmente sobre o processo de pesagem e mistura de pequenos químicos e sobre as principais tecnologias utilizadas no ambiente fabril e quais podem ser utilizadas para a sua automatização. Através desta fase inicial de formação, foi possível criar condições para o desenvolvimento do projeto de forma mais acessível, com os conhecimentos necessários para pensar, desenvolver e finalmente propor soluções adequadas e exequíveis.

Os objetivos propostos no âmbito desta dissertação foram:

- estudo do processo interno de pesagem de pequenos químicos;
- desenvolvimento de um conceito que permita eliminar a intervenção humana no processo de pesagem;
- avaliação das diferentes tecnologias de robótica e automação disponíveis no mercado que possam ser migradas para este novo conceito;
- implementação de protótipo como validação para partes críticas do conceito;
- desenho e documentação da solução.

1.2.2 Resultados Esperados

Neste projeto, os resultados esperados são a validação de áreas críticas do conceito do sistema de pesagem dos pigmentos e a idealização de um conceito completo e sólido para o sistema de manipulação de sacos, de forma a poderem ser implementados num futuro próximo. Para isso, vão ser realizados alguns testes para determinar o desempenho do robô e será desenvolvida uma solução para a manipulação dos sacos de plástico.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos e três anexos.

O presente capítulo introduz o projeto que suporta esta dissertação, sendo constituído por uma contextualização do projeto, pela definição do problema apresentado, pela exposição dos objetivos propostos, pela apresentação do plano de trabalho e pela presente clarificação da estrutura da dissertação.

De seguida, o Capítulo 2, onde é apresentada a fundamentação teórica dos tópicos abordados neste projeto que sustentaram a sua realização. Nesse capítulo é abordada a realidade da robótica colaborativa e da sua evolução, a comparação com o humano e com a robótica industrial. Posteriormente, são também apresentadas algumas tecnologias presentes no mercado, utilizadas para a manipulação de sacos de plástico.

No Capítulo 3 é ilustrado o processo completo da construção de um pneu, destacando o processo de pesagem e mistura dos pigmentos, visto que é a etapa da construção onde o objeto desta dissertação está inserido. Após a descrição, é apresentado um estudo realizado ao processo atual, com o intuito de, com os resultados obtidos, estruturar uma base de comparação entre a solução atual e a solução futura.

O Capítulo 4 baseia-se na descrição dos requisitos propostos para os componentes necessários para a primeira parte do projeto. Para além disso, é apresentado o diagrama de processo e a estrutura do sistema para a solução futura. De seguida, é realizada uma análise de possíveis soluções para a segunda parte do projeto, solução para a manipulação dos sacos, onde é descrito cada conceito selecionado e consideradas as vantagens e desvantagens de cada um. Por fim, é realizada uma comparação dos custos para a implementação de cada conceito descrito.

O Capítulo 5 consiste na descrição da implementação do robô colaborativo, onde é apresentado o *setup* experimental e explicadas as funções e os algoritmos utilizados para a programação do robô. De seguida, são listados e descritos os testes de desempenho realizados, apresentando também os respetivos resultados e conclusões obtidas.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões apuradas com o desenvolvimento deste projeto. O capítulo termina com a identificação de algumas sugestões para trabalho futuro.

No Anexo A estão presentes os resultados dos testes realizados à válvula doseadora, com os diversos pigmentos escolhidos.

No Anexo B são descritas as funções utilizadas na programação do robô colaborativo para as tarefas estipuladas.

No Anexo C é apresentado o *datasheet* das guias telescópicas selecionadas para a solução proposta. No *datasheet* estão presentes as características do equipamento utilizadas para a estimativa do tempo de ciclo.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo é feita uma breve introdução e descrição do tema da robótica colaborativa, da sua evolução do mercado, das possíveis aplicações na indústria e são feitas também comparações entre os humanos e os robôs e entre os robôs colaborativos e os industriais. De seguida, é feita uma descrição das tecnologias utilizadas para a manipulação dos sacos de plástico, presentes no mercado.

2.1 Robótica Colaborativa

A robótica colaborativa é uma área da robótica que se concentra no desenvolvimento de robôs capazes de trabalhar em colaboração com seres humanos num ambiente compartilhado. Essa tecnologia tem o potencial de revolucionar muitos setores industriais, permitindo que robôs e humanos trabalhem juntos de maneira segura e eficiente. Os robôs colaborativos geralmente possuem sensores sofisticados que lhes permitem detetar a presença de seres humanos e ajustar o seu comportamento em conformidade. Eles também são projetados para serem seguros relativamente aos humanos, através de medidas de segurança como limitação de velocidade, paragem de emergência e suavização de movimentos (Figura 2.1).

2.1.1 Evolução da Robótica Colaborativa no Mercado

A robótica colaborativa tem vindo a crescer significativamente nos últimos anos, tornando-se num dos setores com o crescimento mais rápido no mercado da robótica. Este crescimento reflete uma evolução notável da tecnologia nos últimos 10 anos.

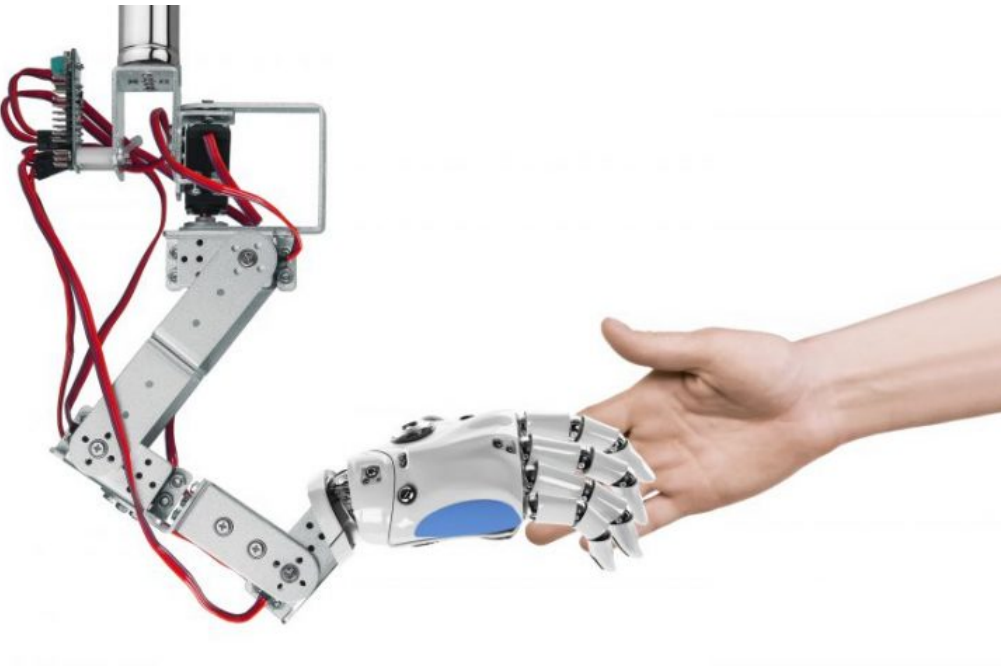


Figura 2.1: Colaboração entre o Humano e os Robôs [3]

A Figura 2.2 mostra uma comparação entre o mercado dos robôs industriais e o mercado dos robôs colaborativos nos últimos 5 anos, apresentando um crescimento do mercado dos robôs colaborativos de 50% em 2021, e mais de 300% desde 2017 ([4], [5]).

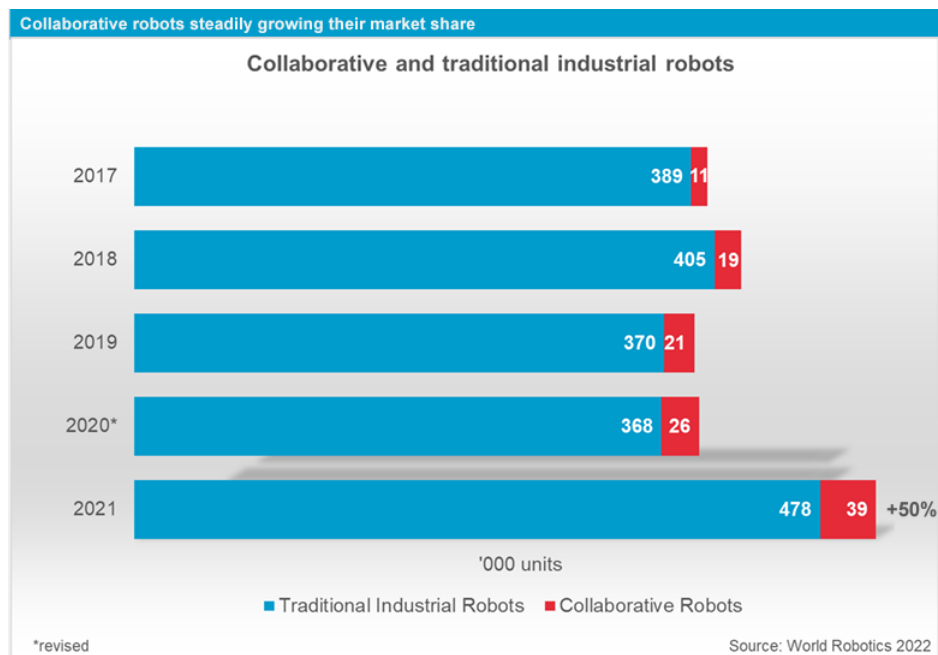


Figura 2.2: Evolução do Mercado dos Robôs Colaborativos nos Últimos 5 Anos [6]

“Muitas empresas, incluindo a Universal Robots, a FerRobotics, a Franka Emika, a BioRob-Arm, a F&P Robotics e a MRK Systeme, surgiram na União Europeia (UE) nos últimos anos. Estes novos participantes europeus estão fortemente concentrados no mercado dos *cobots*. O crescimento do mercado de *cobots* na UE foi projetado para uma média anual de 41% entre 2020 e 2026, com um valor de mercado de 343 milhões de euros em 2019 [7]. A maioria dos fabricantes europeus de robôs, incluindo grandes empresas como a ABB, a Comau, a Kuka, a Festo ou a Bosch, incluíram robôs colaborativos (*cobots*) nos seus portfólios de produtos desde que a tecnologia começou a estar disponível no mercado. De facto, as empresas europeias dominam o mercado mundial de *cobots*. A empresa dinamarquesa Universal Robots (UR), que vendeu o primeiro robô colaborativo comercial, UR5, em dezembro de 2008, é o participante dominante no mercado mundial. Atualmente, a UR controla mais de 50% do mercado mundial. Isto é especialmente impressionante, dado que 50% de todas as vendas de robôs, mundialmente, são efetuadas na China (52% de todas as instalações em 2021). Na China, existe uma clara tendência para comprar produtos nacionais. Em 2020, o negócio gerou 219 milhões de dólares. A empresa norte-americana Teradyne adquiriu a Universal Robots em 2015 por 285 milhões de dólares, mas desde então a empresa voltou ao seu nome original e continua a ter a sua sede na Dinamarca” [5].

2.1.2 Aplicações da Robótica Colaborativa

Os robôs colaborativos têm sido utilizados nas mais diversas áreas da indústria, desde a indústria automóvel e aeroespacial até às médias e pequenas empresas que apostam nesta tecnologia para aumentar a sua produtividade, como é possível observar na Figura 2.3. O setor automotivo teve um desempenho notável em termos de receita em 2022, representando mais de 24%, e a previsão é de um crescimento substancial nos próximos anos. Uma das razões para esse crescimento é a utilização cada vez mais frequente de robôs colaborativos, que se têm mostrado eficientes ao economizar espaço nas fábricas e reduzir as despesas com interrupções na produção. Essa expansão é especialmente relevante, já que os robôs colaborativos desempenham um papel importante em tarefas como soldagem por arco e por pontos, montagem de componentes, pintura, revestimento e outros processos [8].

Outro setor que tem investido neste nicho de mercado é a indústria da eletrónica. Nos próximos anos, prevê-se que o setor da eletrónica venha a registar uma *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) significativa, superior a 32%. A expansão é atribuída à capacidade dos robôs colaborativos de realizarem uma variedade de tarefas com elevada repetibilidade, incluindo distribuição, inserção, rotulagem e aparafusamento. As inovações serão a força motriz por detrás do aumento da adoção

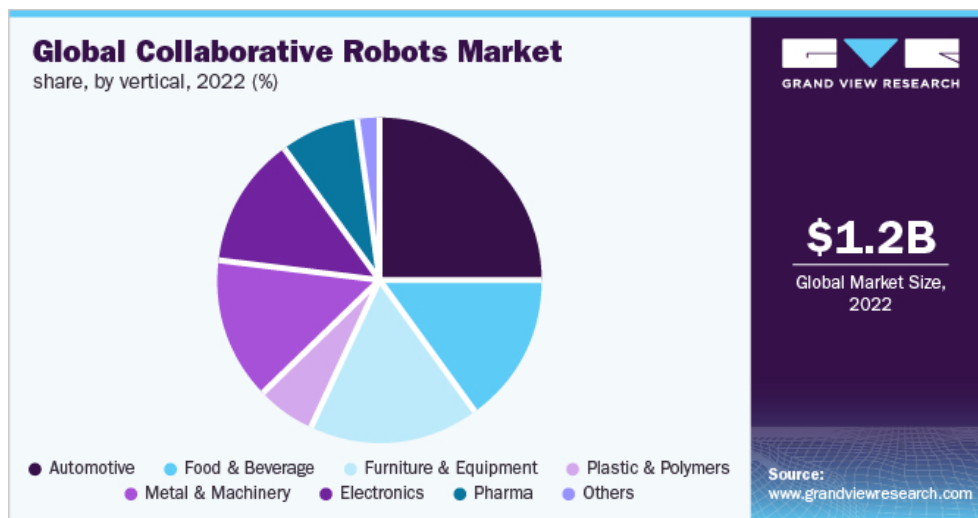


Figura 2.3: Principais Indústrias Associadas à Utilização de Robôs Colaborativos [8]

desta tecnologia, juntamente com o aumento dos esforços de investigação e desenvolvimento por parte dos participantes no mercado para aumentar a produtividade, a relação custo-eficácia e as despesas gerais de fabrico reduzidas [8].

Com esta variedade de indústrias que utilizam robôs colaborativos, estes realizam diversas tarefas, como, por exemplo:

- **Pick and place**

O *pick and place* apresenta-se como uma das tarefas-base da automação recorrendo aos robôs, que tal como o nome indica, consiste em pegar num determinado objeto, transportá-lo e colocá-lo no local desejado. Apesar de parecer uma tarefa simples, por vezes pode surgir alguma complexidade acrescida quando não há uma cadeia estruturada no fluxo de componentes ou quando estes não são todos iguais. Nestes casos, poderá ser necessário implementar uma solução de *bin picking*, que consiste em implementar sistemas de visão que permitem ao robô determinar a posição de um componente (Figura 2.4). De seguida, o robô poderá mover-se de forma a agarrar o componente da maneira correta e deslocá-lo até à posição alvo, evitando colisões.

- **Paletização**

O processo de paletização consiste em empilhar caixas ou dispor produtos numa paleta (Figura 2.5). O robô tem a habilidade de organizar as caixas de acordo com um padrão pré-definido, visando maximizar a carga, compactar o espaço ocupado e reduzir o risco de quedas. A introdução de um robô nessa função evita que os operadores precisem realizar essa tarefa cansativa. Além disso, os robôs têm a capacidade de trabalhar por dias inteiros, diminuindo os tempos necessários para cada ciclo de empilhamento.

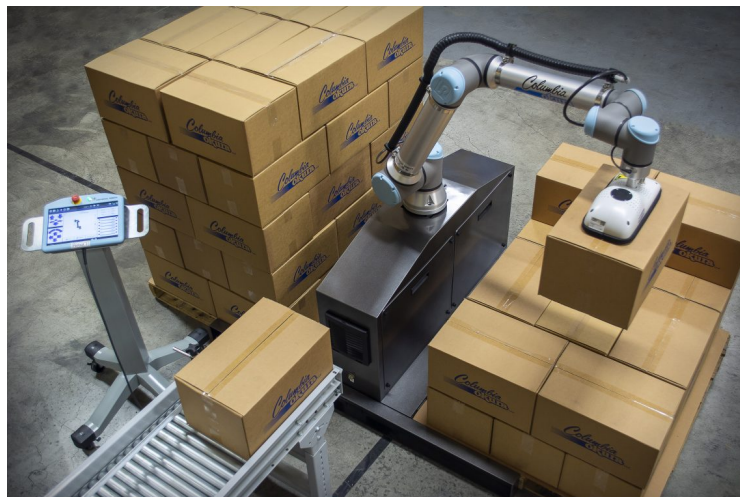
Figura 2.4: Solução de *Bin Picking* [9]

Figura 2.5: Solução de Paletização [10]

- **Aparafusamento**

A tarefa de aparafusamento revela-se simples e repetitiva, contudo seria desgastante para um ser humano, podendo, deste modo, ser realizada por um robô, sem interrupções (Figura 2.6). Os robôs têm a capacidade de alinhar os componentes com precisão e assegurar a mesma força de aperto ao longo do tempo, atendendo aos requisitos específicos de cada produto. Devido à sua aplicação frequente, os robôs colaborativos realizam essas tarefas com uma precisão de 0,1 mm, resultando numa qualidade final de produtos extremamente consistente.



Figura 2.6: Solução de Aparafusamento [11]

- **Lixagem e Polimento**

A técnica de lixagem ou polimento pode ser realizada em diferentes tipos de peças, incluindo plástico, madeira e metal. Por meio da obtenção de dados através de sensores, os robôs conseguem seguir com precisão os contornos da peça específica, aplicando força constante na superfície para obter o acabamento desejado (Figura 2.7). Tendo esta característica em atenção, ensinar o robô a seguir um certo conjunto de pontos não se revela uma tarefa muito complexa [12].



Figura 2.7: Solução de Lixagem e Polimento [12]

- **Brasagem e Soldadura**

Um robô colaborativo pode ser utilizado para automatizar de forma rápida e simples uma aplicação de soldadura, podendo efetuar vários processos de soldadura, incluindo a soldadura de *Printed Circuit Board* (PCB), montando ferramentas especializadas de fim de braço na extremidade da máquina (Figura 2.8). Além do ferro de soldar que gera calor, é utilizado um instrumento para aplicar o estanho. O robô possui um sistema externo que permite limpar o ferro de soldar entre as tarefas. A realização da soldagem requer um alto nível de precisão, o que pode tornar-se monótono para os funcionários ou resultar numa qualidade variável devido à falta de concentração. Ao delegar essas tarefas a um robô, é possível garantir uma qualidade consistente e até aumentar a produtividade. Dessa forma, os funcionários podem utilizar o seu tempo disponível para realizar outras atividades, como o controlo de qualidade ou o trabalho preliminar necessário para que o robô execute a soldagem corretamente. Além disso, o número de soldadores qualificados é bastante escasso. Para auxiliar as empresas a competir num mercado de trabalho cada vez mais concorrido, os robôs podem ajudar a resolver essa escassez.



Figura 2.8: Solução de Brasagem e Soldadura [13]

- **Testes de Qualidade e Inspeção**

Os testes de qualidade e a inspeção com *cobots* estão a tornar-se mais comuns. Isto tem como vantagens o aumento da produtividade dos trabalhadores, tempos de teste mais curtos e baixas taxas de erro. Um *cobot* é perfeitamente capaz de realizar tarefas de teste como, por exemplo, teste de PCB, teste de *chips* e teste de dispositivos com ecrã tátil. Graças aos sensores integrados, os *cobots* funcionam com grande precisão e lidam com vários produtos com cuidado. A utilização da inspeção ótica também é possível graças à tecnologia de visão (Figura 2.9).



Figura 2.9: Solução para Testes de Qualidade e Inspeção [14]

2.1.3 Comparação entre Humanos e Robôs

O conceito de robôs colaborativos está alinhado aos padrões e requisitos da Indústria 4.0. Com isso em mente, surge a pergunta sobre qual a necessidade dos robôs. A resposta clara e objetiva é que os pontos fortes dos humanos são os pontos fracos dos robôs e vice-versa. Para uma melhor compreensão dessa questão, é preciso comparar as capacidades fundamentais dos seres humanos e dos robôs em termos das suas habilidades e limitações. A Tabela 2.1 mostra uma breve comparação das capacidades dos seres humanos e dos robôs [15].

Tabela 2.1: Comparação das Capacidades e Limitações entre Humanos e Robôs [15]

Humanos		Robôs	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Destreza	Fraqueza	Força	Falta de Destreza
Flexibilidade	Fadiga	Resistência	Falta de Flexibilidade
Criatividade	Imprecisão	Precisão	Falta de Criatividade
Poder de Decisão	Baixa Produtividade	Alta Produtividade	Sem Poder de Decisão

Através da comparação presente na Tabela 2.1, é possível verificar que os robôs foram criados para compensar as limitações humanas. Uma das principais preocupações associadas à chegada dos robôs era que eles estavam destinados a substituir

os seres humanos. No entanto, desde então, eles têm sido utilizados para auxiliar em várias tarefas de fabricação tediosas, repetitivas e perigosas que requerem alta precisão. Os ambientes de trabalho onde os robôs foram instalados costumavam ser isolados fisicamente dos trabalhadores humanos. No entanto, graças aos avanços tecnológicos, o campo da robótica está se desenvolvendo rapidamente ao ponto das pessoas verem os robôs como parceiros úteis tanto no trabalho quanto em casa, podendo até mesmo compartilhar o mesmo espaço de trabalho [16]. Através desta colaboração entre robô e humano, é possível complementarem-se mutuamente, por exemplo, durante a montagem, paletização ou outras operações tecnológicas.

Esta colaboração tem, também, a vantagem de encurtar os ciclos de inovação e se adaptar melhor à demanda do mercado, uma vez que é difícil prever as necessidades específicas dos consumidores. Em situações como essas, a utilização de robôs em conjunto com humanos mostra-se uma solução ideal. Além disso, os robôs também podem ser empregados para controlar e depurar aplicações, diminuindo a possibilidade de erros humanos [17]. Para além do complemento obtido através da utilização dos robôs, um dos grandes objetivos da sua utilização é a redução e/ou ajuda aos trabalhadores humanos na realização dos *Dirty, Dangerous, or Dull jobs*, também conhecidos como trabalhos 3D [15]. Estes podem entrar em locais difíceis de alcançar, transportar objetos extremamente pesados, e, mesmo assim, atingir uma precisão e velocidade inigualáveis, aliviando as pessoas do trabalho monótono e exigente. Assim, os humanos podem focar-se nos processos que exigem raciocínio e executar tarefas que agregam mais valor.

2.1.4 Tipos de Colaboração entre Robôs Colaborativos e Humanos

O termo *Human–Robot Collaboration* (HRC) consiste na utilização de robôs sem vedação de segurança, que pode ser dividido em vários tipos de interação entre humanos e robôs em diferentes níveis. A distinção estrita entre o trabalho automatizado realizado por robôs e o trabalho manual realizado por trabalhadores humanos é eliminada porque as tarefas realizadas por ambos os tipos de trabalhadores são combinadas num único ambiente de trabalho. É criado um espaço de trabalho partilhado quando as zonas de trabalho dos robôs e dos humanos se sobrepõem, como é possível observar na Figura 2.10 [18].

A HRC pode assumir muitas formas diferentes, desde um espaço de trabalho partilhado onde não há interação direta ou coordenação de tarefas, até um robô que adapta o seu movimento em tempo real ao de um trabalhador humano específico [19]. Com base nisto, foram definidas as categorias de interação no espaço de trabalho partilhado, sempre com base na tarefa especificada pela aplicação (Figura 2.11):

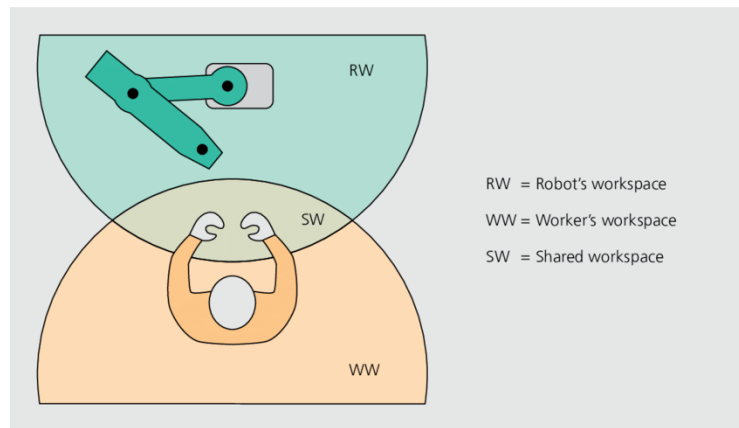


Figura 2.10: Espaços de Trabalho dos Trabalhadores e dos Robôs [18]

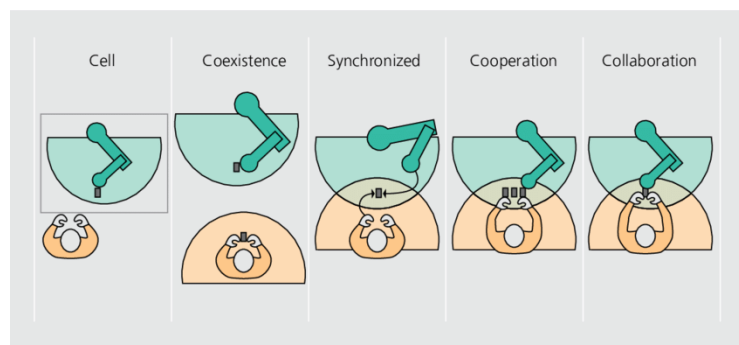


Figura 2.11: Os Vários Níveis de Cooperação entre um Trabalhador Humano e um Robô [18]

- **célula** - Não é um cenário de cooperação genuíno, uma vez que o robô é operado numa gaiola tradicional de segurança;
- **coexistência** - O trabalhador humano e o robô trabalham lado a lado, mas não partilham um espaço de trabalho;
- **sincronização** - A conceção do fluxo de trabalho significa que o trabalhador humano e o robô partilham um espaço de trabalho, mas que apenas um dos parceiros de interação está realmente presente no espaço de trabalho de cada vez;
- **cooperação** - Ambos os parceiros de interação podem ter tarefas a realizar em simultâneo, no espaço de trabalho (partilhado), mas não trabalham simultaneamente no mesmo produto ou componente;
- **colaboração** - O trabalhador humano e o robô trabalham simultaneamente no mesmo produto ou componente.

Para a colaboração entre humanos e robôs, foi criada a Norma *International Organization for Standardization* (ISO) 10218, onde é estabelecido uma série de requisitos e orientações para a conceção segura inerente, medidas de proteção, e informação para a utilização de robôs industriais. Descreve os perigos básicos associados aos robôs, e fornece requisitos para eliminar ou reduzir adequadamente os riscos associados a estes perigos. Segundo a ISO 10218, parte 1 e 2, são definidas quatro classes de requisitos de segurança para os robôs colaborativos, conforme listados abaixo (Figura 2.12) [20]:

1. *Safety Monitored Stop*

Os robôs colaborativos são desenvolvidos para situações em que é necessário um mínimo de interação entre robôs e trabalhadores humanos. Numa situação ideal, esse tipo de robô é equipado com vários sensores que suspenderão as suas operações assim que um humano invade o ambiente de trabalho.

2. *Hand Guiding*

Os robôs colaborativos podem ser facilmente reprogramados para executar novas tarefas ou até conduzido durante a realização de operações através da orientação manual do braço pelo operador. Dessa forma, é possível realizar uma reprogramação rápida com o mínimo de tempo necessário, diminuindo, assim, a necessidade de um programador especializado com conhecimento em robótica.

3. *Speed and Separation Monitoring*

Os robôs utilizam sistemas de visão avançados, como câmaras de segurança inteligentes e radares de segurança 3D, em comparação com os robôs colaborativos de paragem de segurança monitorizado. Os sistemas avançados de visão permitem aos robôs colaborativos identificar o trabalhador humano e, conseqüentemente, retardam as operações. Além disso, à medida que o trabalhador humano se aproxima demasiado, os robôs colaborativos param imediatamente as operações.

4. *Power and Force Limiting*

Os robôs colaborativos são construídos com cantos arredondados, em vez de cantos afiados, e estão equipados com uma série de sensores de colisão sofisticados. Quando os sensores de colisão inteligentes entram em contacto com um trabalhador humano, param imediatamente as operações. Além disso, possuem uma função de limitação da força que garante que não há ferimentos mesmo em caso de colisão.



Figura 2.12: As Quatro Formas de Colaboração - ISO 10218 [21]

2.1.5 Comparação entre Robótica Colaborativa e Robótica Industrial

A área de robôs colaborativos tem sido amplamente investigada, porém, ainda não houve uma definição clara sobre quais tipos de robôs podem ser considerados *cobots*, nem mesmo a própria definição de robô colaborativo é totalmente precisa. Os robôs industriais foram criados para compensar as limitações humanas. Nesse contexto, ao longo dos anos, novas estratégias de interação entre humanos e robôs têm sido desenvolvidas, ou seja, os *cobots* são o resultado desses esforços e devem ser vistos como uma ferramenta complementar para os trabalhadores humanos [17]. Por conseguinte, os robôs colaborativos têm despertado interesse em várias empresas, desde a indústria automóvel e aeroespacial até pequenas e médias empresas, pois são considerados um dos pilares para a automação flexível na era da Indústria 4.0 (Figura 2.13) [22].

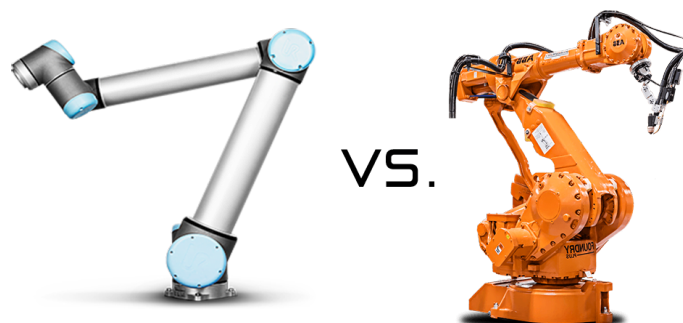


Figura 2.13: Robôs Colaborativos *versus* Robôs Industriais [23]

Os robôs colaborativos podem ser facilmente programáveis, quando comparados aos robôs tradicionais, tornando a colaboração entre eles e os humanos muito mais simples. O utilizador ou o operador necessita de algum conhecimento técnico para a sua programação ou utilização, porém, é uma programação muito mais intuitiva e acessível em comparação à dos robôs industriais [17]. Também não precisam de ser explicitamente programados, podendo mesmo ser programados simplesmente movendo-os através de um percurso de movimento específico. A Tabela 2.2 apresenta outras principais diferenças entre os robôs industriais tradicionais e robôs colaborativos.

Tabela 2.2: Comparação entre Robôs Colaborativos e Robôs Industriais

Categoria	Robôs Colaborativos	Robôs Industriais
Segurança	Podem trabalhar junto a humanos sem barreiras de proteção ou gaiolas. Possuem sensores integrados e recursos de segurança para evitar colisões com humanos.	Projetados para uso em áreas separadas ou atrás de barreiras de proteção. Não destinados a operar em proximidade com humanos.
Programação	Mais fáceis de programar e operar. Frequentemente apresentam <i>interfaces</i> intuitivas e métodos de ensino e reprodução.	Requerem programação e conhecimento especializados para operar com eficiência.
Flexibilidade	Mais flexíveis e adaptáveis a diferentes tarefas e necessidades de produção. Podem ser rapidamente reprogramados e reconfigurados para executar diferentes tarefas.	Geralmente projetados para tarefas específicas e podem exigir reprogramação ou modificação significativa para executar diferentes tarefas.
Capacidade de carga	Projetados para tarefas mais leves e têm uma capacidade de carga mais baixa.	Projetados para tarefas pesadas e têm uma capacidade de carga mais alta.
Custo	Geralmente menos caros, tornando-os mais acessíveis a empresas e operações menores.	Tipicamente mais caros devido à sua capacidade de carga mais alta, precisão e capacidades especializadas.

2.2 Tecnologias de Manipulação de Sacos de Plástico

Como foi referido anteriormente, para além do transporte e doseamento dos pigmentos, existe outro problema a abordar neste projeto. Com o objetivo de automatizar totalmente o processo atual, foi necessário pensar numa solução para a manipulação dos sacos de plástico utilizados no transporte dos pigmentos doseados. Para a resolução deste problema, foi realizada uma pesquisa de mercado, onde foram encontrados dois tipos de soluções: algumas muito genéricas, ou seja, consistem apenas numa tecnologia que pode ser utilizada de diferentes formas, e outras que já são produtos construídos e comercializados, sendo assim, soluções mais específicas e semelhantes às existentes no mercado. Dentro das categorias de soluções mencionadas anteriormente, encontraram-se três alternativas diferentes.

A **primeira solução** encontrada consiste na manipulação dos sacos através de ventosas. Esta técnica seria do tipo de solução mais genérico, pois pode ser executada de várias formas diferentes, mas utilizando a mesma tecnologia: **ventosas de vácuo** (Figura 2.14).

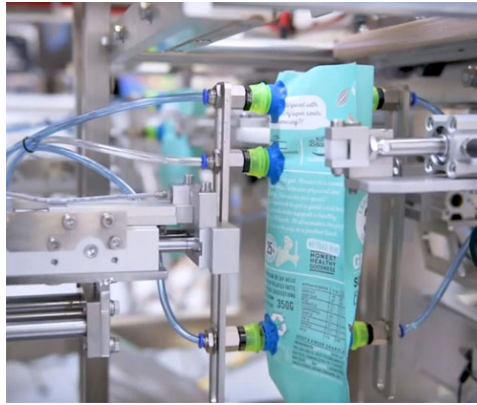


Figura 2.14: Ventosas de Vácuo para Manipulação dos Sacos [24]

Para a utilização da tecnologia representada na Figura 2.14, será necessária uma estrutura auxiliar, como um robô, uma plataforma móvel, uma garra ou uma estrutura com a capacidade de suportar e controlar as ventosas para a manipulação necessária para a solução. Assim sendo, existem inúmeras possibilidades de adaptação desta tecnologia face ao problema enfrentado neste projeto, porém, todas as possibilidades estudadas apresentam problemas de fiabilidade na manipulação dos sacos utilizados no processo atual.

A **segunda solução** encontrada é uma solução já comercializada por diversas empresas, que consiste numa máquina ensacadora de produtos. Esta máquina produz o saco durante o enchimento do próprio, havendo a possibilidade de reduzir o tempo de ciclo e congregando todos os componentes em apenas uma máquina, como é possível ver na Figura 2.15.

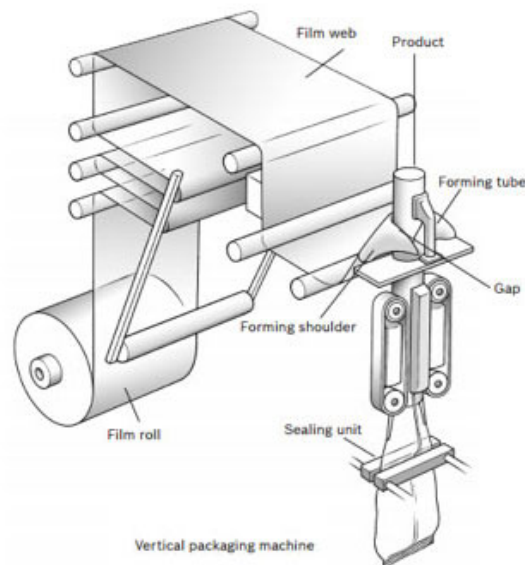


Figura 2.15: Máquina Ensacadora Vertical [25]

Ao contrário da primeira solução, esta solução identifica-se mais fiável, pois não existe o problema da manipulação dos sacos, com a produção do saco feita em paralelo com o doseamento. Porém, esta solução abarca outros desafios, como a altura de abastecimento de pigmentos para a máquina, o volume do espaço de trabalho que o robô necessita para o transporte dos pigmentos, entre outros.

A **terceira, e última, solução** encontrada consiste num sistema de produção, transporte e manipulação dos sacos em contentores (Figura 2.16). Nesta solução, o saco é produzido através dum material colocado em rolo no início do processo. Depois, é inserido num contentor que é deslocado para o ponto de doseamento, e de seguida, para o ponto de descarga.

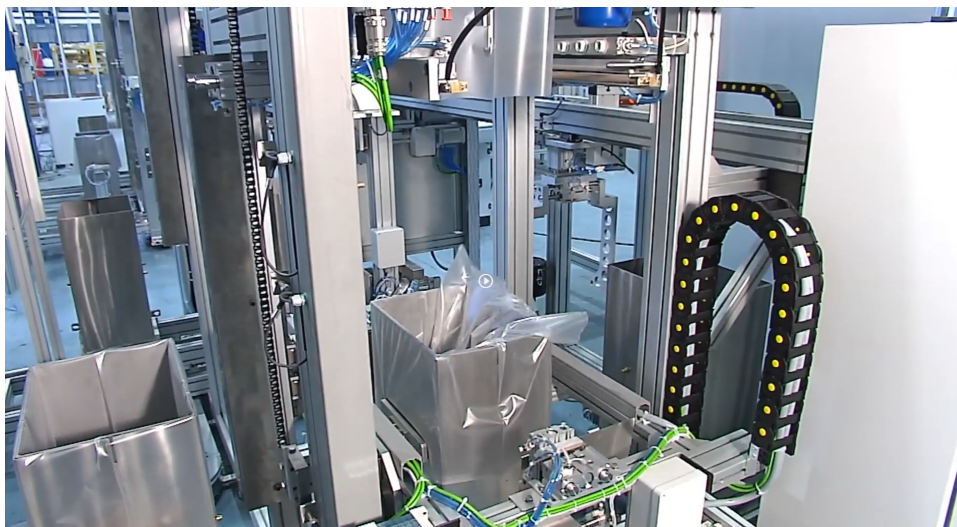


Figura 2.16: Sistema de Carrossel dos Contentores [26]

Como é possível ver na Figura 2.16, esta máquina encontra-se disposta na horizontal, ou seja, toda a solução ficaria ao nível do solo, facilitando o trabalho de transporte dos pigmentos por parte do robô, e reduzindo a altura de doseamento por parte da válvula. Contudo, existe a probabilidade de aumento do tempo de ciclo, em comparação com a segunda solução, pois irá ser necessário mais tempo para a preparação, transporte e manipulação dos sacos preparados.

No Capítulo 4, estes conceitos vão ser descritos e comparados entre eles, apontando as vantagens e desvantagens de cada tecnologia utilizada e/ou estrutura necessária para a sua utilização.

Capítulo 3

Caraterização do Processo Atual

Este capítulo está dividido em duas partes: **a descrição do processo atual e a realização de um estudo** para a sua caraterização. Na primeira parte é feita uma breve introdução e descrição da constituição de um pneu e das várias etapas presentes na sua construção, destacando a etapa onde o problema referido no Capítulo 1 acontece. Após essa introdução, é feita uma descrição detalhada do processo da pesagem dos pigmentos, desde a caraterização do espaço e das ferramentas de trabalho até à caraterização da tipologia dos pigmentos utilizados. Por fim, é apresentado o diagrama do processo completo, onde são enumeradas todas as etapas do processo de pesagem e enchimento dos sacos com pigmentos. Na segunda, e última, parte será efetuado um estudo sobre o processo atual, tendo sido realizados alguns testes de desempenho para a caraterização do processo.

3.1 Constituição de um Pneu

O pneu é composto por elementos têxteis, metálicos e, sobretudo, borracha. Cada fabricante adota as suas próprias configurações para a produção de pneus e, inclusive, dentro de cada fabricante, existem diversos modelos adaptados para diferentes finalidades, como o tipo de veículo, velocidades máximas e capacidade de carga. Cada pneu é constituído por vários componentes diferentes, como é possível ver na Figura 3.1.

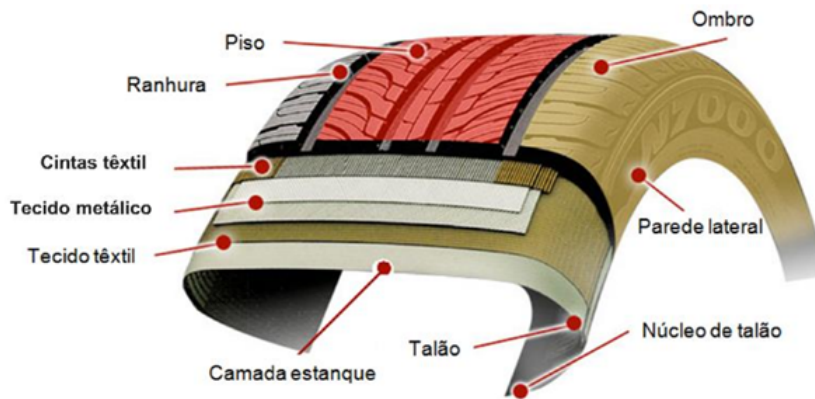


Figura 3.1: Constituição de um Pneu [27]

3.2 Etapas da Construção de um Pneu

A produção de um pneu Continental acontece através de um processo com cinco etapas essenciais da fabricação de pneus: a **Misturação**, a **Preparação a Quente e a Frio**, a **Construção**, a **Vulcanização** e a **Inspeção Final** (Figura 3.2).



Figura 3.2: Processo Atual da Construção de um Pneu

1. Misturação

Na **1.ª etapa do processo** são pesados e misturados os pigmentos necessários para o composto a ser produzido. Cada composto está registado por uma receita, onde se pode encontrar o número de pigmentos e a respetiva quantidade [28]. De seguida os pigmentos são misturados com diversos tipos de borracha,

com óleos e outros agentes químicos, com o intuito de produzir compostos finais que serão integrados nas fases posteriores do processo produtivo.

2. Preparação a Quente e a Frio

Nesta etapa são produzidos todos os componentes que integram o pneu, que seguem depois em carros de transporte para a área de construção [28].

3. Construção

Todos os produtos fabricados nas etapas anteriores são montados nesta fase do processo, ficando pronto o “pneu em cru”. São utilizadas as máquinas KM — constroem a carcaça do pneu, que é constituída pela camada estanque, talões e paredes laterais — e as máquinas PU — que juntam à carcaça os *breakers*, cintas têxteis e piso [28].

4. Vulcanização

Nesta etapa o pneu é submetido a elevadas temperaturas nas prensas, onde os moldes dão o aspeto final ao pneu. Durante este processo, a borracha em bruto torna-se flexível e elástica. É gravado o padrão do piso de rodagem e feitas as inscrições na parede lateral [28].

5. Inspeção Final

Nesta última etapa são feitas as verificações para garantir todos os requisitos de qualidade do pneu. A verificação é feita através de métodos automáticos, visuais e/ou manuais. Depois desta fase, os pneus seguem para o armazém de produto acabado [28].

3.3 **Pesagem e Mistura dos Pigmentos: Caracterização do Processo**

O problema apresentado no Capítulo 1 encontra-se na primeira etapa da construção do pneu, denominada por **misturação**, mais propriamente no sub-processo da preparação de pigmentos. Este sub-processo consiste na pesagem e mistura dos pigmentos necessários para a produção dos compostos finais utilizados na construção do pneu. Na pesagem e mistura de pigmentos, existem inúmeras receitas que podem ser solicitadas, havendo a necessidade de uma enorme flexibilidade e acessibilidade, de forma a evitar maiores perdas de tempo e material. Além disso, este processo envolve o transporte e manuseamento de materiais tóxicos, deixando o agente humano exposto por longos períodos de tempo, apesar da utilização da proteção adequada (Figura 3.3).

Atualmente, existem dois métodos de pesagem dos pigmentos: a **pesagem manual** e a **pesagem automática**. A pesagem manual, presente na Figura 3.3, é um



Figura 3.3: Processo Atual da Pesagem e Mistura dos Pigmentos

processo onde o operador realiza praticamente todo o trabalho necessário, apresentando os problemas indicados acima. Já a pesagem automática, como o nome indica, é um processo totalmente automático, utilizando máquinas especializadas para a pesagem dos pigmentos e o enchimento dos sacos sem intervenção do operador. Esta última solução acarreta algumas condições exigentes: custo elevado, segurança e equipamentos associados, espaço necessário e manutenção complexa. Devido a estas condições, resolveu-se pensar numa solução mais acessível e flexível para automatizar o processo manual, aproveitando o máximo da estrutura já existente.

3.3.1 Apresentação do Espaço de Trabalho Atual

O processo de pesagem e mistura dos pigmentos é realizado numa área de trabalho, representada na Figura 3.4, onde o trabalhador tem acesso a todas as ferramentas necessárias para realizar a sua tarefa.

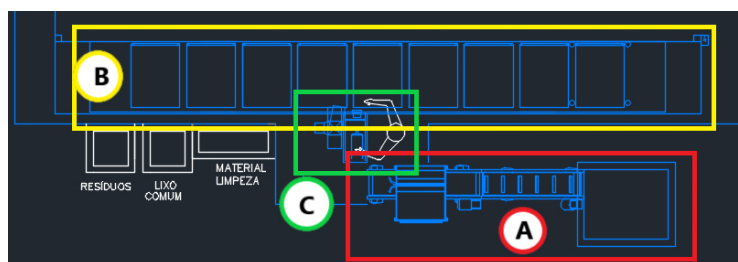


Figura 3.4: Representação 2D da Estação de Trabalho

Na estação de trabalho, evidenciada na Figura 3.5, o trabalhador tem à sua disposição um dispensador de sacos de plástico e uma balança digital conectada a um PLC que envia e recebe as informações necessárias sobre as quantidades de pigmentos pretendidas, sendo estas também apresentadas numa HMI presente na estação (Letra C da Figura 3.4). Tem acesso também a uma plataforma onde as

tulhas, que são os carrinhos onde os pigmentos são transportados, estão posicionadas. Consoante a receita e os pigmentos utilizados, a plataforma vai-se deslocando de forma que o pigmento necessário esteja acessível para o trabalhador (Letra B da Figura 3.4). Após o enchimento, o trabalhador terá de selar o saco utilizando uma seladora, que será enviado, de seguida, para uma caixa de armazenamento através dum tapete rolante (Letra A da Figura 3.4).



Figura 3.5: Estação de Trabalho: 1-HMI/PLC; 2-Balança Digital; 3-Dispensador de Sacos; 4-Plataforma de Tulhas; 5-Seladora de Sacos, 6-Tapete Rolante + Caixa de Armazenamento

- **Copo Medidor**

No processo de enchimento dos sacos, o trabalhador utiliza vários copos medidores, apresentados na Figura 3.6, para transportar os diferentes pigmentos necessários em cada receita.



Figura 3.6: Copos Medidores

- **1 - HMI/PLC**

Em cada estação de pesagem, existe um PLC que irá trocar informações com alguns componentes do espaço de trabalho. Este PLC permite ao trabalhador

controlar o espaço de trabalho, desde parar e começar o sistema como identificar e corrigir algumas falhas que possam existir no sistema. No espaço de trabalho, existe também uma HMI utilizada para dar uma “interface” gráfica ao sistema, visível na Figura 3.7, onde o trabalhador pode ver as ordens planeadas, as falhas detetadas e o valor que a balança está a registar no momento da pesagem.



Figura 3.7: HMI/PLC

• 2 - Balança Digital

A balança utilizada para o processo de pesagem dos pigmentos é uma balança digital, presente na Figura 3.8, que se encontra ligada a um PLC para a troca de informações relativas às quantidades de pigmentos necessárias para as respetivas receitas. Para além do ecrã presente na balança, o trabalhador consegue ver a quantidade pesada no momento através da HMI anexada ao PLC, sendo esta quantidade representada através de um número e de uma barra que vai alterando consoante a quantidade de pigmento pesada.



Figura 3.8: Balança Digital

- **3 - Dispensador de Sacos**

O trabalhador tem à sua disposição uma máquina dispensadora de sacos, de onde irá retirar os sacos necessários para a realização do processo de enchimento. Recorrendo a este dispensador, é possível que o processo de enchimento dos sacos seja contínuo e, assim, cumprir as ordens planeadas para o trabalhador. Estes sacos irão ser posicionados na balança, de forma que o trabalhador insira o produto no saco e este seja pesado em simultâneo (Figura 3.9).



Figura 3.9: Dispensador de Sacos

- **4 - Plataforma Móvel das Tulhas**

Durante o processo, as tulhas são posicionadas numa plataforma móvel, que se desloca em apenas um eixo, paralelo ao espaço de trabalho. Esta plataforma é utilizada para deslocar as tulhas com os pigmentos requeridos, de forma a que fique acessível ao trabalhador. Na Figura 3.10a, é possível observar uma tulha individual, utilizada para transportar os pigmentos para o espaço de trabalho, mais concretamente, para a plataforma móvel, presente na Figura 3.10b.



(a) Tulha Individual



(b) Plataforma das Tulhas

Figura 3.10: Sistema de Transporte e Deslocamento das Tulhas

- 5/6 - Seladora, Tapete Rolante e Caixa de Armazenamento

Após o processo de enchimento, o saco será selado para seguir para as etapas seguintes do processo. Com este objetivo, existe uma máquina seladora no espaço de trabalho, visível na Figura 3.11a, onde o trabalhador sela os sacos preparados. Após ser selado, o saco é pousado num tapete rolante e posteriormente depositado numa caixa de armazenamento (Figura 3.11b).



(a) Máquina para a Selagem dos Sacos



(b) Tapete Rolante e Caixa de Armazenamento

Figura 3.11: Etapa Final do Processo

3.3.2 Tipologia dos Pigmentos

Na preparação dos compostos finais utilizados na construção dos pneus, são utilizados inúmeros pigmentos químicos, com diversas formas, pesos, texturas, entre outros, podendo ser divididos em dois grandes grupos: os **Pós** e os **Granulados**, representados na Figura 3.12. De referir que foi feita uma lista completa e detalhada dos pigmentos, mas que não é apresentada por motivos de confidencialidade.

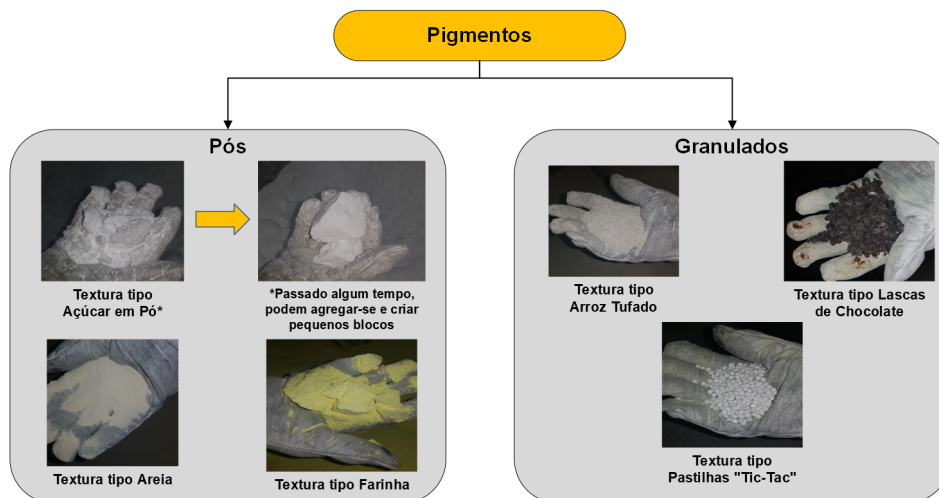


Figura 3.12: Tipos de Pigmentos Existentes no Processo

3.3.3 Mapeamento do Processo Atual

O processo atual de pesagem e mistura dos pigmentos está dividido em duas etapas: a **Preparação do Espaço de Trabalho** e o **Processo de Enchimento**. Na Figura 3.13 é possível ver o diagrama de processo completo, estando a primeira etapa no retângulo de cima, e a segunda etapa no retângulo de baixo.

Na **primeira etapa do processo**, o trabalhador descarrega as ordens planeadas para o PLC, que são apresentadas na HMI. De seguida, o trabalhador seleciona uma das receitas e começa a preparação do espaço de trabalho (Etapa 2 da Figura 3.13), onde prepara os pigmentos necessários para o enchimento dos sacos, tendo em conta a receita que selecionou na HMI. Após colocar as tulhas no local correto, o sistema verifica se as tulhas selecionadas são as corretas, e no caso de uma receita com múltiplos pigmentos, se estão pela ordem registada na receita. Esta verificação acontece através de etiquetas de *Radio Frequency Identification* (RFID) incorporadas nas tulhas que transportam os pigmentos, que são lidas quando colocadas nas posições designadas. Caso haja algum erro, o sistema não permite a pesagem e avisa o trabalhador sobre o erro encontrado, para que este seja corrigido. Se não houver nenhum erro, o trabalhador irá colocar um saco vazio na balança e, de seguida, irá tarar a balança, de forma que o peso do saco vazio não influencie na pesagem do pigmento, como pode ser visto na Figura 3.14 (Etapa 3 e 4 da Figura 3.13).



Figura 3.14: Saco Vazio na Balança

Após a preparação do espaço de trabalho, o trabalhador começa a **segunda etapa do processo**: a pesagem e o enchimento dos sacos. Para o enchimento do saco, o trabalhador pega no copo medidor e enche-o com o pigmento requerido pela receita, despejando-o no saco posicionado na balança, como é possível observar na Figura 3.15 (Etapa 5, 6 e 7 da Figura 3.13). Após ter atingido a quantidade pedida do primeiro pigmento, a plataforma colocada por baixo das tulhas irá mover-se para que o pigmento seguinte se aproxime do trabalhador, podendo assim encher o saco

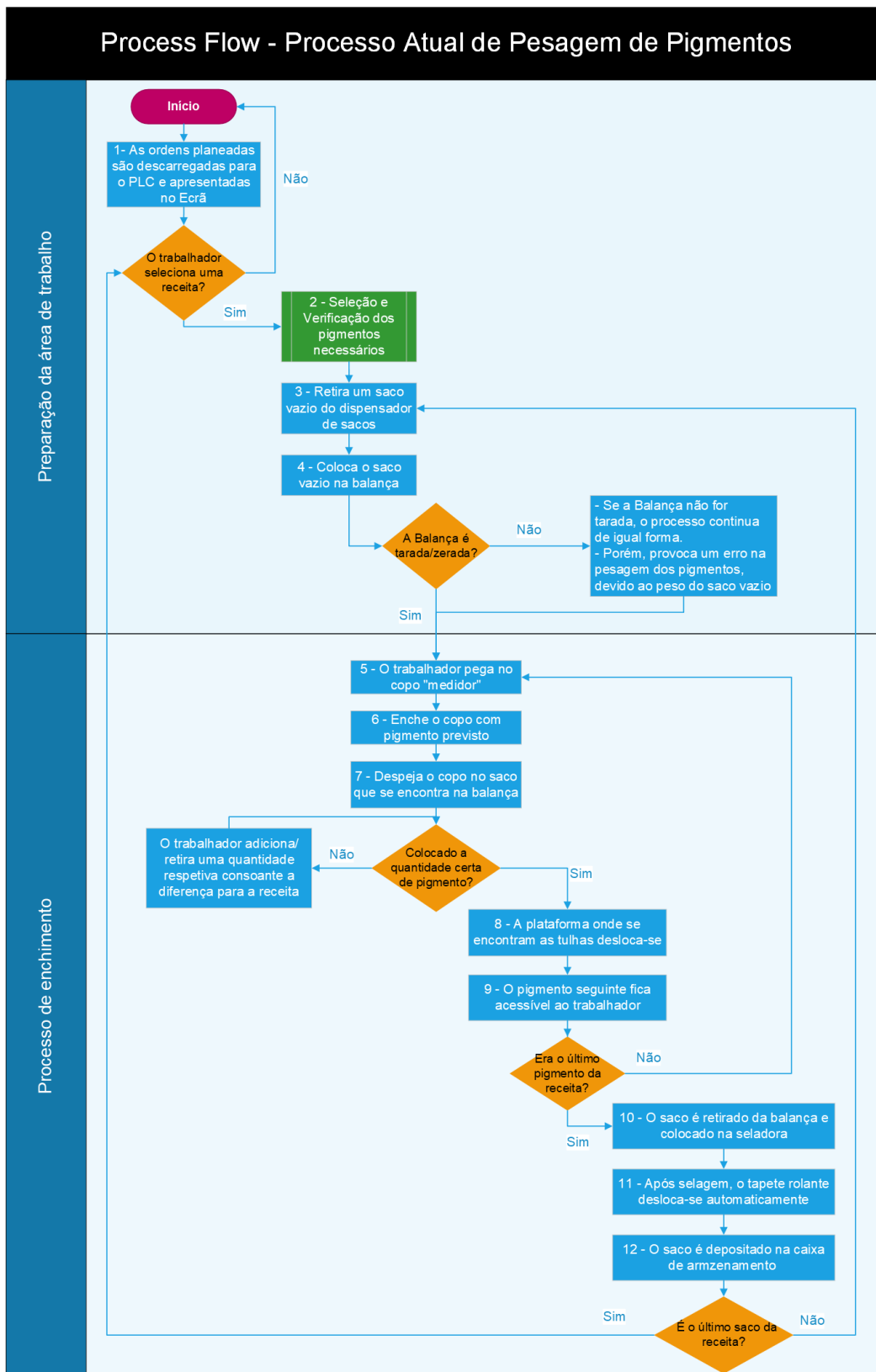


Figura 3.13: Diagrama do Processo Atual

com o respetivo pigmento (Etapa 8 e 9 da Figura 3.13). Dependendo de cada receita, poderá ser necessário um ou mais pigmentos diferentes:



(a) Pegar Pigmento com Copo Medidor



(b) Despejar Pigmento no Saco

Figura 3.15: Processo de Enchimento de Saco

- se for necessário **apenas um pigmento**, o trabalhador coloca o saco cheio na seladora, e de seguida, será transportado para uma caixa de armazenamento, através de um tapete rolante, visível na Figura 3.16 (Etapa 10, 11 e 12 da Figura 3.13);
- se a receita necessitar de **mais do que um pigmento**, irá repetir-se o ciclo apresentado nas etapas 5, 6 e 7 da Figura 3.13. Após este ciclo e a conclusão da receita, o trabalhador irá proceder como já foi anteriormente referido.



(a) Saco Cheio a ser selado



(b) Saco Cheio na Caixa de Armazenamento

Figura 3.16: Últimas Etapas do Processo

Quando o trabalhador concluir o número de sacos pedidos para uma determinada receita, este irá conferir a lista de novas ordens de produção, e consoante a nova receita selecionada, irá preparar o espaço de trabalho e os pigmentos necessários para a nova receita, entrando de novo no ciclo explicado acima.

3.3.4 Estudo do Tempo de Ciclo Atual

Nesta subsecção vai ser caracterizado o processo atual, abordando, principalmente, a capacidade de produção. Assim sendo, foi realizado um estudo sobre o *throughput* atual do processo, de forma a estruturar uma base de comparação entre a solução atual e a solução proposta. Neste estudo foram obtidos dois tipos de valores:

- **Tempo de Ciclo com perdas (segundos)**

Este valor consiste na média de todas as amostras analisadas, incluindo algumas amostras discrepantes, apresentando um tempo de ciclo com perdas do processo atual de enchimento. Estas amostras discrepantes refletem o tempo gasto pelos operadores em tarefas externas ao processo, como, por exemplo, intervalos para alimentação e descanso, troca de turnos e outros afazeres.

- **Tempo de Ciclo sem perdas (segundos)**

Este valor consiste na mediana de todas as amostras analisadas, obtendo assim um valor hipotético do tempo de ciclo do processo sem perdas. Para o cálculo deste valor, foi utilizada a operação matemática **mediana**, pois existem alguns valores discrepantes em relação aos restantes, que, desta forma, são atenuados, revelando assim, um valor do tempo de ciclo hipoteticamente ideal do processo.

Nesta análise de dados, foram utilizadas cerca de 500 amostras de três receitas diferentes, com o objetivo de obter um conjunto de valores representativos do fenómeno em estudo. Cada amostra corresponde a um tempo de ciclo de enchimento de um saco, por parte do operador. Após a realização dos estudos descritos anteriormente, foram obtidos os resultados presentes na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resultado dos Testes Realizados

	Tempo de Ciclo c/perdas (Média) (seg)	Tempo de Ciclo s/perdas (Mediana) (seg)	N.º de Amostras Analisadas
Receita A (1 Pigmento)	47,6	20,1	564
Receita B (5 Pigmentos)	76,5	45,3	500
Receita C (4 Pigmentos)	103,2	54,8	524

Analisando a Tabela 3.1, é possível ver que existe uma diferença substancial entre o tempo de ciclo real atual, onde as perdas existentes estão incluídas, e o tempo de ciclo ideal, ou seja, onde foram retiradas as paragens e perdas de tempos ocorridas no processo atual. Com estes valores, foi criado um intervalo de referência para uma futura comparação com a solução proposta, de forma a ser possível comparar os processos e verificar se a solução em desenvolvimento é mais vantajosa.

Capítulo 4

Caraterização do Processo Futuro

Neste capítulo vão ser enumerados os requisitos propostos para um correto funcionamento da solução do doseamento dos pigmentos. É também apresentada uma possível arquitetura do sistema para a solução proposta e o respetivo diagrama do processo. Para além disso, são enumerados os requisitos propostos para a solução de manipulação dos sacos, e de seguida, são apresentadas as soluções analisadas de acordo com os requisitos referidos anteriormente. Por fim, as hipóteses analisadas são comparadas de forma a escolher a melhor solução para o problema apresentado.

4.1 Solução para Doseamento de Pigmentos

Relativamente ao desenvolvimento da solução, foram definidas várias etapas de trabalho, de forma a que houvesse lugar a um processo criativo estruturado e eficiente. Após a caraterização do processo utilizado atualmente, foram definidos alguns requisitos iniciais para a criação de uma base de desenvolvimento. Os requisitos iniciais propostos para a solução em desenvolvimento foram:

- solução de baixo custo e de simples instalação, utilização e manutenção;
- cumprir com todas as condições necessárias para o processo;
- ser igualmente ou mais vantajosa do que a solução atual.

4.1.1 Descrição do Conceito da Solução Proposta

A solução proposta consiste na utilização de um robô colaborativo e uma válvula doseadora, onde o robô tem o objetivo de transportar os pigmentos das tulhas até ao funil presente na válvula doseadora. Para isso, o robô terá uma ferramenta anexada à sua flange, que irá ser cheia com o pigmento desejado e, de seguida, transportada e despejada na válvula. Após o despejo, a válvula irá dosear os pigmentos consoante a quantidade requisitada pela receita existente. Com o doseamento feito, a válvula irá deslocar-se para cima das tulhas, através de uma plataforma de movimentação, para realizar o despejo dos excessos dos pigmentos utilizados.

4.1.2 Requisitos do Sistema de Pesagem de Pigmentos

Com base nos requisitos iniciais e no conceito descrito anteriormente, foram definidos requisitos específicos para cada componente do sistema, assegurando, assim, o devido funcionamento da solução proposta. De seguida serão enumerados os componentes/soluções utilizadas e os respetivos requisitos.

1. Robô Colaborativo

Para a escolha do robô, foram propostos alguns requisitos, descritos na Tabela 4.1, para que seja possível um correto funcionamento do sistema e, de igual forma, cumpra os requisitos do conceito de um robô colaborativo.

Tabela 4.1: Requisitos para o Robô Colaborativo

Nome	Requisitos	Possíveis Soluções
Alcance	O robô terá de ter alcance suficiente para chegar aos pigmentos presentes nas tulhas e transportá-los para a válvula doseadora; Alcance: Mais de 1,20 m	Universal Robots: UR20: 1,7 m UR10e: 1,3 m
<i>Payload</i> (capacidade de carga “positiva”)	O robô terá de ter um <i>payload</i> suficiente para pegar, pelo menos, na ferramenta + quantidade de pigmento a ser definida: 2 e 4 kg - ter em conta a quantidade mínima definida para cada pigmento, para o correto funcionamento da válvula; - ter em conta as quantidades necessárias de cada pigmento em todas as receitas.	Universal Robots: UR20: 20 kg UR10e: 10 kg
<i>Payload</i> (capacidade de carga “negativa”)	O robô, apesar de ter o <i>payload</i> “máximo” desejado, pode, no caso de máxima amplitude, não exercer a força necessária para enterrar a ferramenta e retirar o pigmento da tulha	Universal Robots: UR20; UR10e

Na Tabela 4.1, na coluna “Possíveis Soluções”, são apenas referidas soluções da marca *Universal Robots*, pois existe uma parceria entre a Continental e a

Universal Robots, o que facilita a realização dos testes de desempenho. Porém, existem mais opções de robôs colaborativos de diferentes marcas que preencham os requisitos referidos nesta tabela. Em relação aos testes de desempenho propostos para robô e os respectivos resultados, estão apresentados no Capítulo 5.

2. Ferramenta do Robô para Transferência de Pigmentos

A escolha da ferramenta do robô para transferência de pigmentos teve como base a necessidade de produção, ou seja, foram analisadas todas as receitas produzidas nas balanças manuais, de forma a saber qual a capacidade da ferramenta necessária, para que o sistema seja o mais eficiente possível. Desta forma, como é possível observar na Tabela 4.2, foram definidos alguns requisitos para a construção de uma ferramenta para o projeto.

Tabela 4.2: Requisitos para a Ferramenta do Robô

Nome	Requisitos	Possíveis Soluções
Quantidade Máxima Suportada	Para a realização do processo, a ferramenta do robô deverá ter uma capacidade suficiente para uma quantidade de pigmento a ser definida: 2 e 4 kg - Ter em conta a quantidade mínima definida para cada pigmento, para o correto funcionamento da válvula; - Ter em conta as quantidades necessárias de cada pigmento em todas as receitas. Nota: a capacidade atual do copo medidor utilizado no processo atual é o equivalente, em média, a 2 kg de pigmento	Ferramenta com pega horizontal Ferramenta com pega lateral
Limpeza da Ferramenta	Entre os ciclos do processo de pesagem, será necessário a limpeza da ferramenta utilizada pelo robô para transportar os pigmentos	Estação de escovagem Posição de limpeza (humano) Estação de mudança de ferramenta

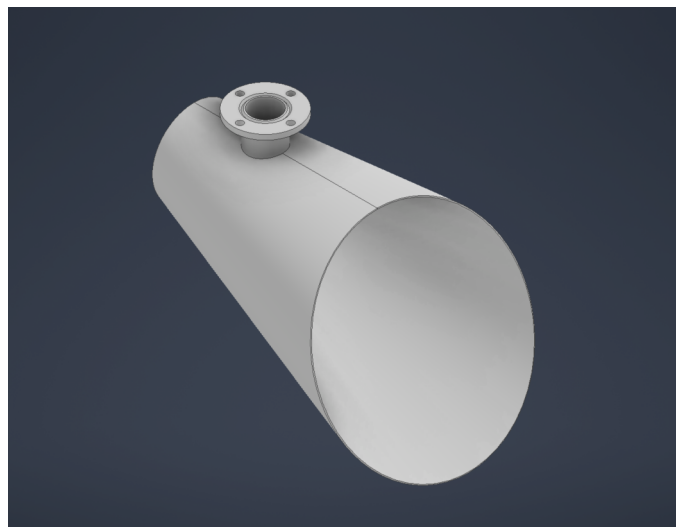
- **Testes**

Para este componente não houve muitos testes iniciais, pois foi utilizado o modelo do copo medidor utilizado atualmente no processo, apenas adaptado para o funcionamento com o robô escolhido para testes. Os testes realizados foram relacionados à capacidade necessária da ferramenta para uma máxima eficiência do sistema. Na Tabela 4.3 estão representados os dados recolhidos sobre o peso dos pigmentos por saco, dados respetivos ao mês de março (1–31/03/2023).

Tabela 4.3: Estudo da Ferramenta - Distribuição Média de Peso dos Pigmentos p/Saco

Distribuição Média de Peso dos Pigmentos p/Saco			
Intervalo de Pesos dos Pigmentos [kg]	Frequência de Pigmentos Utilizados	% de Pigmentos por Intervalo de Pesos	Soma das %
0-1	61507	30,79%	30,79%
1-2	49428	24,74%	55,53%
2-3	29736	14,89%	70,42%
3-4	26929	13,48%	83,90%
4-5	8994	4,50%	88,40%
5-6	10095	5,05%	93,45%
6-7	3840	1,92%	95,37%
7-8	481	0,24%	95,62%
8-9	3544	1,77%	97,39%
9-10	4516	2,26%	99,65%
10-11	432	0,22%	99,87%
11-12	266	0,13%	100,00%
12-13	1	0,00%	100,00%
Total		100,00%	

Observando os dados presentes na Tabela 4.3, é possível verificar que cerca de 80% dos pigmentos utilizados estão no intervalo de peso de 0 a 4 kg, sendo a capacidade da ferramenta atual de 2 kg. Para além da capacidade, outro tópico testado foi o *design* da ferramenta, mais propriamente o tipo de pega exigido para conectar a ferramenta ao braço robótico. As opções eram: pega lateral ou pega horizontal. Após a realização de uma simulação através do *software* RoboDk [29], concluiu-se que, por motivos de espaço ocupado e flexibilidade necessária por parte do robô, a ferramenta com pega lateral seria a opção acertada, estando visível na Figura 4.1.

Figura 4.1: *Design* da Ferramenta com Pega Lateral para o Robô

3. Válvula Medidora

Com o objetivo de encontrar um componente que realizasse o doseamento correto dos pigmentos utilizados nas receitas, foi definida uma lista de requisitos para que a escolha deste componente fosse o mais precisa possível. Os requisitos definidos estão presentes na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Requisitos para a Válvula Doseadora

Nome	Requisitos	Possíveis Soluções
Precisão de doseamento (Quantidades Médias)	Para a existência de uma pesagem automática, será necessária uma válvula que doseie as quantidades de pigmento depositadas pelo robô, da forma correta, como está registado nas respetivas receitas	CO.RA - Double Valve
Precisão de doseamento (Quantidades Reduzidas)	Por motivos de pesagem de quantidades muito reduzidas de pigmentos (na ordem das gramas), será necessária uma válvula que seja capaz de dosear essas quantidades. Foi definido um valor para a margem de erro para a dosagem dos pigmentos (20 g de precisão)	CO.RA - Double Valve
Descarga Total (Excessos)	Para os casos em que o robô deposite quantidade em excesso, será necessária uma válvula que permita uma descarga rápida da quantidade restante, para que seja possível prosseguir a receita	CO.RA - Double Valve
Pigmentos com diferentes texturas	Capacidade da válvula trabalhar com pigmentos de diferentes texturas	CO.RA - Double Valve
PLC de Controlo da Válvula	A válvula necessita de um PLC de controlo. A empresa fabricante da válvula, CO.RA, disponibiliza todo o <i>hardware</i> necessário para a programação e funcionamento da válvula. Porém, existe a possibilidade da utilização dos PLC já existentes na fábrica, mas havendo dúvidas do devido funcionamento da válvula	PLC do fabricante PLC existente na fábrica
Limpeza da Válvula	Entre os ciclos do processo de doseamento, será necessário a limpeza da válvula, de forma a evitar pigmentos acumulados	Posição de limpeza (humano)
Movimentação da Válvula (Translação)	A válvula terá de conseguir mover-se entre as duas posições requeridas: - Posição de Enchimento: A válvula irá encher os sacos, com a quantidade de pigmentos necessária - Posição de Descarga Total: A válvula irá despejar os excessos de pigmento, novamente nas tulas de origem	Plataforma de Movimento de Translação
Tipo / Comprimento das Guias para a Movimentação da Válvula	As guias utilizadas para o deslocamento da válvula, para as posições de Enchimento e de Descarga Total não poderão passar para o lado das tulas, principalmente no momento de enchimento, para não obstruir o movimento do robô de transporte dos pigmentos	Guias Telescópicas
Valor de Referência da Quantidade Presente na Ferramenta do Robô	De forma a estimar a quantidade de pigmento presente na ferramenta do robô, após o seu enchimento, seria necessário a utilização do sensor de carga instalado no braço do robô	Sensor de Força/Binário do Robô

Com o intuito de comprovar as soluções propostas para os requisitos acima listados, foram definidos alguns testes, tendo em conta as necessidades atuais do processo. Como é possível ver no documento presente no Apêndice A, foram

realizados testes com seis tipos de pigmentos, de diferentes texturas, para que os testes fossem o mais abrangentes e precisos possíveis. Para o requisito de doseamento dos pigmentos, foi definido um valor para a margem de erro da dosagem: **20 g de precisão**.

No documento presente no Anexo A, é possível observar que a válvula cumpriu o requisito da margem de erro para os seis tipos de pigmentos, sendo que, para isso, há diferenças no tempo de doseamento, no ângulo de abertura, entre outros parâmetros configuráveis.

4.1.3 Mapeamento do Processo da Solução Proposta

Nas Figuras 4.2 e 4.3 está presente um diagrama onde está descrito o possível fluxo do processo para a solução futura. Nesta solução está apenas considerada a solução de doseamento dos pigmentos, sendo que a manipulação dos sacos seria efetuada pelo operador.

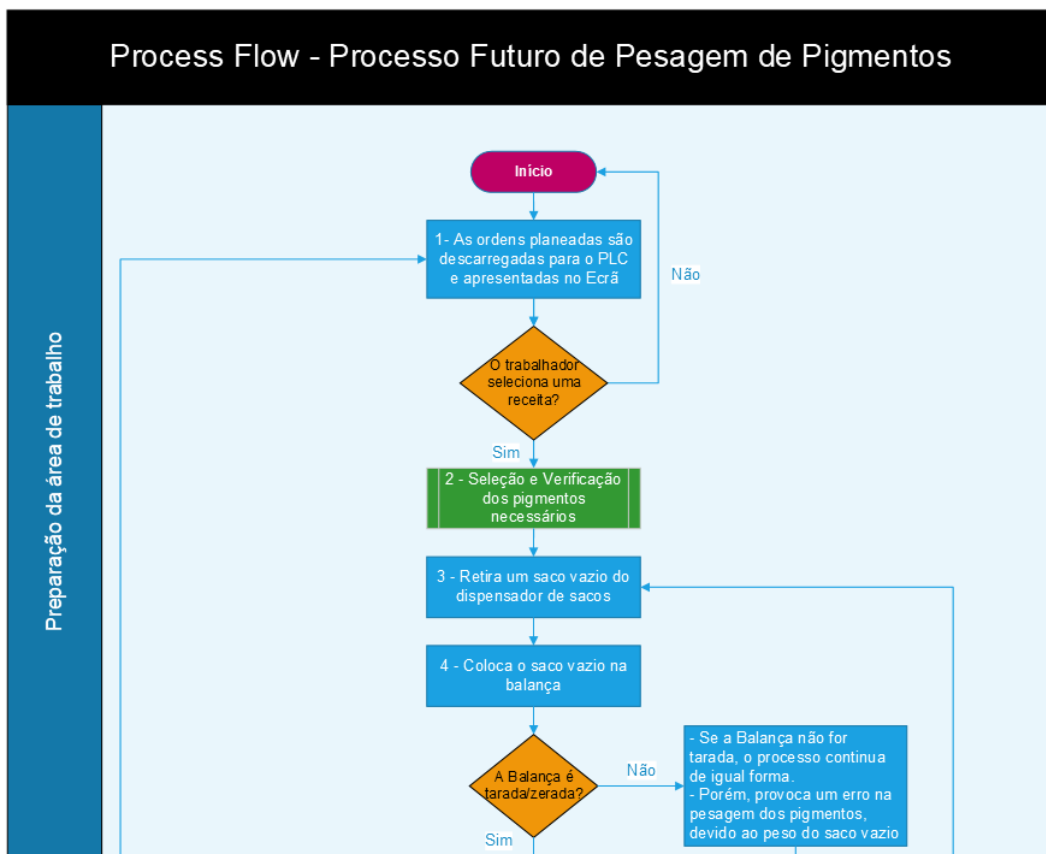


Figura 4.2: Diagrama do Processo Futuro - Parte 1

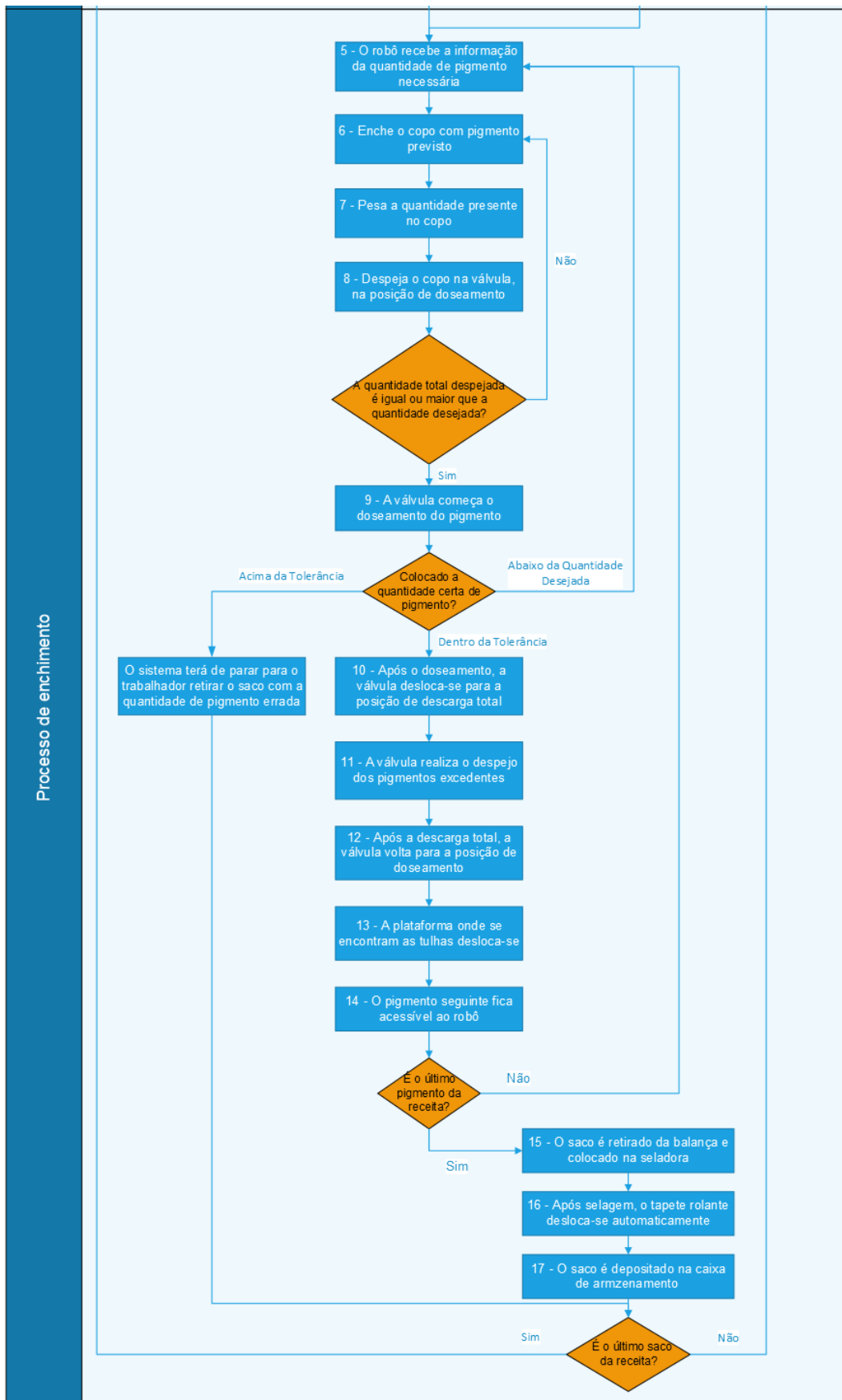


Figura 4.3: Diagrama do Processo Futuro - Parte 2

A diferença do diagrama presente nas Figuras 4.2 e 4.3 para o diagrama do processo atual (Figura 3.13) é na etapa do processo de enchimento. Neste processo, após o operador selecionar uma receita e a área de trabalho estar preparada para o enchimento, o robô irá receber a informação da quantidade de pigmento necessário e irá realizar o respetivo enchimento da válvula. Com a quantidade necessária transportada, a válvula irá dosear o pigmento para o saco preparado, e consoante a quantidade doseada, o sistema irá progredir, ou não, no processo de enchimento. Após o doseamento, a válvula irá mover-se para a cima da respetiva tulha e irá efetuar a descarga total do pigmento em excesso. A partir deste ponto, o processo futuro mantém-se igual ao processo atual, havendo a manipulação do saco pronto e a preparação do saco seguinte.

4.1.4 Arquitetura do Sistema da Solução Proposta

Da mesma forma do mapeamento feito na Subsecção 4.1.3, foi idealizada uma possível arquitetura do sistema da solução futura, incorporando todos os equipamentos necessários numa rede de comunicação, interligados pelo protocolo *FieldBus*. Na Figura 4.4 pode observar-se alguns equipamentos já existentes no processo atual, como a plataforma das tulhas, o leitor RFID e a balança. Em adição à arquitetura atual, foi adicionado o robô colaborativo UR10 e o respetivo controlador, a válvula doseadora e um PLC orientado ao respetivo controlo. Por fim, estes equipamentos estão interligados ao PLC já existente atualmente, porém, irá existir uma reestruturação da comunicação entre os respetivos equipamentos.

4.2 Solução para a Manipulação dos Sacos

Nesta secção são apresentadas as várias soluções encontradas para a manipulação dos sacos, respeitando os requisitos primeiramente definidos. Os conceitos vão ser descritos sucintamente e vão ser evidenciadas as suas principais vantagens e desvantagens. Por fim, vão ser apresentados os custos de cada alternativa, auxiliando na sua futura escolha ou exclusão.

4.2.1 Requisitos da Solução para a Manipulação dos Sacos

Nesta subsecção são elencados os requisitos estabelecidos para o correto funcionamento da solução e apresentadas as soluções encontradas para preencher os respetivos requisitos. Na Tabela 4.5 podem ser observados os requisitos referidos anteriormente.

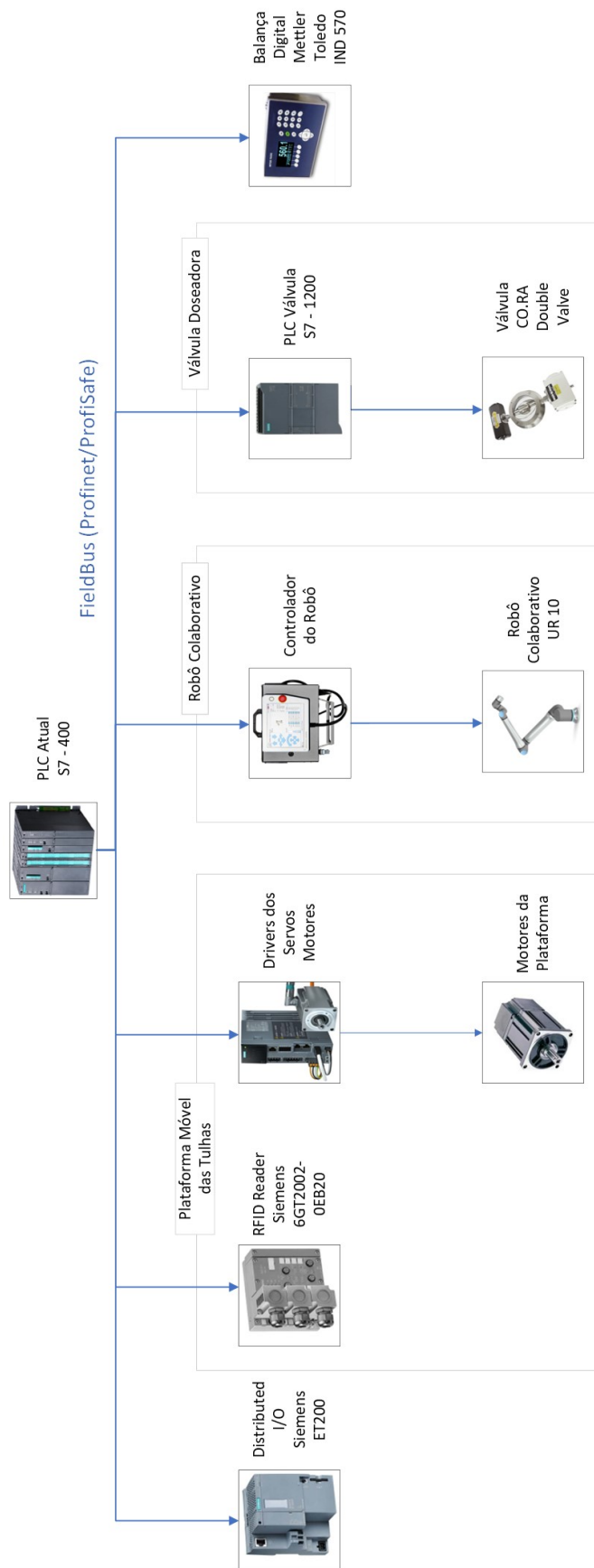


Figura 4.4: Diagrama da Arquitetura do Sistema Proposto

Tabela 4.5: Requisitos para a Solução para a Manipulação dos Sacos

Nome	Requisitos	Possíveis Soluções
Abertura do Saco	Para automatizar totalmente o espaço de trabalho, será necessária uma ferramenta que consiga abrir os sacos de plástico utilizados para a pesagem dos pigmentos	Solução com ventosas a vácuo
Segurar o Saco	Durante o enchimento dos sacos, será necessária uma solução que segure no saco aberto para que o pigmento caia corretamente no saco	Solução com ventosas a vácuo
Selagem do Saco	Após o enchimento, será necessário incorporar uma solução que sele o saco corretamente, de uma forma autônoma	Sistema com uma barra de selagem horizontal
Cortar o Saco do Rolo Disponibilizado	Conforme o processo atual, os sacos utilizados são disponibilizados em rolos, sendo necessário o trabalhador rasgar cada saco do rolo. Seguindo o mesmo método, será necessária uma solução para rasgar o saco do rolo, de uma de forma autônoma	Não foram encontradas soluções para este requisito
Produção em Paralelo do Saco	Uma solução possível para o problema de abertura de sacos será fazer o saco no momento.	Solução da máquina ensacadora vertical
Pesagem do Saco (Verificação)	Após o enchimento e selagem do saco, será necessária uma secção onde o saco seja pesado para verificar se o peso medido é o correto	<i>Conveyor</i> + Balança

4.2.2 Apresentação dos Conceitos das Soluções Propostas

Com base nos requisitos referidos e nas tecnologias descritas no Capítulo 2, foram pensados alguns conceitos para a resolução do problema apresentado. Esses conceitos são descritos, enumerando as suas vantagens e desvantagens, e vão ser comparados entre eles, para a escolha final do conceito.

1. Ventosas de Vácuo

- **Descrição do Conceito**

Este conceito baseia-se na utilização de ventosas de vácuo como *grippers* para a manipulação dos sacos de plástico utilizados no processo atual, que serão aplicados num robô ou numa estrutura auxiliar que, neste caso específico, será um robô colaborativo. Independentemente do tipo de instalação, as ventosas irão pegar no saco disponibilizado e colocá-lo num suporte, debaixo da válvula doseadora. Após o doseamento, o saco seguirá preso numas guias, de forma a ser realizada uma selagem térmica e largado num *conveyor*, que acabará por transportá-lo para a caixa de armazenamento. O sistema de dosagem está representado na Figura 4.5.

- **Vantagens e Desvantagens**

Este conceito tem como principal vantagem uma **estrutura simples e compacta**, tornando a implementação e a respetiva manutenção mais acessível, e diminuindo os ajustes necessários para a sua implementação. Por outro lado, em relação aos outros conceitos, apresenta como principal

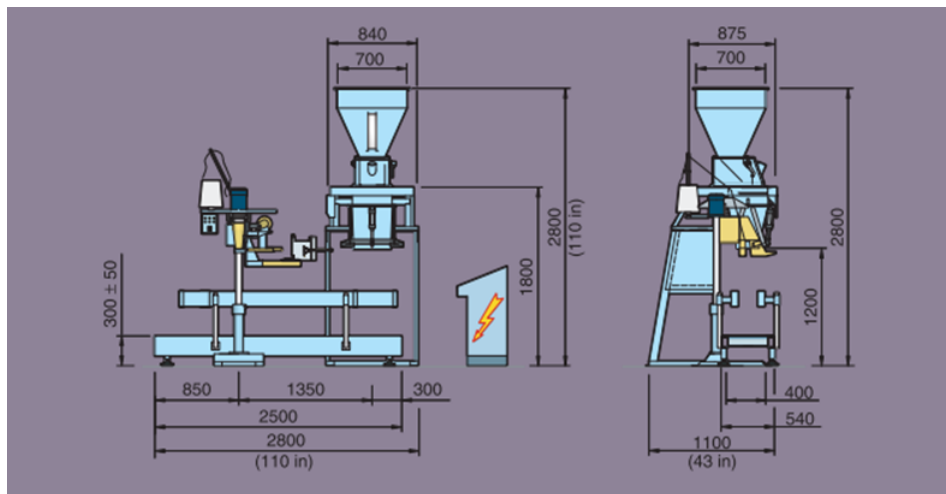


Figura 4.5: Ventosas de Vácuo - Representação 2D

desvantagem uma **maior exposição a fatores externos**. Esta exposição pode interferir diretamente com a tecnologia utilizada, isto é, com a aderência das ventosas, aumentando a probabilidade de problemas com a manipulação dos sacos.

Tabela 4.6: Vantagens e Desvantagens do Conceito das Ventosas de Vácuo

Vantagens	Desvantagens
Estrutura simples e compacta	Maior exposição a fatores externos
Sistema flexível e adaptável	Probabilidade aumentada de problemas por má manipulação do saco

2. Máquina Ensacadora Vertical

• Descrição do Conceito

Como foi referido no Capítulo 2, este conceito consiste numa máquina que irá produzir o saco em paralelo com o doseamento dos pigmentos requeridos, como é visível na Figura 4.6.

O material escolhido para a produção do saco será colocado, em rolo, na máquina, e através de um sistema de roldanas, será esticado devidamente posicionado. Após chegar a essa posição, o material irá começar a ganhar a forma de um saco, ao envolver-se num cone de moldagem e ser soldado vertical e horizontalmente. Com o saco fechado na base, o robô vai transportar o pigmento selecionado para a válvula, para ser doseado na quantidade definida para o saco. Realizado o doseamento, o saco será cortado e selado horizontalmente na parte do superior, e, por fim, será transportado através de um *conveyor* para uma caixa de armazenamento.

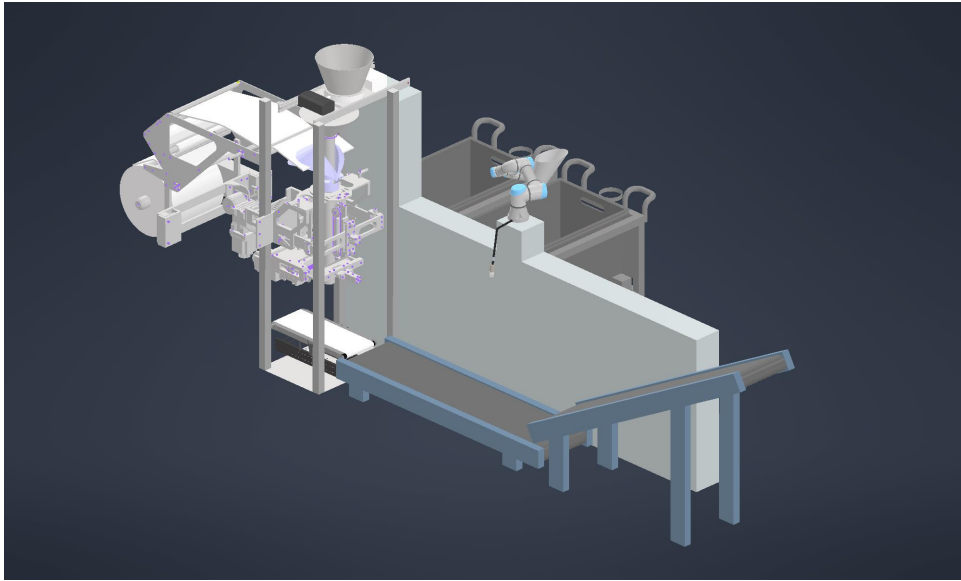


Figura 4.6: Máquina Ensacadora Vertical - Representação 3D

- **Vantagens e Desvantagens**

A principal vantagem deste conceito é a **redução de tempo de ciclo do processo**, pois a formação do saco necessário acontece em paralelo com o doseamento do pigmento requerido para a receita. Para isso ser possível, a máquina terá uma estrutura específica para que ambas as ações ocorram em paralelo sem problemas. No entanto, a existência dessa estrutura acarreta a principal desvantagem neste conceito: a **altura de doseamento do pigmento**. Normalmente, a utilização deste tipo de máquina obriga à existência de uma estrutura adicional para o abastecimento do respetivo material, diretamente para a máquina. No caso deste projeto, essa estrutura adicional não irá existir, obrigando à manipulação dos pigmentos até ao topo da máquina, através de um robô colaborativo. Este tipo de máquina tem, normalmente, entre os 2-3 metros de altura, aumentando drasticamente o alcance requerido para um robô que consiga exercer este movimento necessário. Para além destas, existem mais vantagens e desvantagens sobre este conceito, que estão enumeradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Vantagens e Desvantagens do Conceito da Máquina Ensacadora Vertical

Vantagens	Desvantagens
Estrutura compacta	Estrutura com altura elevada
Redução do tempo de ciclo	Altura elevada do despejo do pigmento
Probabilidade reduzida de problemas por má manipulação do saco	Dificuldade para realizar a limpeza e a manutenção da máquina

3. Carrossel de Contentores

- **Descrição do Conceito**

Este conceito consiste num sistema de produção, transporte e manipulação dos sacos utilizados no processo de enchimento. Esta solução incorpora um módulo de carregamento e um de descarga do saco e um sistema de guias para o transporte dos contentores utilizados. Por motivo de atraso na entrega de documentos de entidades externas, não foi possível apresentar uma representação gráfica do *layout* ou dos equipamentos para este conceito.

O módulo de carregamento irá utilizar o material fornecido por um rolo colocado no início do ciclo, para produzir os sacos necessários a este processo. Após a produção dos sacos, estes serão colocados num contentor com auxílio de um par de garras especificamente desenhado para fixar o saco no contentor e um sistema de vácuo para aspirar o saco para o interior do contentor. Os contentores estão colocados num sistema de guias, por onde são transportados para o local de enchimento e, de seguida, para o local de descarga. Na posição de enchimento, o contentor vai parar debaixo da válvula doseadora e esperar pelo doseamento do pigmento requerido. Com o doseamento concluído, o contentor é transportado para o módulo de descarga, onde o saco é retirado do contentor, selado e colocado numa caixa de armazenamento. Após a descarga, o contentor volta para o módulo de carregamento, fechando assim o ciclo do processo desta solução.

- **Vantagens e Desvantagens**

No que se refere as vantagens e desvantagens, a principal vantagem dessa solução é a **altura de despejo reduzida**, que facilita o transporte dos pigmentos para a válvula e a dosagem correspondente. Essa característica positiva acarreta a principal desvantagem: as **dimensões amplas**, neste caso, o espaço ocupado no chão da fábrica. Em relação às outras soluções, a altura da estrutura que é evitada transforma-se em espaço ocupado horizontalmente, o que pode exigir a alteração da disposição da área de trabalho existente atualmente. As demais vantagens e desvantagens estão presentes na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Vantagens e Desvantagens do Conceito do Carrossel de Contentores

Vantagens	Desvantagens
Baixa altura de despejo	Estrutura com dimensões amplas
Probabilidade reduzida de problemas por má manipulação do saco	Possibilidade de existência de problemas de logística

4.2.3 Estimativa de Custos das Soluções

Por fim, foram estimados os custos de cada conceito, para que haja mais um critério de comparação entre os mesmos. Para os custos foram considerados os seguintes componentes/sistemas:

- robôs;
- válvula;
- sistema de manipulação de sacos (cada conceito).

Os respectivos custos associados a cada conceito estão apresentados nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11. Estes custos são baseados em valores discutidos com empresas fornecedoras dos serviços em questão, e são valores que podem sofrer ajustes, com a evolução do projeto.

Tabela 4.9: Comparação dos Custos dos Conceitos - Conceito 1

Conceito 1	
Componente/Sistema	Preço (€)
Robô (Pigmentos)	35 000,00
Robô (Sacos) + Ventosas de Vácuo	40 000,00
Válvula	32 730,00
Sistema de Manipulação dos Sacos	200 000,00
Total	307 730,00

Tabela 4.10: Comparação dos Custos dos Conceitos - Conceito 2

Conceito 2	
Componente/Sistema	Preço (€)
Robô	35 000,00
Válvula	32 730,00
Máquina Ensacadora Vertical	350 000,00
Total	417 730,00

Com os valores registados nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, foi possível realizar algumas conclusões auxiliares para a escolha do conceito mais apropriado. Apesar das suas vantagens agregadas, o conceito 2 possui uma desvantagem profunda: a altura. Para além disso, o custo desta solução é o mais caro da lista, tornando todo o sistema inviável. Os restantes conceitos encontram-se no mesmo intervalo de preço, e os prós e contras listados não apresentam nenhuma característica atípica que faça que o respetivo conceito seja excluído. Deste modo, poderá ser necessário a realização de testes extras para ajudar na escolha dos conceitos.

Tabela 4.11: Comparação dos Custos dos Conceitos - Conceito 3

Conceito 3	
Componente/Sistema	Preço (€)
Robô	35 000,00
Válvula	32 730,00
Carrossel de Contentores	320 000,00
Total	387 730,00

Capítulo 5

Validação Experimental do Sistema de Doseamento de Pigmentos

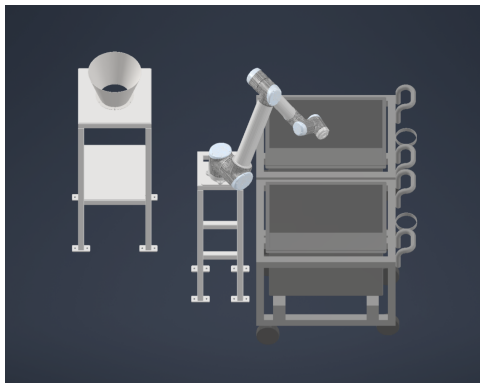
Neste capítulo vai ser descrita e explicada toda a implementação dos componentes que serão utilizados, numa fase inicial, para testes, e possivelmente, numa fase futura, para a implementação final do conceito estudado e desenvolvido nesta tese. De seguida, são propostos e realizados alguns testes de desempenho, com o objetivo de avaliar o conceito do projeto e a capacidade de alguns componentes escolhidos, citados nos capítulos anteriores. Por fim, são apresentados os respetivos resultados e conclusões dos testes propostos, realizando algumas comparações entre os valores do processo atual e os obtidos na simulação do processo futuro.

5.1 *Setup* Experimental

Com objetivo de testar o funcionamento do robô perante as condições requeridas, foram realizados vários testes, avaliando alguns requisitos definidos anteriormente. Para a realização destes testes, foi montada uma estação onde foi simulada a estação atual existente na fábrica, estando montada num local reservado para a realização da avaliação experimental.

5.1.1 Esquema de Montagem do Robô Colaborativo

Como foi referido anteriormente, a montagem da estação de testes foi realizada tendo em conta as dimensões e as distâncias existentes atualmente. Após serem registadas essas medições, foi simulada a disposição dos componentes para os testes, como é possível observar na Figura 5.1a.



(a) Simulação da Estação de Testes



(b) Disposição dos Componentes de Testes

Figura 5.1: Montagem da Estação de Testes

A semelhança existente na estação de testes, para com a estação atual, tem como finalidade aumentar a representatividade dos resultados, para estes sejam comparáveis com os testes realizados no processo atual. Durante as experiências, foi testada a melhor trajetória para o enchimento, incluindo as posições de enchimento (Figura 5.2) e despejo (Figura 5.3a) dos pigmentos. Para além destas posições, foi definida uma posição de pesagem, para uma funcionalidade que será referida na Subsecção 5.2.2, como é possível ver na Figura 5.3b.



Figura 5.2: Posição de Enchimento



(a) Posição de Despejo



(b) Posição de Pesagem

Figura 5.3: Trajetória do Robô - Posições Definidas

5.1.2 Programação do Robô

Para programar o robô, foram utilizadas algumas funções específicas da marca Universal Robots, podendo, porém, haver funções similares em outras marcas de robôs colaborativos. Essas funções vão ser explicadas mais pormenorizadamente no Anexo B, de forma a ser mais perceptível e acessível, a programação realizada ao robô. As funções utilizadas para a programação do robô foram:

1. Instalação / Configuração

- TCP;
- Carga Útil,

2. Movimento

- *Move J/L/P + Pontos de Rota*;
- Função “Direção até contacto”;
- Função “Força”;
- Função “get_actual_tcp_pose()”.

3. Pesagem

- Função “zero_ftsensor()”;
- Função “get_tcp_force()”;
- Função “force()”.

5.1.3 Programação do Algoritmo de Enchimento

Para o correto funcionamento do robô e do algoritmo do processo de enchimento, foi idealizado um modo de enchimento para o ponto mais baixo da tulha. Com este algoritmo, o processo de enchimento fica dividido em três partes: acima do nível de segurança da tulha, entre o nível de segurança e o nível do fundo da tulha e abaixo do nível do fundo da tulha, como é possível ver na Figura 5.4.

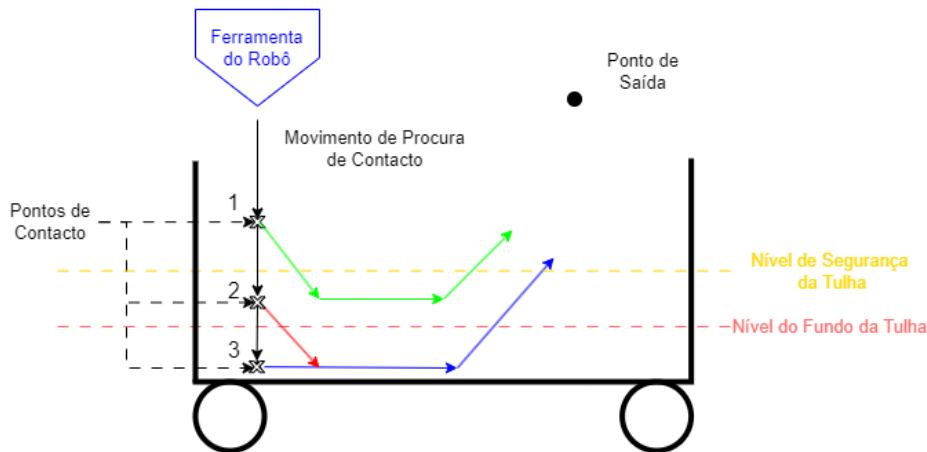


Figura 5.4: Diagrama do Movimento de Procura de Pigmento

Na Figura 5.4 é possível visualizar o movimento realizado pelo robô no processo de enchimento da ferramenta. Como foi dito anteriormente, o movimento está dividido em três partes. Em primeiro lugar, o robô, a partir de uma posição definida, irá descer em linha reta para dentro da tulha. Este movimento irá acontecer até existir contacto da ferramenta do robô com algum objeto: neste caso, será com o pigmento ou com o fundo da tulha. Para este movimento, é utilizada a função “**Direção até... contacto**”, que foi explicada na subsecção anterior. Após obter contacto com um objeto, o robô irá correr a função “**get_actual_tcp_pose()**”, que regista os valores das coordenadas do TCP da ferramenta naquele instante, e guarda numa variável. Depois, utilizando essa variável, o valor da coordenada do eixo Z é comparada com dois valores definidos manualmente, com base na profundidade da tulha, identificada na Figura 5.4 como “**nível de segurança da tulha**” e “**nível do fundo da tulha**”. Após essa comparação, o robô pode realizar três movimentos:

- caso o contacto tenha ocorrido **acima do nível de segurança da tulha**, o robô irá realizar um movimento descendente, utilizando a função “Força”, seguido de um movimento paralelo à base da tulha, acabando com um movimento ascendente até um ponto de saída definido, fora da tulha. Este movimento está representado com as setas de cor **verde**;

- caso o contacto tenha ocorrido entre o **nível de segurança da tulha** e o **nível do fundo da tulha**, o robô irá realizar um movimento descendente, utilizando a função “Força”, seguido de um movimento paralelo à base da tulha, acabando com um movimento ascendente até um ponto de saída definido, fora da tulha. O movimento descendente inicial difere da lógica anterior ao ser um movimento com uma força menor, evitando um impacto maior com o fundo da tulha. Este movimento está representado com as setas de cor **vermelho** e **azul**;
- caso o contacto tenha ocorrido **abaixo do nível do fundo da tulha**, o robô irá realizar apenas um movimento paralelo à base da tulha, seguido de um movimento ascendente até um ponto de saída definido, fora da tulha. Este movimento está representado com as setas de cor **azul**.

5.2 Testes e Resultados

Nesta secção são propostos e realizados testes de desempenho e, de seguida, apresentados os respetivos resultados, de forma a avaliar o conceito do projeto e a capacidade de alguns componentes escolhidos, citados nos capítulos anteriores. Para cada teste proposto são descritos quais os procedimentos utilizados na sua realização e os respetivos objetivos desejados. Os testes propostos estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Testes Propostos para a Implementação do Robô


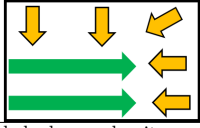
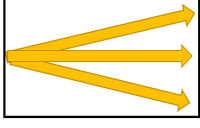
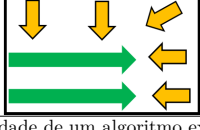
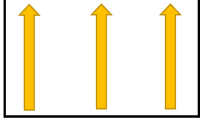

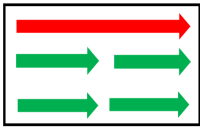
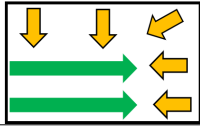
Nome	Descrição	Objetivo
Enchimento do Copo	Realizar várias vezes o enchimento da ferramenta, com movimentos diferentes. Para além disso, realizar o enchimento com pigmentos diferentes	Ficar familiarizado com os graus de liberdade e com o espaço de trabalho do robô, de forma a descobrir o melhor movimento e/ou combinação de movimentos para encher a ferramenta com pigmento
Algoritmo de Esvaziamento da Tulha	Após o conhecimento dos movimentos possíveis para o enchimento da ferramenta, realizar vários algoritmos diferentes para tentar esvaziar uma tulha de pigmentos. Este teste vai ser efetuado para um pigmento de cada um destes tipos: pó e granulado	Verificar a disposição do pigmento nas tulas, após vários enchimentos, de forma a encontrar a melhor combinação de movimentos para um correto funcionamento do robô
Pesagem do Pigmento pela Ferramenta do Robô	Após o enchimento da ferramenta, é realizada uma pesagem do pigmento transferido, através do sensor de força existente no robô. De seguida, após o despejo, o saco utilizado vai ser pesado numa balança. Este ciclo de pesagem vai ser efetuado 10 vezes para um pigmento de cada um destes tipos: pó e granulado	Os valores destas pesagens vão ser registadas para serem comparadas, de forma a verificar a precisão / exatidão do sensor de força
Tempo de Ciclo Parcial (Viagem do Robô)	Registar o tempo de ciclo do processo de enchimento do robô, realizando 10 repetições para cada variante do processo: pó e granulado	Obter valores para o possível tempo de ciclo para a solução proposta, de forma a comparar com os tempos registados para o processo atual

Para os testes descritos na Tabela 5.1, foi utilizado um pigmento de cada um destes tipos, pó e granulado, por serem totalmente opostos em termos de textura, aumentando a representatividade dos testes e tornando o estudo mais completo.

5.2.1 Algoritmos de Esvaziamento da Tulha

Nesta subsecção são testados alguns algoritmos diferentes para o esvaziamento completo (ou aproximado) de uma tulha com pigmento, utilizada no processo atual. Os algoritmos testados estão presentes na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Algoritmos de Esvaziamento da Tulha

Algoritmo	Tulha - Layout	Estado	Descrição / Notas	Possível Solução Atual
1		OK	- Lado esquerdo da tulha de impossível acesso	Possibilidade de um algoritmo extra para alisamento do pigmento, de X em X ciclos 
2		NOK	- Lado esquerdo da tulha de impossível acesso - Melhor aproveitamento do lado direito	Possibilidade de um algoritmo extra para alisamento do pigmento, de X em X ciclos 
3		NOK	- O robô não tem liberdade suficiente para realizar este movimento	Possibilidade de um algoritmo extra para alisamento do pigmento, de X em X ciclos 
4		OK	- Lado esquerdo da tulha de impossível acesso - Algoritmo 1, utilizado no último loop, quando a tulha fica vazia	Possibilidade de um algoritmo extra para alisamento do pigmento, de X em X ciclos 

Em relação aos dados apresentados na Tabela 5.2, é perceptível uma evolução dos vários algoritmos testados, começando por um algoritmo simples, que apesar de não ter a maior abrangência, seria uma boa opção, sendo complementado com um algoritmo extra de alisamento. Porém, procurou-se uma alternativa melhor para o enchimento, de forma a evitar o algoritmo extra de alisamento, mas as alternativas testadas (Linhas 2 e 3 da Tabela 5.2) não tiveram sucesso. Após as tentativas falhadas, optou-se por otimizar o algoritmo inicial, para que tivesse maior aproveitamento do que a primeira versão. Esta melhoria é visível na linha 4 da Tabela 5.2.

5.2.2 Pesagem do Pigmento pela Ferramenta do Robô

Neste teste, foram procurados vários métodos de pesagem do pigmento transportado pela ferramenta, após o seu enchimento. Para isso, este teste foi dividido

em três partes: pesagem de pesos calibrados, método de pesagem e pesagem de pigmentos.

1. Pesagem de Pesos Calibrados

Para a primeira parte do teste, foram utilizados pesos calibrados de 0,5 kg, 1 kg e 2 kg, para testar o código de aquisição de dados e a precisão do sensor de força do robô. Foram realizadas 10 pesagens com cada um dos pesos, tendo sido registados os valores presentes nas Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5.

Tabela 5.3: Teste de Pesagem - Peso Calibrado 0,5 kg

Peso Calibrado (kg): 0,5 kg			
Nº Tentativa	Pesagem - Ferramenta (kg)	Pesagem - Balança (kg)	Diferença (kg)
1	0,576	0,500	0,076
2	0,520	0,500	0,020
3	0,592	0,500	0,092
4	0,580	0,500	0,080
5	0,568	0,500	0,068
6	0,596	0,500	0,096
7	0,583	0,500	0,083
8	0,563	0,500	0,063
9	0,558	0,500	0,058
10	0,532	0,500	0,032
Média			0,067

Tabela 5.4: Teste de Pesagem - Peso Calibrado 1 kg

Peso Calibrado (kg): 1 kg			
Nº Tentativa	Pesagem - Ferramenta (kg)	Pesagem - Balança (kg)	Diferença (kg)
1	1,229	1,000	0,229
2	1,105	1,000	0,105
3	1,224	1,000	0,224
4	1,174	1,000	0,174
5	1,084	1,000	0,084
6	1,293	1,000	0,293
7	1,262	1,000	0,262
8	1,219	1,000	0,219
9	1,176	1,000	0,176
10	1,228	1,000	0,228
Média			0,199

Tabela 5.5: Teste de Pesagem - Peso Calibrado 2 kg

Peso Calibrado (kg): 2 kg			
Nº Tentativa	Pesagem - Ferramenta (kg)	Pesagem - Balança (kg)	Diferença (kg)
1	2,349	2,000	0,349
2	2,264	2,000	0,264
3	2,379	2,000	0,379
4	2,368	2,000	0,368
5	2,387	2,000	0,387
6	2,280	2,000	0,280
7	2,362	2,000	0,362
8	2,284	2,000	0,284
9	2,393	2,000	0,393
10	2,298	2,000	0,298
Média			0,336

2. Método de Pesagem - Trajetória

Durante a procura do melhor método de pesagem, surgiu um problema em relação à trajetória escolhida para a pesagem do pigmento transportado pelo robô. Por outras palavras, o método escolhido inicialmente para realizar a medição, seguia as seguintes etapas nesta ordem específica: zerar → encher → pesar → despejar, como é possível ver na Figura 5.5.

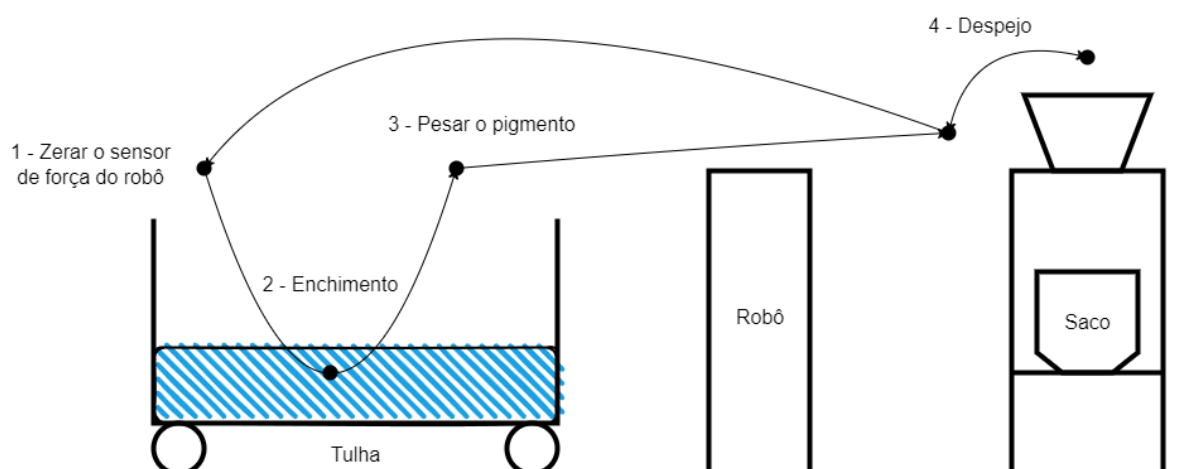


Figura 5.5: Método de Pesagem 1

Após a realização de testes utilizando este método, obtiveram-se resultados inconsistentes com a realidade. Uma possível razão para este fenómeno foi a exposição do sensor de força a múltiplas forças durante o enchimento da ferramenta, que pode ter interferido nos valores registados pelo sensor, como é possível observar na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Método de Pesagem 1

Método de Pesagem 1			
Nº Tentativa	Pesagem - Ferramenta (kg)	Pesagem - Balança (kg)	Diferença (Valor Absoluto) (kg)
1	2,232	1,667	0,565
2	2,218	1,343	0,875
3	1,543	1,957	0,414
4	1,491	1,716	0,225
5	0,943	1,959	1,016
6	1,698	1,876	0,178
7	1,515	1,380	0,135
8	1,488	1,657	0,169
9	0,894	1,306	0,412
10	2,024	1,217	0,807
Média			0,480

Sendo o intervalo de valores de 0,800 kg até 2,200 kg, à primeira vista, os valores apresentados na Tabela 5.6 parecem aceitáveis. No entanto, não condizem com a realidade, pois existem valores elevados obtidos pela ferramenta, mas que, na realidade, deviam ser valores baixos e vice-versa, como é perceptível na coluna “Diferença (Valor Absoluto) (kg)” da Tabela 5.6. Ao enfrentar este problema, foi procurada uma solução alternativa para realizar a pesagem, tendo sido encontrado um segundo método, que consiste na utilização do processo inverso do primeiro método: encher → zerar → despejar → pesar, perceptível na Figura 5.6. A grande diferença neste método é que o valor obtido pelo sensor de força é negativo, sendo apenas necessário utilizar uma função presente no *software* do robô, que retorna o valor absoluto da força. Este método, apesar de contra intuitivo, revelou-se muito eficaz, como comprovam os valores apresentados na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8.

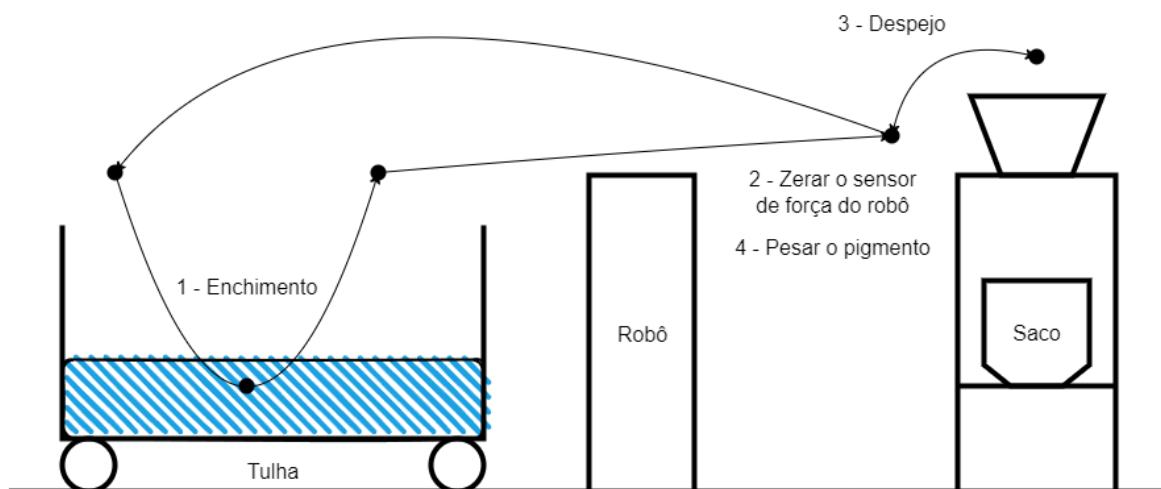


Figura 5.6: Método de Pesagem 2

3. Pesagem do Pigmento

Após a testagem do código para a aquisição dos dados, houve a necessidade de adaptar a primeira e a segunda parte do teste ao ambiente desejado, ou seja, à pesagem dos pigmentos transportados pelo robô. Nesta etapa final do teste, o código foi ajustado ao movimento executado pelo robô, de modo a encontrar uma posição correta para a pesagem do pigmento transportado. Neste teste, foram realizadas 10 repetições para cada pigmento selecionado, tendo sido registados os resultados na Tabela 5.7 e Tabela 5.8.

Tabela 5.7: Pesagem - *Sugar Powder*

Tipo de Pigmento: Sugar Powder			
Nº Tentativa	Pesagem - Ferramenta (kg)	Pesagem - Balança (kg)	Diferença (Valor Absoluto) (kg)
1	1,399	1,504	0,105
2	1,741	1,850	0,109
3	1,432	1,573	0,141
4	1,629	1,748	0,119
5	1,274	1,365	0,091
6	1,367	1,351	0,016
7	1,800	1,866	0,066
8	1,686	1,749	0,063
9	1,576	1,698	0,122
10	1,499	1,525	0,026
Média			0,086

Tabela 5.8: Pesagem - *Chocolate Chips*

Tipo de Pigmento: Chocolate Chips			
Nº Tentativa	Pesagem - Ferramenta (kg)	Pesagem - Balança (kg)	Diferença (Valor Absoluto) (kg)
1	1,332	1,506	0,174
2	1,777	1,793	0,016
3	1,796	1,796	0,000
4	1,303	1,397	0,094
5	1,658	1,694	0,036
6	1,513	1,601	0,088
7	1,247	1,284	0,037
8	1,424	1,520	0,096
9	1,768	1,848	0,080
10	1,311	1,478	0,167
Média			0,079

Observando os valores presentes na Tabela 5.7 e Tabela 5.8, verificou-se um desvio médio de 0,086 kg, para o pó, e de 0,079 kg, para o granulado, em cada pesagem realizada. Dado que o propósito desta funcionalidade é determinar a quantidade de pigmento que o robô despeja na válvula para o processo de doseamento, e tendo em conta o requisito de que, para cada quantidade de pigmento definida na receita, é necessário adicionar 0,500 kg para o correto doseamento da válvula, o valor obtido

neste teste atende aos requisitos estipulados. Para minimizar este desvio e aproximar o valor obtido pelo robô ao valor real, é possível criar uma função que corrija essa diferença, adicionando o desvio ao valor obtido pelo sensor.

5.2.3 Tempo de Ciclo Parcial (Viagem do Robô)

Para o último teste, foi registado o tempo no qual o robô realiza o transporte dos pigmentos, desde o momento em que o transporte é iniciado, até ao começo da viagem seguinte, como é possível ver na Figura 5.7.

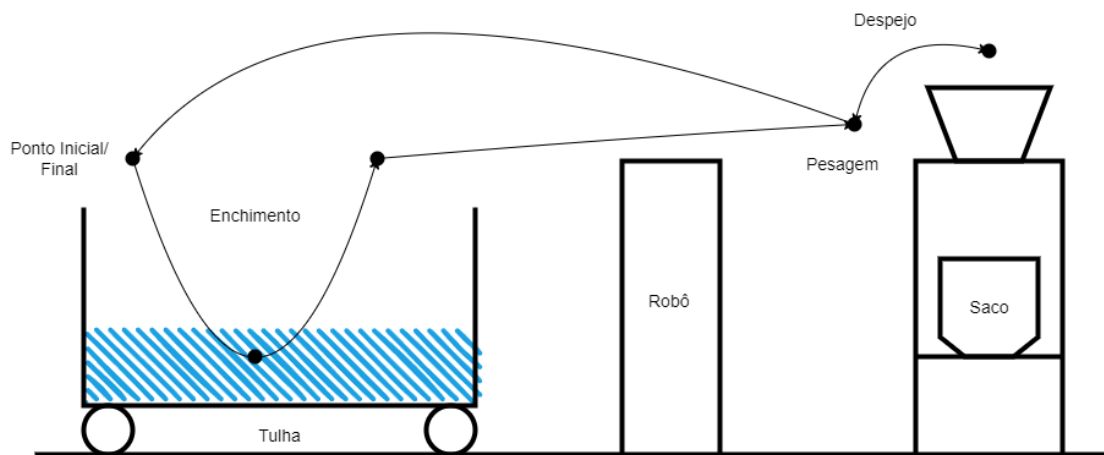


Figura 5.7: Trajetória para o Processo de Enchimento

Como foi descrito na Secção 5.2, o teste foi realizado para dois pigmentos diferentes, tendo-se efetuado dez repetições para cada um dos pigmentos. Os valores registados estão presentes na Tabela 5.9a e na Tabela 5.9b.

Tabela 5.9: Tempo de Ciclo Parcial (Viagem do Robô)

(a) Pigmento Pó

Pigmento: Pó	
Nº Tentativa	Tempo de Ciclo (sec)
1	13,39
2	13,61
3	13,44
4	13,25
5	13,86
6	13,88
7	14,25
8	13,48
9	14,10
10	14,25
Média	13,75

(b) Pigmento Granulado

Pigmento: Granulado	
Nº Tentativa	Tempo de Ciclo (sec)
1	13,09
2	10,87
3	14,86
4	12,77
5	13,38
6	11,25
7	15,07
8	13,41
9	13,52
10	13,30
Média	13,15

5.2.4 Comparação entre Solução Atual e Solução Proposta

Após realizar os testes propostos ao robô, os valores obtidos são comparados com os valores registados para o processo atual, descritos no Capítulo 2. Tendo em conta o intervalo de tempo disponível para execução dos trabalhos, optou-se por dar prioridade à implementação do robô, no sentido de determinar a viabilidade e *performance* do sistema. Para além dos tempos de ciclo do robô obtidos experimentalmente, estimou-se o tempo de ciclo dos demais componentes da solução com base em dados fornecidos pelos respetivos fornecedores.

Conforme mencionado, foram estimados os tempos de ciclo para as três receitas selecionadas no início da dissertação, considerando a possibilidade de utilizar a solução futura para a dosagem dos pigmentos. Para isso, foi realizado um estudo para agregar os diferentes tempos de ciclo de cada componente e obter o valor final estimado. De seguida, na Tabela 5.10, são apresentados os tempos considerados na estimativa para a Receita A, de forma a clarificar e justificar a contribuição de cada componente para a estimativa final.

Tabela 5.10: Divisão do Tempo de Ciclo Total

Componente	Frequência da Ação	Tempo da Ação (sec)	Tempo Total Gasto (sec)
Guias Telescópicas	2	5,3	10,60
Válvula (Doseamento)	1	76,40	76,40
Válvula (Descarga Total)	1	10	10
Plataforma das Tulhas	0	2	0
Robô	3	13	39,00
Total			136,00

Conforme pode ser verificado na Tabela 5.10, o tempo de ciclo é dividido em cinco ações principais, sendo que duas dessas ações apresentam maior contribuição: o robô e a válvula doseadora. Mas, começando pelos componentes com menor contribuição: o tempo de ciclo das guias telescópicas e da plataforma das tulhas.

- **Guias Telescópicas**

A referência de tempo utilizada para as guias telescópicas foi obtida a partir do *datasheet* da marca Eles+Ganter [30], que pode ser consultado no Anexo C. Ao definir esse tempo, considerou-se uma possível distância a percorrer na solução futura, de 800 mm, e uma velocidade média de 0,15 m/s, em relação à velocidade máxima indicada no *datasheet* correspondente, que é de 0,3 m/s. Isso ocorre porque, no ambiente real, as guias não se deslocarão à velocidade máxima. Após definir a duração da ação, estimou-se que as guias se moveriam duas vezes: da posição de dosagem para a posição de descarga total e vice-versa.

- **Plataforma das Tulhas**

Como este componente já está presente no processo atual, apenas foi necessário registrar o tempo de ciclo atual. Para este caso, em particular, como a receita necessita apenas de um pigmento, a plataforma mantém-se sempre no mesmo local, não tendo contribuição para a estimativa realizada.

No que se refere à válvula doseadora, foram tidos em conta dois tempos: o tempo da descarga total e do doseamento de cada pigmento. Para a primeira opção, o tempo foi registrado nos testes feitos à válvula, presentes no Anexo A, tendo sido fornecido pela empresa responsável. Conhecido este tempo da ação, foi calculado o tempo total gasto, prevendo o número de descargas efetuadas num ciclo, que neste caso, sendo apenas um pigmento, será uma descarga por ciclo. Assim sendo, o tempo total gasto para a função de descarga total seria 10 segundos. Por fim, para o doseamento, foi realizado um estudo, utilizando os dados obtidos dos testes presentes no Anexo A e, de forma a completar o estudo, foram pedidos alguns dados extras, tendo sido estruturada uma tabela com os dados obtidos. Estes dados, que estão presentes na Tabela 5.11, correspondem a medições realizadas ao tempo de ciclo necessário, por parte da válvula, a dosear uma respetiva quantidade de pigmento.

Tabela 5.11: Tabela de Tempos de Doseamento da Válvula

Target Weight (kg)	Tempo de Ciclo (sec)
0,200	28,90
0,300	35,68
0,700	49,85
1,200	58,86
1,500	62,60
2,000	67,41
5,000	82,73
10,000	94,32
14,000	99,95

A partir destes valores, foi realizada uma regressão logarítmica, de forma a caracterizar o comportamento da válvula numa expressão matemática, e assim, estimar o tempo de ciclo parcial para a dosagem em relação à quantidade de pigmentos necessária. Na Figura 5.8 está presente um gráfico com um conjunto de pontos, que correspondem aos dados obtidos pelo estudo e a regressão realizada.

Regressão Logarítmica - Tempo de Ciclo Parcial da Válvula

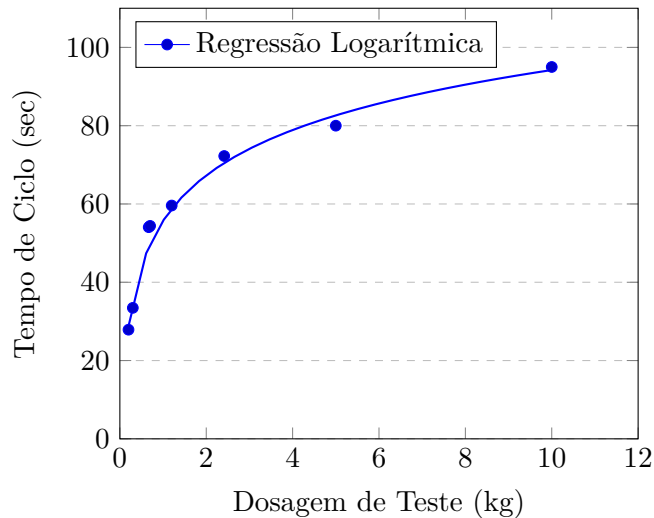


Figura 5.8: Regressão Logarítmica - Tempo de Ciclo Parcial da Válvula

Após obter a expressão matemática, $16.724 * \ln(x) + 55.71$, foi calculado o tempo de ciclo estimado para a dosagem dos pigmentos de cada receita inicialmente selecionada. Para a receita A, como apenas é necessário um pigmento, foi um cálculo simples e direto, substituindo o peso requerido na expressão obtida na Figura 5.8.

Tabela 5.12: Tempo de Ciclo da Válvula - Receita A

	Peso Requerido (kg)	Tempo de Ciclo (sec)
Pigmento 1	3,425	76,40
Total		76,40

Por último, concluindo a estimativa do tempo de ciclo total, é adicionado o tempo de ciclo parcial do robô, obtido pelos testes realizados ao sistema de doseamento dos pigmentos. A partir desse valor, e das viagens estimadas por cada pigmento, foi calculado o tempo gasto para o transporte dos pigmentos. Para a receita selecionada, são necessárias 3,425 kg do pigmento requerido. Sendo que o robô leva, em média, 1,600 kg por viagem, seriam necessárias três viagens do robô, ou seja, 3×13 segundos = 39 segundos. Concluindo, após a soma dos tempos de ciclo parciais de cada componente, o valor obtido foi 136 segundos, como pode ser visto na Tabela 5.10. Este procedimento descrito foi repetido para as restantes receitas citadas no Capítulo 3, tendo sido obtidos os valores representados na Figura 5.9.

Como é possível observar na Figura 5.9, existe uma diferença significativa entre os valores do processo atual e o valor estimado do processo futuro: 2,85x maior na receita A, 5,10x maior na receita B e 5,95x maior na receita C.

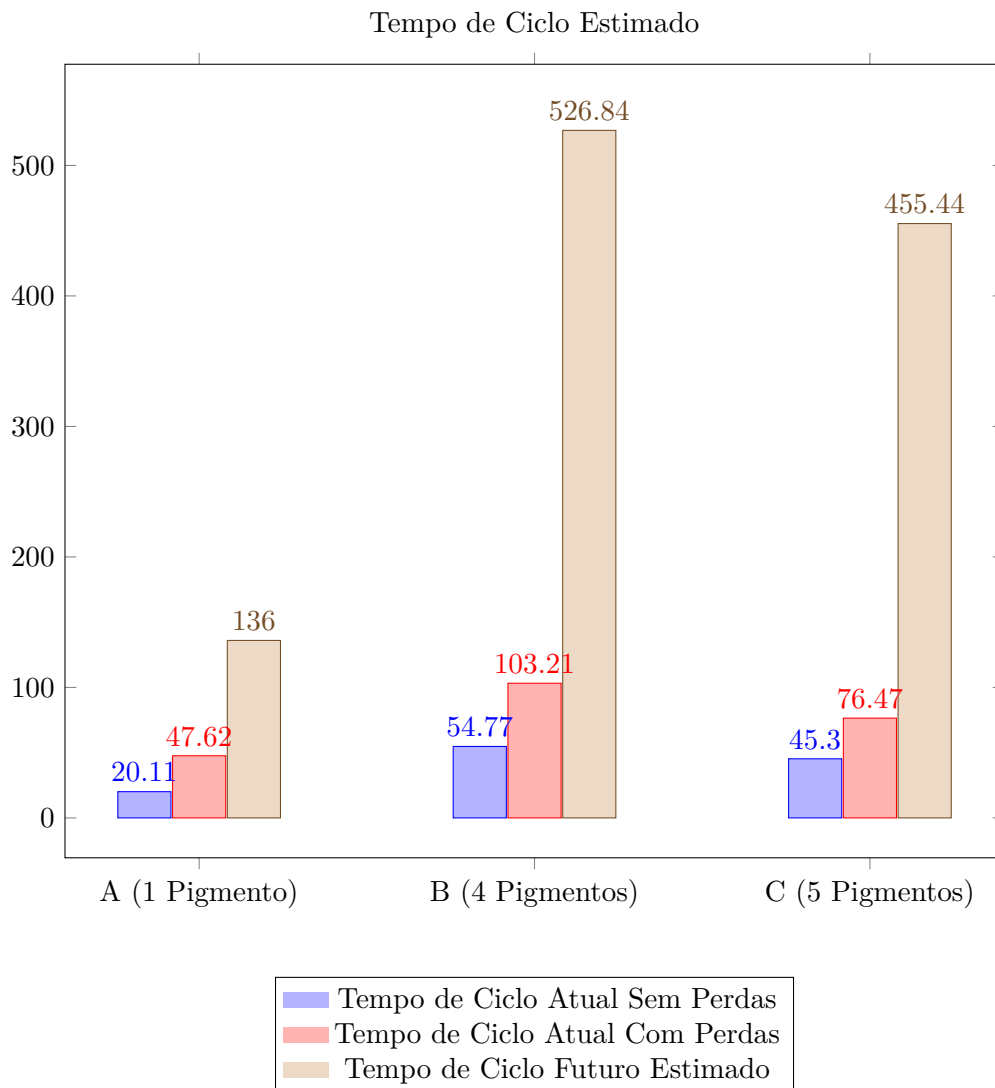


Figura 5.9: Tempo de Ciclo Total Estimado para as Três Receitas Seleccionadas

Ao enfrentar este desfasamento de valores, foi pensada uma otimização que consiste na realização, apenas, da dosagem de “acerto”, ou seja, da dosagem fina do pigmento. O intuito deste método é poupar algum tempo na dosagem do pigmento, delegando ao robô a tarefa da dosagem grossa. Porém, terá de haver um maior controlo na pesagem do pigmento, por parte do robô, de forma a não haver erros elevados nas quantidades transportadas. Para isso, foi definida uma quantidade limite, de 1,900 kg, para realizar a dosagem grossa, ou seja, até essa quantidade limite, o robô irá despejar diretamente o pigmento no saco. Quando faltar uma quantidade abaixo dos 1,900 kg, o robô irá despejar na válvula, para realizar a dosagem fina. Com este método, num cenário de controlo ideal da pesagem, foram estimados os tempos de ciclo para as três receitas seleccionadas, e esses valores estão apresentados na Figura 5.10.

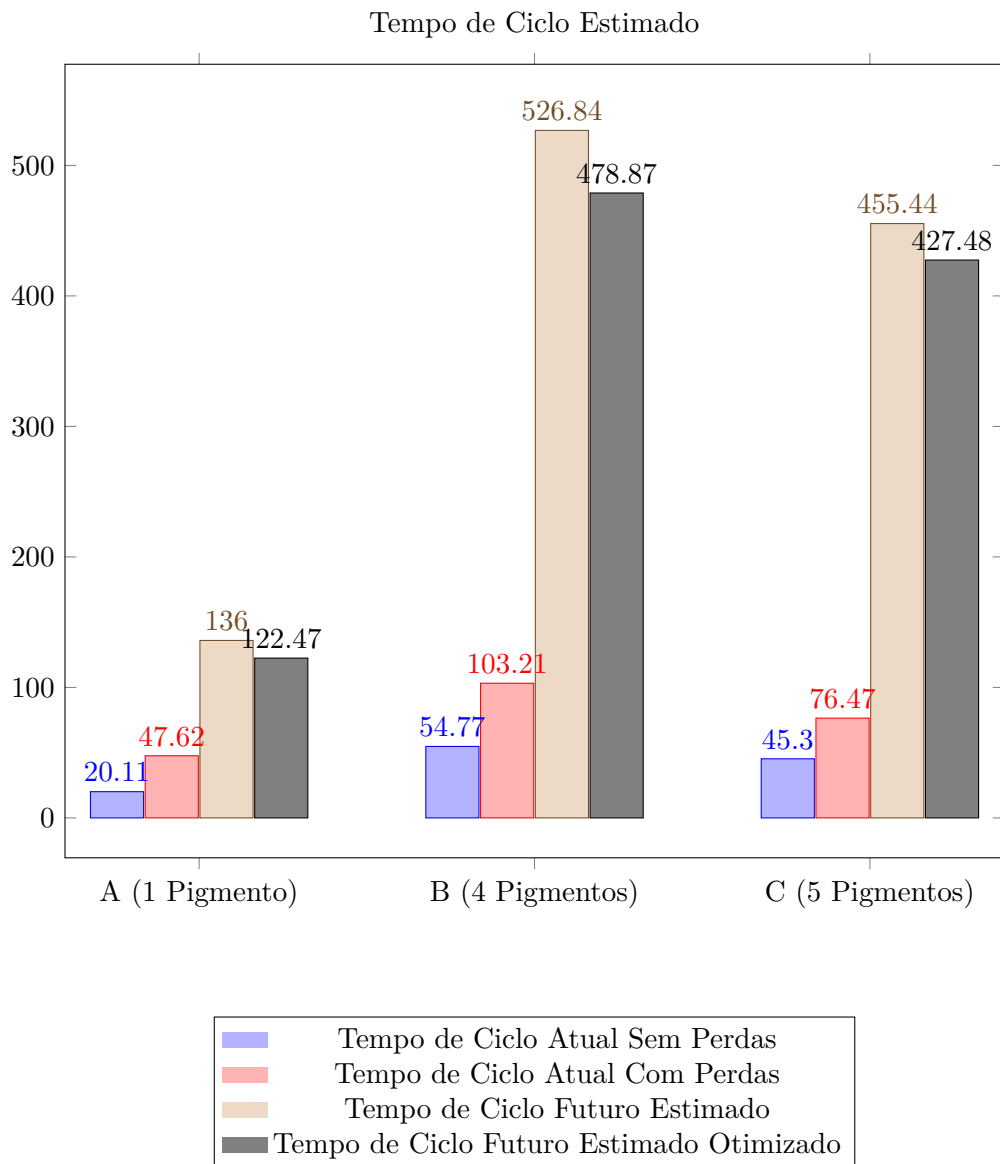


Figura 5.10: Tempo de Ciclo Total Estimado para as Três Receitas Seleccionadas - Apenas Dosagem Fina

Como é possível observar na Figura 5.10, houve uma melhoria no tempo de ciclo previsto para as receitas seleccionadas, porém, ainda existe uma diferença significativa para com os valores do tempo de ciclo do processo atual.

Capítulo 6

Conclusões

Ao longo deste capítulo são apresentadas as principais conclusões baseadas nas evidências obtidas com a realização deste projeto de tese de mestrado. O capítulo termina com o levantamento de algumas sugestões de trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

Nos últimos anos, a automação dos processos tem-se mostrado um forte aliado para as empresas. Nesse sentido, a Continental Mabor - Indústria de Pneus (CMIP) tem também procurado tirar partido destas oportunidades. Com esse propósito, foram definidos os objetivos para o projeto abordado nesta dissertação. O objetivo principal deste projeto de tese foi conceber um sistema que automatizasse o processo atual de pesagem e enchimento de pigmentos, com o intuito de proporcionar um trabalho mais acessível e menos desgastante, em termos de ergonomia e saúde, para os operadores. Paralelamente, esse sistema teria de cumprir as necessidades requeridas pela empresa, de forma a evitar perdas adicionais no processo associado.

Com o intuito de alcançar os objetivos estabelecidos, foram definidas diversas etapas para a recolha de informações. Inicialmente, foi realizado um estudo sobre o processo atual, onde foram registados dados referentes aos tempos de ciclo, área de trabalho, pigmentos utilizados e o fluxo do processo. Após a coleta desses dados, foram também recolhidas informações junto dos fornecedores das tecnologias, com o objetivo de analisar as opções disponíveis no mercado. Foram examinados

diferentes cenários de automação, considerando diferentes configurações, de *layout* e tecnologias.

No que diz respeito ao sistema de pesagem dos pigmentos, o conceito idealizado baseia-se na utilização de um robô colaborativo e uma válvula doseadora para realizar o processo de pesagem e dosagem dos pigmentos. Os valores obtidos na estimativa do tempo de ciclo deste conceito, que podem ser observados no Capítulo 5, são substancialmente superiores aos tempos de ciclo do processo atual (tempos de ciclo de 3x a 6x superiores). Essa diferença advém, principalmente, da pequena margem de erro definida para o doseamento, e do conseqüente tempo gasto nesse processo, por parte da válvula. Porém, o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação demonstra que o conceito é exequível e válido, havendo, no entanto, a necessidade de encontrar otimizações para aproximar o tempo de ciclo estimado do tempo de ciclo atual.

Relativamente ao sistema de manipulação de sacos, foram encontradas várias alternativas para realizar essa tarefa, cada uma com as suas vantagens e desvantagens. A opção da máquina ensacadora vertical mostrou-se inviável devido à sua altura elevada, impossibilitando o transporte do pigmento, por parte do robô, para a válvula doseadora. As restantes soluções continuam disponíveis para uma possível escolha e, conseqüente, implementação. Eventualmente, serão necessários testes complementares para auxiliar na sua seleção.

Em termos gerais, podemos considerar que os objetivos estabelecidos neste projeto foram praticamente alcançados na sua totalidade, havendo apenas alguns detalhes ao nível da solução final que ainda precisam ser discutidos. Como conclusão desta dissertação, constatou-se que será muito difícil encontrar uma solução tecnológica que seja capaz de igualar ou superar a solução atual em termos de produtividade (tempo de ciclo). A flexibilidade e agilidade do operador torna o processo atual muito mais produtivo, em comparação com a utilização do robô colaborativo e da válvula doseadora, apesar de um maior período de trabalho. Esta diferença do período de atividade do robô, por vezes, pode compensar alguns intervalos improdutivos do operador, mas não, na totalidade. Porém, em termos de ergonomia e bem-estar, esta solução torna todo o processo e a área de trabalho associada, mais acessível e adequada para a presença do humano. A automatização deste processo afasta os operadores do trabalho duro e repetitivo, passando-os para a tarefa de supervisão e/ou tarefas extras.

6.2 Trabalho Futuro

Os trabalhos futuros, em redor deste projeto, poderão centrar-se na conclusão e implementação de um primeiro protótipo funcional do sistema de pesagem de pigmentos, ajustando alguns detalhes restantes no conceito.

Em relação ao sistema de manipulação de sacos, os trabalhos futuros poderão ser direcionados para a conclusão e escolha de um conceito, de forma a ser possível a implementação de um sistema completo, integrando os dois conceitos estudados neste projeto.

Referências

- [1] C. Mabor, “Continental mabor.” <https://www.continentalmabor.pt/>, 2023. Accessed: 2023-03-22. [Citado na página 2]
- [2] C. Mabor, “Continental extends production facilities in lousado, portugal, with investments of around 100 million euro - continental ag.” <https://www.continental.com/en/press/press-releases/2019-06-11-lousado-investments/>, 06 2019. Accessed: 2023-08-15. [Citado nas páginas vii e 2]
- [3] F. M. Herramienta, “¿qué es la robótica colaborativa? - ferrotall - herramienta de futuro.” <https://www.ferrotall.com/es/que-es-la-robotica-colaborativa/>, 12 2021. Accessed: 2023-02-23. [Citado nas páginas vii e 8]
- [4] I. F. of Robotics, “World robotics 2022.” <https://ifr.org/worldrobotics/>, 9 2023. Accessed: 2023-07-31. [Citado na página 8]
- [5] E. Gambao, “Analysis exploring risks and opportunities linked to the use of collaborative industrial robots in europe,” 6 2023. Accessed: 2023-08-01. [Citado nas páginas 8 e 9]
- [6] C. Müller, “World robotics 2022,” tech. rep., 10 2022. Accessed: 2023-07-31. [Citado nas páginas vii e 8]
- [7] Newsmantraa, “Europe collaborative robots market expected to expand at a steady 2022-2030 | cagr of 40.73% - digital journal,” 9 2022. Accessed: 2023-08-01. [Citado na página 9]
- [8] G. V. Research, “Collaborative robots market share & growth report, 2030,” tech. rep., 2022. Accessed: 2023-08-29. [Citado nas páginas vii, 9 e 10]
- [9] HowToRobot, “Automating your processes through bin picking – here’s what to look for | howtorobot.” <https://howtorobot.com/expert-insight/automating-your-processes-through-bin-picking-heres-what-look>, 5 2020. Accessed: 2023-08-16. [Citado nas páginas vii e 11]
- [10] C. LLC, “Cobot - collaborative palletizing robot - columbia okura.” <https://columbiaokura.com/products/cobots/>, 2023. Accessed: 2023-08-17. [Citado nas páginas vii e 11]

- [11] R. A. Ltd, “Cobot screwing.” https://www.youtube.com/watch?v=xxgZOPww1p0&ab_channel=ReecoAutomationLtd, 1 2019. Accessed: 2023-08-17. [Citado nas páginas vii e 12]
- [12] W. Workers, “Sanding and polishing with a cobot | automated sanding.” <https://www.wiredworkers.io/cobot/applications/sanding-and-polishing/>, 2023. Accessed: 2023-08-17. [Citado nas páginas vii e 12]
- [13] W. Workers, “Soldering with a cobot | collaborative robot soldering.” <https://www.wiredworkers.io/cobot/applications/soldering/>, 2023. Accessed: 2023-08-17. [Citado nas páginas vii e 13]
- [14] A. for Advancing Automation, “Collaborative robots: Quality inspections.” <https://www.automate.org/a3-content/collaborative-robots-quality-inspections>, 2023. Accessed: 2023-08-17. [Citado nas páginas vii e 14]
- [15] F. Sherwani, M. M. Asad, and B. S. K. K. Ibrahim, “Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0),” tech. rep., 2020. Accessed: 2023-03-01. [Citado nas páginas ix, 14 e 15]
- [16] A. Hentout, M. Aouache, A. Maoudj, and I. Akli, “Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008-2017,” *Advanced Robotics*, vol. 33, pp. 764–799, 2019. Accessed: 2023-08-21. [Citado na página 15]
- [17] C. J. Loureiro and D. F. M. B. C. Santos, “Cobots na indústria 4.0 impactos sociais e económicos,” tech. rep., Universidade da Beira Interior, 10 2018. Accessed: 2023-03-01. [Citado nas páginas 15, 18 e 19]
- [18] W. Bauer, M. Bender, M. Braun, P. Rally, and O. Scholtz, “Lightweight robots in manual assembly – best to start simply! examining companies’ initial experiences with lightweight robots,” tech. rep., Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO, 10 2016. Accessed: 2023-08-01. [Citado nas páginas vii, 15 e 16]
- [19] S. Vojić, “Applications of collaborative industrial robots,” *International Scientific Journal “Machines. Technologies. Materials”*, pp. 96–99, 2020. Accessed: 2023-08-01. [Citado na página 15]
- [20] P. Khanpara and S. Tanwar, *Additive Manufacturing: Concepts and Technologies*, pp. 171–185. Springer Nature, 2020. Accessed: 2023-08-25. [Citado na página 17]
- [21] “The four forms of collaboration identified by the robot safety.” https://www.researchgate.net/figure/The-four-forms-of-collaboration-identified-by-the-robot-safety-standards-ISO-10218-1-2_fig2_347069333, 2021. Accessed: 2023-02-23. [Citado nas páginas vii e 18]

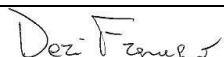
- [22] P. J. Koch, M. K. van Amstel, P. Dębska, M. A. Thormann, A. J. Tetzlaff, S. Bøgh, and D. Chrysostomou, “A skill-based robot co-worker for industrial maintenance tasks,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 83–90, 2017. [Citado na página 18]
- [23] W. Workers, “The differences between industrial robots and collaborative robots.” <https://www.wiredworkers.io/blog/the-differences-between-industrial-robots-and-collaborative-robots/>, 2023. Accessed: 2023-07-31. [Citado nas páginas vii e 18]
- [24] EXPO21XX, “Vacuum suction cups coat soft grippers robots by piab.” https://www.expo21xx.com/industrial-robots/311_st3_robot-assembly/default.htm, 2023. Accessed: 2023-05-09. [Citado nas páginas vii e 20]
- [25] WePack, “The differences between vffs and hffs.” <https://www.wepack.co.uk/advice-centre/research/the-differences-between-vffs-and-hffs-which-is-the-best-packaging-solution-for-you>, 2023. Accessed: 2023-05-09. [Citado nas páginas vii e 20]
- [26] C. Service, “Automatic dosing system for small chemicals weighing for the production of technical rubber,” 2023. [Citado nas páginas vii e 21]
- [27] R. Pereira, “Projecto de expansão do contiseal,” 11 2012. Accessed: 2023-08-21. [Citado nas páginas vii e 24]
- [28] C. Mabor, “Processo produtivo.” Intranet, 2020. Accessed: 2023-03-22. [Citado nas páginas 24 e 25]
- [29] RoboDK, “Simulator for industrial robots and offline programming - robodk.” <https://robodk.com/>, 2023. Accessed: 2023-08-25. [Citado na página 38]
- [30] Eles+Ganter, “Eles+ganter.” <https://www.elesa-ganter.com/en/www>, 2023. Accessed: 2023-08-29. [Citado na página 62]
- [31] F. S. Cheng, “Calibration of robot reference frames for enhanced robot positioning accuracy,” tech. rep., InTech, 2008. Accessed: 2023-07-25. [Citado nas páginas viii e 84]
- [32] U. Robots, “Universal robots e-series user manual ur10e original instructions (en),” tech. rep., 2009. Accessed: 2023-08-01. [Citado nas páginas 84, 85 e 86]
- [33] U. Robots, “The urscript programming language,” tech. rep., 2018. Accessed: 2023-08-21. [Citado na página 86]

Anexo A

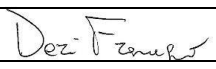
Testes Realizados à Válvula Doseadora

6. Results of the tests

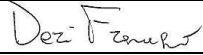
6.1 Element A

TEST N°1				TEST DATA: 05/12/2022		
PRODUCT: Element A				VALVE TESTED: Double valve 150 RR		
TYPE OF TEST: Functional tests – Dosing				SCOPE OF THE TEST: Verify that the system run the operating cycle in the right sequence, checking with the requirements.		
OPERATING CYCLE: Start the system and perform some dosing cycles with the product, as described in section n.4				ACCEPTING CRITERIA: the test is considered passed if the discharging is compliant with the requirements (accuracy 10 g)		
Test N°	Target weight (g)	Dosed weight (g)	Dosing time (sec)	Fine dosing starting target	Advanced dosing Opening angle [β]	Notes
01	n.a.	2	n.a.	n.a.	15°	*Checking the fine dosing angle before the complete dosing cycle
02	n.a.	2	n.a.	n.a.	15°	
03	n.a.	4	n.a.	n.a.	20°	
04	n.a.	4	n.a.	n.a.	20°	
05	n.a.	10	n.a.	n.a.	25°	
06	n.a.	11	n.a.	n.a.	25°	
07	200	207	10	100	25°	
08	200	214	9	100	25°	
09	200	187	30	150	25°	
10	200	209	31	150	25°	
11	200	200	30	150	25°	
12	200	203	27	150	25°	
13	200	203	31	150	25°	
14	200	195	24	150	25°	
15	200	197	23	150	25°	
16	200	198	27	150	25°	
NOTES: Charging hopper must be charged with the target weight plus 500grams to guarantee a repeatable dosing. Complete discharging for material changes: 10 seconds						
RESULT OF THE TEST: <input checked="" type="checkbox"/> PASSED / <input type="checkbox"/> PASSED WITH RESERVE / <input type="checkbox"/> FAILED						
Role		Name		Company		Signature
Responsible of the test		Francesco Deri		CO.RA.		UT 

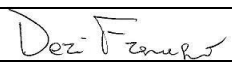
6.2 Element B

TEST N°2				TEST DATA: 05/12/2022		
PRODUCT: Element B				VALVE TESTED: Double valve 150 RR		
TYPE OF TEST: Functional tests – Dosing				SCOPE OF THE TEST: Verify that the system run the operating cycle in the right sequence, checking with the requirements.		
OPERATING CYCLE: Start the system and perform some dosing cycles with the product, as described in section n.4				ACCEPTING CRITERIA: the test is considered passed if the discharging is compliant with the requirements (accuracy 20 g)		
Test N°	Target weight (g)	Dosed weight (g)	Dosing time (sec)	Fine dosing starting target	Advanced dosing Opening angle [β]	Notes
01	700	700	50	100	20°	
02	700	705	55	100	20°	
03	700	712	51	100	20°	
04	700	698	56	100	20°	
05	700	690	60	100	20°	
<p>NOTES: Charging hopper must be charged with the target weight plus 500grams to guarantee a repeatable dosing. Complete discharging for material changes: 10 seconds</p>						
<p>RISULT OF THE TEST: <input checked="" type="checkbox"/> PASSED / <input type="checkbox"/> PASSED WITH RESERVE / <input type="checkbox"/> FAILED</p>						
Role		Name		Company	Dept.	Signature
Responsible of the test		Francesco Deri		CO.RA.	UT	

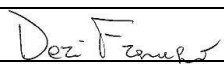
6.3 Element C

TEST N°3				TEST DATA: 05/12/2022		
PRODUCT: Element C				VALVE TESTED: Double valve 150 RR		
TYPE OF TEST: Functional tests – Dosing				SCOPE OF THE TEST: Verify that the system run the operating cycle in the right sequence, checking with the requirements.		
OPERATING CYCLE: Start the system and perform some dosing cycles with the product, as described in section n.4				ACCEPTING CRITERIA: the test is considered passed if the discharging is compliant with the requirements (accuracy 20 g)		
Test N°	Target weight (g)	Dosed weight (g)	Dosing time (sec)	Fine dosing starting target	Advanced dosing Opening angle [β]	Notes
01	1200	1213	58	100	25°	
02	1200	1211	55	100	25°	
03	1200	1205	62	100	25°	
04	1200	1208	65	100	25°	
05	1200	1201	58	100	25°	
<p>NOTES: Charging hopper must be charged with the target weight plus 500grams to guarantee a repeatable dosing. Complete discharging for material changes: 10 seconds</p>						
<p>RESULT OF THE TEST: <input checked="" type="checkbox"/> PASSED / <input type="checkbox"/> PASSED WITH RESERVE / <input type="checkbox"/> FAILED</p>						
Role		Name		Company		Signature
Responsible of the test		Francesco Deri		CO.RA.		UT 

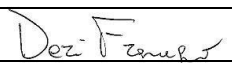
6.4 Element D

TEST N°4				TEST DATA: 05/12/2022		
PRODUCT: Element D				VALVE TESTED: Double valve 150 RR		
TYPE OF TEST: Functional tests – Dosing				SCOPE OF THE TEST: Verify that the system run the operating cycle in the right sequence, checking with the requirements.		
OPERATING CYCLE: Start the system and perform some dosing cycles with the product, as described in section n.4				ACCEPTING CRITERIA: the test is considered passed if the discharging is compliant with the requirements (accuracy 20 g)		
Test N°	Target weight (g)	Dosed weight (g)	Dosing time (sec)	Fine dosing starting target	Advanced dosing Opening angle [β]	Notes
01	300	298	30	150	25°	
02	300	292	29	150	25°	
03	300	306	32	150	25°	
04	300	312	29	150	25°	
05	300	289	29	150	25°	
<p>NOTES: Charging hopper must be charged with the target weight plus 500grams to guarantee a repeatable dosing. Complete discharging for material changes: 10 seconds</p>						
<p>RISULT OF THE TEST: <input checked="" type="checkbox"/> PASSED / <input type="checkbox"/> PASSED WITH RESERVE / <input type="checkbox"/> FAILED</p>						
Role		Name		Company	Dept.	Signature
Responsible of the test		Francesco Deri		CO.RA.	UT	

6.5 Element E

TEST N°5				TEST DATA: 05/12/2022		
PRODUCT: Element E				VALVE TESTED: Double valve 150 RR		
TYPE OF TEST: functional tests – dosing				SCOPE OF THE TEST: Verify that the system run the operating cycle in the right sequence, checking with the requirements.		
OPERATING CYCLE: Start the system and perform some dosing cycles with the product, as described in section n.4				ACCEPTING CRITERIA: the test is considered passed if the discharging is compliant with the requirements (accuracy 20 g)		
Test N°	Target weight (g)	Dosed weight (g)	Dosing time (sec)	Fine dosing starting target	Advanced dosing Opening angle [β]	Notes
01	300	305	32	100	15°	
02	300	307	30	100	15°	
03	300	301	35	100	15°	
04	300	312	41	100	15°	
05	300	298	33	100	15°	
<p>NOTES: Having no reference for dosing we suppose a target weight of 300 grams with 20grams of accuracy Charging hopper must be charged with the target weight plus 500grams to guarantee a repeatable dosing. Complete discharging for material changes: 10 seconds</p>						
RESULT OF THE TEST: <input checked="" type="checkbox"/> PASSED / <input type="checkbox"/> PASSED WITH RESERVE / <input type="checkbox"/> FAILED						
Role		Name		Company		Signature
Responsible of the test		Francesco Deri		CO.RA.		UT 

6.6 Element F

TEST N°6				TEST DATA: 05/12/2022		
PRODUCT: Element F				VALVE TESTED: Double valve 150 RR		
TYPE OF TEST: Functional tests – Dosing				SCOPE OF THE TEST: Verify that the system run the operating cycle in the right sequence, checking with the requirements.		
OPERATING CYCLE: Start the system and perform some dosing cycles with the product, as described in section n.4				ACCEPTING CRITERIA: the test is considered passed if the discharging is compliant with the requirements (accuracy 20 g)		
Test N°	Target weight (g)	Dosed weight (g)	Dosing time (sec)	Fine dosing starting target	Advanced dosing Opening angle [β]	Notes
01	300	285	35	100	20°	
02	300	292	40	100	20°	
03	300	290	37	100	20°	
04	300	295	35	100	20°	
05	300	294	35	100	20°	
<p>NOTES: Having no reference for dosing we suppose a target weight of 300 grams with 20grams of accuracy Charging hopper must be charged with the target weight plus 500grams to guarantee a repeatable dosing (not more 1 kg). Complete discharging for material changes: 10 seconds</p>						
RESULT OF THE TEST: <input checked="" type="checkbox"/> PASSED / <input type="checkbox"/> PASSED WITH RESERVE / <input type="checkbox"/> FAILED						
Role		Name		Company		Signature
Responsible of the test		Francesco Deri		CO.RA.		UT 

Anexo B

Funções Básicas do Robô

Na instalação e configuração inicial do robô, as funções mais importantes foram:

- **TCP**

O TCP é um ponto definido na ferramenta do robô, que serve de orientação para os movimentos realizados. Este ponto é o ponto de contacto com os objetos de trabalho, e, para não haver problemas de movimentação e de colisão com esses objetos, é importante uma correta definição deste ponto. Existem várias formas de definir este ponto, sendo a mais comum, tocar num ponto com a ponta do TCP, utilizando várias orientações diferentes da ferramenta, como é possível ver na Figura B.1.

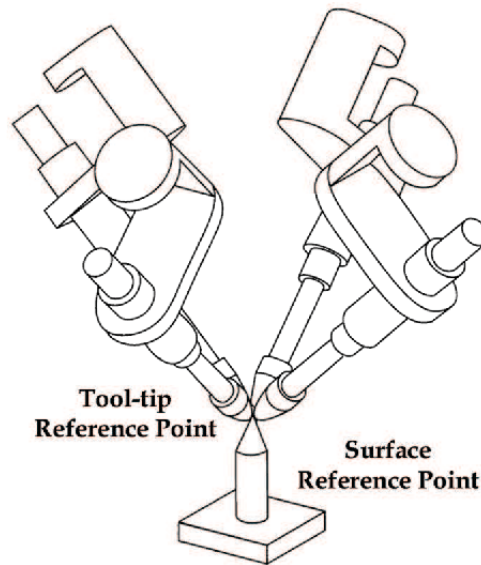


Figura B.1: Definição do TCP da Ferramenta do Robô [31]

- **Carga Útil**

A função da carga útil tem como objetivo informar o robô qual o peso da carga que está ou irá transportar, para saber a força extra que irá realizar, ou seja, que força irá ter de realizar para compensar a carga transportada. Neste caso, definiu-se duas cargas diferentes: a carga útil com a ferramenta vazia (aproximadamente 1 kg) e a carga útil com a ferramenta cheia (aproximadamente 3 kg).

De seguida, para programar o movimento desejado do robô, foram utilizadas as seguintes funções:

- **Ponto de Rota**

Os pontos de rota são a parte central de um programa de robô, dizendo ao braço do robô onde deve estar ou para onde se deve mover. Um ponto de rota de posição fixa é ensinado movendo, fisicamente ou remotamente, o braço do robô para a posição desejada [32].

- **MoveL/J/P**

A função de movimento consiste numa função que caracteriza o tipo de movimento que vai ser realizado pelo robô, tendo como base os pontos de rota definidos para o movimento desejado. Existem três tipos de movimento [32]:

- “*moveL*” move o TCP linearmente entre pontos de rota. Isto significa que cada junta executa um movimento mais complexo para manter a ferramenta numa trajetória em linha reta. Os parâmetros partilhados

que podem ser definidos para este tipo de movimento são a velocidade da ferramenta desejada e a aceleração da ferramenta especificada em mm/s e mm/s², respetivamente”;

- “*moveJ* efetua movimentos que são calculados no espaço das juntas do braço do robô. As articulações são controladas para terminarem os seus movimentos em simultâneo. Os parâmetros partilhados que se aplicam a este tipo de movimento são a velocidade máxima da junta e a aceleração da junta, especificadas em graus/s e graus/s², respetivamente. Se se pretender que o braço do robô se mova rapidamente entre pontos de rota, ignorando a trajetória da ferramenta entre esses pontos de rota, este tipo de movimento é a escolha preferível”;
- “*moveP* move a ferramenta linearmente com velocidade constante com combinações circulares, e destina-se a algumas operações de processo, como colagem ou dispensação de materiais. O tamanho do raio é, por omissão, um valor partilhado entre todos os pontos de rota. Um valor menor fará com que a trajetória se torne mais acentuada, enquanto um valor mais elevado tornará a trajetória mais suave. Enquanto o braço do robô se move através dos pontos de rota com velocidade constante, a caixa de controlo do robô não pode esperar por uma operação de Entrada/Saída (E/S) ou por uma ação do operador. Se o fizer, pode parar o movimento do braço do robô ou causar uma paragem de proteção”.

- **Direção até contacto**

“O nó de programa “Direção” especifica um movimento relativo aos eixos ou TCP. O robô move-se ao longo do caminho especificado pelo nó de programa “Direção” até que esse movimento seja interrompido por uma condição “Até”, que define um critério de paragem para um movimento. O robô move-se ao longo de um caminho e pára quando é detetado contacto. Na árvore de programa, é possível adicionar nós “Até”, sob nós de “Direção” e nós de “Ponto de Rota”. É possível adicionar vários critérios de paragem a um único movimento. O movimento pára quando a primeira condição “Até” é cumprida. O nó de programa “Até ao Contacto” com a ferramenta permite ao robô parar o seu movimento quando o contacto com a ferramenta é estabelecido. É possível definir a desaceleração da paragem e a retração da ferramenta” [32].

- **Força**

“O modo “Força” é adequado para aplicações em que a posição atual do TCP ao longo de um eixo predefinido não é importante, mas em que é necessária uma força desejada ao longo desse eixo. O modo “Força” também suporta a aplicação de determinados binários em torno de eixos predefinidos. O braço do

robô tenta acelerar ao longo desse eixo, se não forem encontrados obstáculos num eixo onde é definida uma força diferente de zero. Embora um eixo seja selecionado para ser compatível, o programa do robô continua a tentar mover o robô ao longo desse eixo. No entanto, o controle da força assegura que o braço do robô ainda se aproxima da força especificada” [32].

- **“get_actual_tcp_pose()”**

Esta função guarda a posição TCP atual do robô na forma $p[x,y,z,rx,ry,rz]$. Isto é chamado uma variável de pose, e as unidades de x , y e z estão em metros enquanto rx,ry e rz são posições de ângulo de eixo em radianos.

Para a processo de pesagem do pigmento, as principais funções utilizadas são [33]:

- **“force()”**

“A função devolve a força atual exercida externamente no TCP. A força é o módulo de F_x , F_y e F_z calculado utilizando `get_tcp_force()`”;

- **“get_tcp_force()”**

“A função devolve $p[F_x(N),F_y(N),F_z(N),TR_x(Nm),TR_y(Nm),TR_z(Nm)]$ onde F_x , F_y , e F_z são as forças nos eixos do sistema de coordenadas da base do robô, medidas em Newton, e TR_x , TR_y , e TR_z são os binários em torno desses eixos, medidos em Newton vezes metros”;

- **“zero_ftsensor()”**

“Esta função zera a medição de força no TCP do sensor de força/Binário incorporado, subtraindo a medição atual da subsequente”.

De notar que algumas funções acima descritas já se encontram presentes no *software* do controlador, mas existem outras que têm de ser colocadas manualmente através da opção *Script*. Esta funcionalidade permite escrever uma linha de código *URscript* ou carregar e editar ficheiros *URscript*, possibilitando a programação do robô através de código, ao invés da programação física.

Anexo C

Datasheet das Guias Telescópicas

Travel speed

The permissible extraction and retraction speeds of the telescopic slides are set at a maximum speed of 0.3 m/s. Shortly before the end of stroke, the speed should be reduced to less than 0.15 m/s so that the stops, rubber stops, dampened self-retracting mechanisms etc., do not have an excessive amount of impact stress.

Figura C.1: *Datasheet* - Velocidades

Telescopic slides

with full extension, load capacity up to 1290 N

SPECIFICATION

Type

Type **E**: with rubber stop, locking device in back

Identification no.

No. **2**: Fastening using countersunk holes

Slide profile

Steel, zinc plated, blue passivated **ZB**

Bearings

Roller bearing steel, hardened

Ball cage

Steel, zinc plated

Rubber stop

Plastic / Elastomer

Operating temperature -20 °C to 100 °C



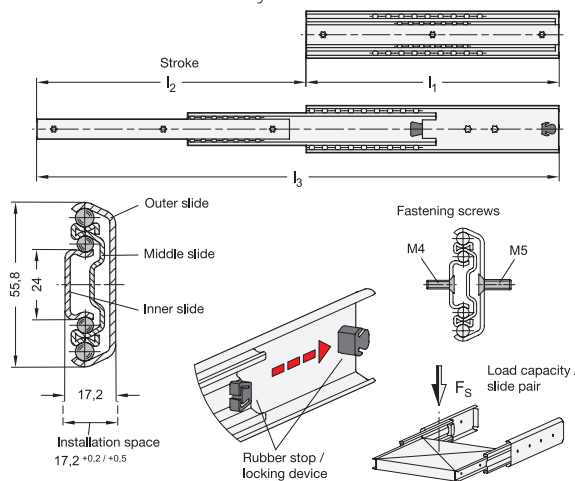
INFORMATION

Telescopic slides GN 1420 are installed vertically and in pairs. The stroke reaches $\approx 100\%$ of the nominal length l_1 (full extension). The rubber stops of type E dampen the impact of the slide in the two end positions and takes on the locking function of the back stop position. This feature is noticeable through a slight resistance on opening and closing. If larger static or dynamic loads occur in the direction of extension, they should be absorbed by external stop elements.

The telescopic slides are delivered in **pairs**. They can be installed on the extension on either the left or right side due to the mechanics. All mounting holes are easy to reach through auxiliary holes. Only the mounting holes are shown, but other production-related holes may be present.

ON REQUEST

- other lengths and hole spacing
- other attachment options
- with latches, partially with detach function (back, front, or back-front)
- with locking device (front or back-front)
- other surfaces
- with support bracket

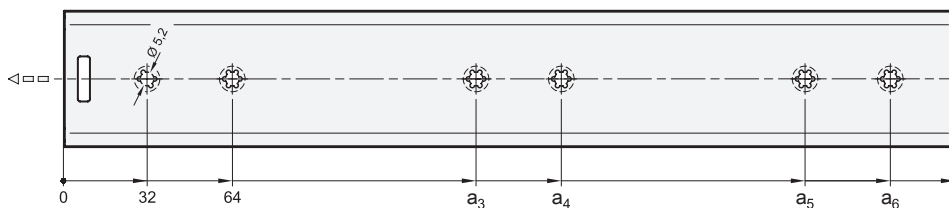


GN 1420

Description	l_1	$l_2 +4/-4$	l_3	F_s per pair in N at 10,000 cycles	F_s per pair in N at 100,000 cycles	⚖
GN 1420-300-E-2-ZB	300*	320	620	940	680	1680
GN 1420-350-E-2-ZB	350*	375	725	960	770	1960
GN 1420-400-E-2-ZB	400*	440	840	970	730	2240
GN 1420-450-E-2-ZB	450*	495	945	1100	830	2520
GN 1420-500-E-2-ZB	500*	550	1050	1190	910	2830
GN 1420-550-E-2-ZB	550*	600	1150	1180	900	3110
GN 1420-600-E-2-ZB	600*	650	1250	1230	970	3400
GN 1420-700-E-2-ZB	700*	750	1450	1290	1030	3980
GN 1420-800-E-2-ZB	800*	848	1648	1210	1020	4500
GN 1420-900-E-2-ZB	900*	950	1850	1050	900	5160
GN 1420-1000-E-2-ZB	1000*	1050	2050	810	720	5730
GN 1420-1200-E-2-ZB	1200*	1250	2450	640	570	6900

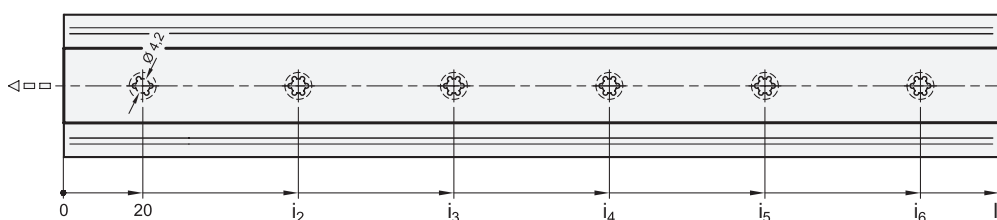
* The telescopic slides are delivered in pairs.

Mounting holes - Outer slide



l1	a3	a4	a5	a6
300	192	224	-	-
350	192	224	-	-
400	224	256	-	-
450	288	320	-	-
500	320	352	-	-
550	352	384	-	-
600	416	448	-	-
700	448	480	-	-
800	384	416	672	704
900	416	448	768	800
1000	480	512	864	896
1200	576	608	1056	1088

Mounting holes - Inner slide



l1	i2	i3	i4	i5	i6
300	150	280	-	-	-
350	175	330	-	-	-
400	200	380	-	-	-
450	225	430	-	-	-
500	250	480	-	-	-
550	275	530	-	-	-
600	300	580	-	-	-
700	350	680	-	-	-
800	271	522.5	774	-	-
900	305	589	874	-	-
1000	258	497	735.5	974	-
1200	251	482	712	943	1174

Fastening screws

For the said loading forces F_s to be absorbed reliably in the surrounding structure, all available countersunk holes of the outer and inner slide must be used. Failure to use fastening screws reduces the specified load capacity accordingly. The following screws can be used for mounting:

Designation - standard	Outer slide	Inner slide
Countersunk screw, Phillips DIN 965	M 5	M 4
Countersunk screw, Phillips DIN 7997	Size 5	Size 4 / 4.5

