



**João Pedro
Cirne Ramos**

**Desenvolvimento de um sistema de embalamento
de refeições para cozinha autónoma**

Development of a meal packaging system for an autonomous
kitchen



João Pedro
Cirne Ramos

Desenvolvimento de um sistema de embalamento de refeições para cozinha autónoma

Development of a meal packaging system for an autonomous kitchen

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Jorge Ferreira, Professor Associado, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e de António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Este estágio recebeu financiamento do Fundo Europeu do Desenvolvimento Regional (FEDR), Centro2020 e Agência Nacional de Inovação através do projeto *Cook4Me*. CENTRO-01-0247-FEDER-070247. A. L. Ferreira e F. Abreu também reconhecem financiamento do i3N project-UID/CTM/50025.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor César Miguel de Almeida Vasques

Professor Auxiliar em Regime Laboral da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Daniel Gil Afonso

Professor Adjunto em Regime Laboral da *Universidade de Aveiro*

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos

Professor Associado da *Universidade de Aveiro*

Agradecimentos / Acknowledgements

Chegado ao fim de uma grande etapa do meu percurso académico, não posso deixar de agradecer às pessoas que acompanharam, não só nesta fase, mas nos últimos seis anos.

Um obrigado, do tamanho do mundo, à minha família. Aos pais, por puxarem por mim, acreditarem nas minhas capacidades e fazerem-me muita papinha nas alturas de maior stress, como as épocas de exames e entregas de trabalho. Agradeço toda a paciência e entrega incansável! Aos irmãos deixo um obrigado pela amizade e palavras de carinho e encorajamento. Ao Tiago, agradeço particularmente os livros e apontamentos, bem como aquele "Então?" pontual, de quem está preocupado como me ando a safar. À Ana Teresa, um grande obrigado pelas chamadas Aveiro - Covilhã, nos momentos em que achava que o mundo ia acabar, porque tinha decidido fazer ALGA em exame final e estava ansioso por não ter estudado o suficiente dias antes da prova.

Não posso deixar de mencionar a pessoa que acompanhou mais de perto neste tempo da minha vida, a Gabriela. Desde os almoços nas escadas do DECA, no início do curso, até às trocas de ideias para as teses. Estiveste sempre ao meu lado, para me acalmar, para me desafiar e mais importante, convencer-me de que era capaz de tudo! Obrigado, do coração!

Também quero deixar um agradecimento a toda a equipa do projeto *Cook4Me*. Ao Professor Doutor Fernão Abreu agradeço a oportunidade de continuar a trabalhar neste projeto e as aprendizagens realizadas ao longo deste ano. Aos restantes colegas bolsheiros agradeço a camaradagem, o apoio e troca de ideias, dos quais tenho a realçar dois colegas e amigos em particular. Ao Afonso, que me acompanhou no curso desde o segundo ano, apenas digo: és o maior. Foi um gosto trabalhar contigo em todos os projetos e, maior ainda foi o gosto de te conhecer e poder chamar amigo! E à Carla, que teve um papel importante na concretização deste trabalho, particularmente no projeto de automação, agradeço a paciência para aturar-me e ajudar-me a crescer enquanto engenheiro. Estou ansioso por continuar a trabalhar contigo.

Aos restantes colegas de curso com os quais partilhei este caminho, agradeço os anos passados e a convivência. Sem dúvida, tornaram a experiência muito mais enriquecedora.

Por fim, agradeço aos orientadores, ao Professor Doutor Jorge Ferreira e ao Professor Doutor António Ramos pelas ideias e conhecimento partilhados ao longo desta jornada.

Keywords

autonomous kitchen, dispensing units, packaging, plating system, conveyor belt

Abstract

Nowadays, the existence of robots working side by side with humans is a normal occurrence. Hospitality services, such as restaurants, are no different. These automated systems can do various tasks like helping in back-of-the-house chores such as slicing ingredients, grilling, and frying or front-of-the-house responsibilities like collecting plates, greeting customers, and serving [2]. This project aims to develop a fully automated plating system integrated with an autonomous kitchen. This will alleviate furthermore the repetitive tasks required of human workers. The systems developed, at the moment, are intended to plate simple meals which require basic movements like pouring.

A benchmarking study was made of systems with similar applications in the industry for dispensing, sealing, and transportation of goods. Some of the examples found include coffee cup dispensers, paint canning, and processed foods assembly lines [3] [19].

Subsequently, concepts of different assembly lines and systems to be implemented were compared so as to choose the most reliable solution to the project. The concept that was defined at this stage was similar to the ones observed in the industry [20]. A conveyor belt is used with the various dispensing and sealing units installed on top of it. First, a package is dispensed, then the conveyor advances to an open area where a robotic arm pours the meal into the package. Afterward, it is positioned below a lid dispenser, before it is pressed and sealed to serve. All these systems are controlled with a programmable logic controller and the positioning is monitored with the use of break beam sensors.

At the moment, the first prototype of the package system has been produced and tested. The main focus is to ensure the repeatability of the workflow required.

Palavras-chave

cozinha autónoma, dispensadores, embalagem, sistema de empratamento, tapete transportador

Resumo

Nos dias de hoje, a existência de robôs a trabalhar colaborativamente com seres humanos é normal. Os serviços de hospitalidade, como os restaurantes, não são diferentes. Estes sistemas automatizados conseguem fazer vários trabalhos como ajudar nas tarefas de *back of the house* como, cortar ingredientes, grelhar e fritar ou nas responsabilidades de *front of the house* como recolher pratos sujos, receber clientes e servir à mesa [2]. O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de empratamento integrado numa cozinha autónoma. Este objetivo vai de encontro ao alívio contínuo de atividades repetitivas no espaço da cozinha e restauração. Os sistemas desenvolvidos até ao momento têm a intenção de empratar refeições simples que necessitem apenas de movimentos básicos, como vazamento da comida de um tacho de confeção para o recipiente.

Foi feito um estudo de mercado de sistemas de aplicações similares na indústria da dispensação, selagem e transporte de bens. Alguns dos exemplos encontrados incluem dispensadores de copos de café, enlatamento de tintas e linhas de produção de comida processada. [3] [19].

Seguidamente, são estudados diferentes conceitos de linhas de produção para o empratamento e dos respetivos sistemas que são implementados, de maneira a determinar a solução mais fiável a aplicar. O conceito definido nesta fase foi similar aos que foram encontrados na indústria [20]. É usado um tapete transportador com vários dispensadores e unidades de selagem instalados no topo deste. Primeiramente é dispensada uma embalagem, de seguida, o tapete move a embalagem para uma área livre onde um braço robótico faz o vazamento da refeição, e o prato é posicionado debaixo de um dispensador que dispensa uma tampa, antes de ser pressionada e selada para servir. Todos estes sistemas são controlados utilizando um controlador lógico programável e o posicionamento do tapete é monitorizado através do uso de sensores de barreira fotoelétricos.

De momento, o primeiro protótipo funcional do sistema de embalagem foi produzido e testado. O foco principal é garantir a repetibilidade do fluxo de trabalho desejado.

Índice

1	Introdução	3
1.1	Enquadramento no âmbito das cozinhas	3
1.2	Enquadramento da empresa	4
1.3	Objetivo	5
1.4	Estruturação do documento	5
2	Revisão do estado de arte	7
2.1	Aplicações semelhantes	7
2.1.1	Robôs e sistemas de <i>front of the house</i>	7
2.1.2	Robôs e sistemas de <i>back of the house</i>	9
2.2	Sistemas e técnicas para aplicação na cozinha automatizada em sistemas de dispensa de refeições	11
2.2.1	Dispensa de embalagens e tampas	11
2.2.2	Sistemas de selagem	14
2.3	Segurança alimentar	16
2.4	Ferramentas de desenvolvimento do produto	17
2.4.1	Modelo de Kano	17
2.4.2	Diagrama de Mudge	17
3	Desenvolvimento de conceitos	19
3.1	Identificação dos requisitos do projeto	19
3.2	Estudo de conceitos para as funções de embalamento e o espaço na cozinha	21
3.2.1	Análise morfológica do sistema e proposta de conceitos	22
3.3	Seleção de conceito	25
4	Projeto mecânico	29
4.1	Primeiro protótipo do dispensador	29
4.1.1	Resultados do primeiro dispensador	29
4.1.2	Medidas a aplicar no segundo dispensador	30
4.2	Segundo protótipo do dispensador	30
4.2.1	Embalagens e tampas circulares	31
4.2.2	Escolha do motor e dimensionamento da correia e polias	32
4.2.3	Dimensionamento dos veios e respetivos apoios	35
4.2.4	Restantes elementos	39
4.3	Sistema de selagem	39

4.4	Dimensionamento do tapete	40
4.4.1	Seleção da tela do tapete e dimensionamento do motor	41
4.5	Montagem final	42
5	Projeto de automação	45
5.1	Tia Portal	45
5.1.1	<i>Grafcet</i>	46
5.1.2	Controlo dos elementos	49
5.2	Comunicação	51
5.2.1	Protocolo de comunicação MQTT	51
5.2.2	Aplicação do protocolo MQTT	53
5.3	Seleção de componentes eletrónicos	54
5.3.1	Drivers	55
5.3.2	Sensores	55
5.3.3	Amplificador de sinal	55
6	Validação e ensaios	57
6.1	Dispensador de embalagens	57
6.2	Dispensador de tampas	58
6.3	Testes gerais	61
7	Conclusão e trabalhos futuros	63
7.1	Conclusões	63
7.2	Trabalhos futuros	64
	Referências	65
A	Desenho de Conjunto do Dispensador de Embalagens	71
B	Desenho de Conjunto do Sistema de Selagem	73
C	Desenho de Conjunto do Sistema Geral	75
D	Tabela do Cálculo à Fadiga do Veio do Dispensador	77
E	Projeto Elétrico	79

Lista de Tabelas

3.1	Tabela de vantagens e desvantagens da forma do circuito.	27
3.2	Diagrama de <i>Mudge</i> da forma do circuito.	27
3.3	Tabela de vantagens e desvantagens dos dispensadores.	28
3.4	Diagrama de <i>Mudge</i> dos dispensadores.	28
4.1	Medidas geométricas das embalagens e tampas circulares.	32
4.2	Resultados de cálculos referentes à correia, polias e forças no veio.	34
4.3	Dados do veio e motor.	34
4.4	Reações nos apoios.	36
4.5	Resultados do momento fletor, nos planos YOZ e XOZ e combinados.	37
4.6	Verificação da pressão de contacto e tensão à flexão do casquilho.	39
4.7	Cálculo da flecha em função do perfil da parede em aço inoxidável AISI 304.	40
4.8	Cálculos de dimensionamento do motor.	42
6.1	Especificações dimensionais de cada espiral utilizada nos teste do dispensador de tampas.	59
6.2	Resultados obtidos nos testes do dispensador de tampas, para diferentes <i>designs</i> da espiral.	60
6.3	Medições de tempo de operação para um ciclo de embalamento (em segundos).	62
D.1	Tabela da fadiga do veio.	78

Lista de Figuras

2.1	Exemplos de robôs empregados de mesa.	8
2.2	Exemplos de robôs hospedeiros.	8
2.3	Sistemas de preparação de sanduíches.	9
2.4	Cozinha autônoma da <i>Spyce</i> [24].	10
2.5	Sistema de confeção de pizzas <i>Picnic</i> [27].	10
2.6	Sistemas autônomos de preparação de bebidas.	11
2.7	Máquina de dispensa de embalagens, <i>Vortex</i> , da empresa <i>MGS Machine</i>	12
2.8	Máquinas de dispensa de embalagens, <i>Screw Denester</i> , da empresa <i>FEMC, Innovative Packaging Machinery</i> [16].	12
2.9	Máquina de dispensa de embalagens, <i>Pick and Slide Denester</i> , da empresa <i>FEMC, Innovative Packaging Machinery</i> [16].	13
2.10	Máquina de dispensa de embalagens, <i>Peel Denester</i> , da empresa <i>FEMC, Innovative Packaging Machinery</i> [16].	13
2.11	Módulo de dispensa de copos, série 674, da empresa <i>Dispensing Components Inc</i> [18].	13
2.12	Máquina de selagem de embalagens, da empresa <i>Proseal Ltd.</i> [19]	14
2.13	Máquinas de <i>horizontal form fill systems</i>	15
2.14	Máquinas de <i>vertical form fill systems</i>	15
2.15	Sistemas de selagem de embalagens snap-on.	16
3.1	Modelo de Kano aplicado ao sistema de empratamento e embalamento de refeições.	20
3.2	Esquema da cozinha automatizada. As linhas amarelas representam pontos de acesso à cozinha. A linha cor-de-laranja representa uma janela para reabastecimento dos dispensadores de ingredientes. A linha azul representa o quiosque de recolha de refeições. Os espaços em branco têm como objetivo facilitar a circulação, para limpeza e manutenção, servir para arrumação de material e potencial expansão dos módulos apresentados.	21
3.3	Embalagens a utilizar na cozinha <i>Cook4Me</i> : embalagem circular para sopas (à esquerda) e paralelepípedica para <i>risottos</i> (à direita).	22
3.4	Diagrama de blocos do sequenciamento de módulos e funções. Os módulos estão representados a amarelo, enquanto que as funções estão a verde.	22
3.5	Análise morfológica.	23
3.6	Abordagens para um circuito linear para dois tipos de embalagens.	24
3.7	Apresentação dos conceitos para desenvolvimento do sistema de empratamento e embalamento.	25
4.1	Representação CAD do primeiro protótipo dos dispensadores.	30

4.2	Representações de forças exercidas no veio de um dispensador.	31
4.3	Esquema das dimensões da embalagem circular.	31
4.4	Representação CAD de uma vista de corte do dispensador.	33
4.5	Esquema de forças, reações e momentos no veio nos dois planos principais.	36
4.6	Gráfico do momento fletor ao longo do comprimento do veio, em z, para os dois planos principais.	37
4.7	Representação da rotação e flecha no veio, nos planos YOZ e XOZ.	38
4.8	Representação do veio e dos pontos de estudo para o teste da fadiga.	38
4.9	Representação do tapete adaptado.	42
4.10	Curva de torque do motor do tapete.	43
4.11	Imagens do protótipo final.	44
5.1	<i>Grafcet</i> do sistema de empratamento e embalamento.	46
5.2	Condições iniciais de segurança do <i>grafcet</i>	47
5.3	Reset das etapas, em caso de emergência.	47
5.4	Transição do estado inicial, S0, para a etapa S1, através de uma mensagem MQTT.	47
5.5	Transição da etapa S1 para a etapa S2, através do sensor I0.1.	48
5.6	Transição da etapa S8 para a etapa S9, através da leitura obtida pela célula de carga.	48
5.7	Transição da etapa S2 para a etapa S3, após a conclusão da translação do tapete.	48
5.8	<i>Network</i> responsável por ativar a rotação do motor do dispensador de embalagens.	50
5.9	Código de contingência para rodar novamente o motor do dispensador de embalagens.	50
5.10	Código das funções de normalização e escala do valor analógico enviado pela célula de carga.	51
5.11	Exemplo representativo do funcionamento do protocolo MQTT.	52
5.12	Arquitetura da comunicação.	53
5.13	Função de <i>trigger</i> para acionar a publicação no servidor MQTT.	54
5.14	Componentes eletrônicos aplicados no sistema de empratamento e embalamento.	54
6.1	Caso de dispensação falhada, nos testes do dispensador de embalagens.	58
6.2	Exemplo de uma situação de encravamento, na qual a tampa fica torta.	59
6.3	Ilustração das falhas na queda da tampa no topo da embalagem.	61

Lista de Variáveis

γ	Coefficiente de segurança
σ_b	Tensão normal
σ_Y	Tensão de cedência
τ_t	Tensão de corte
F_B	Força de aceleração
F_H	Força de elevação
F_R	Força de fricção
F_t	Força tangencial
F_V	Força de pré-tensão da polia
M_b	Momento fletor
m_B	Massa da correia
m_L	Massa da carruagem
m_S	Massa da polia mandada
M_t	Momento torçor
m_Z	Massa da polia tensionadora
m_{Sred}	Massa da polia mandada reduzida
m_{Zred}	Massa da polia tensionadora reduzida
P_c	Pressão de contacto
ω	Velocidade angular
ϕ	Diâmetro da borda da embalagem
ρ	Densidade da polia
B	Largura da polia
d	Diâmetro

I	Momento de inércia
P	Potência
r	Raio
t	Largura da borda da embalagem
v	Velocidade

Capítulo 1

Introdução

Com o avançar da tecnologia, o Homem tem sido capaz de colocar máquinas ao seu serviço, capazes de transformar tarefas repetitivas e desgastantes em funções executadas por sistemas automatizados. Além de eliminar trabalhos mais cansativos e, em alguns casos, potencialmente perigosos, a automação, graças à sua precisão e exatidão, minimiza a margem de erro deste género de operações.

Com esse intuito, a proposta da empresa *Wish and Cook* é de transformar o universo da restauração e *take-away* numa cozinha 100% autónoma, capaz de se adaptar às preferências e constringimentos alimentares dos seus clientes, criando oportunidades no desenvolvimento da automação nesse âmbito.

1.1 Enquadramento no âmbito das cozinhas

Hoje em dia a utilização de *self-service technologies* (SST) ou *self-service kiosks* (SSK) está cada vez mais presente no nosso dia-a-dia. [1] SST é um serviço fornecido a clientes através do uso de tecnologia que depende da interação com trabalhadores humanos [1]. Sendo assim, os clientes são também contribuidores na prestação do serviço. Existem uma vasta gama de serviços nos quais esta realidade está presente, nomeadamente em serviços de hospitalidade, como restaurantes. Atualmente, imensas cadeias de *fast food* dispõem de *tablets* nas suas mesas ou múltiplos ecrãs *touch* verticais nos quais se pode fazer o pedido da refeição e pagamento, sem necessidade de interação com o trabalhador humano [5]. Tipicamente, quando os clientes têm a opção de usar SSTs, estão mais predispostos a gastar dinheiro, porque é mais fácil personalizar o pedido e adicionar extras. A implementação destas tecnologias poderá significar no aumento de vendas e, consequentemente, de lucros [5].

Nos dias de hoje, com o crescimento das zonas urbanas e industriais é cada vez mais importante o desenvolvimento de uma restauração rápida e eficaz que possa satisfazer as necessidades diárias. Sendo assim, o uso destas tecnologias também poderá ter um benefício nos clientes pela rapidez e eficiência que conferem. Numa publicação da revista *International Journal of Hospitality Management* [5] é realizado um estudo num hotel de 300 quartos da Pensilvânia, no qual se analisa a performance de SSKs no ato do *check-in*. Esta performance é avaliada através da medição dos tempos de espera e *service levels* (uma métrica que mede a proporção de clientes que espera menos do que um tempo previamente delineado, neste caso 3 minutos). Durante o estudo variaram o número de

empregados, SSKs utilizados e observaram diferentes períodos, com procuras variáveis. O estudo constatou que em horas de pico de *check-in* os SSKs tiveram um impacto positivo, reduzindo os tempos de espera e aumentando os *service levels*.

1.2 Enquadramento da empresa

A *Wish and Cook* é uma empresa cujo foco é a criação de uma plataforma de receitas de cozinha associadas a um estilo de alimentação saudável, adaptáveis a todo o tipo de pessoas e condições médicas. A 1 de janeiro de 2021 iniciou-se o projeto *Cook4Me*, no qual se enquadra este trabalho. O objetivo do projeto é desenvolver um novo serviço de refeições *takeaway*, através de um sistema autónomo. Com o serviço da cozinha *Cook4Me*, o utilizador poderá aceder à plataforma de receitas, através do *website* da empresa, e escolher a refeição que pretende comer. A plataforma permitirá a personalização das receitas, consoante as preferências e constrangimentos nutricionais do consumidor, minimizando o desperdício alimentar. O cliente também poderá criar receitas de raiz.

O projeto *Cook4Me* tem como objetivo o desenvolvimento do protótipo piloto que incluirá os diversos equipamentos constituintes da cozinha autónoma. O projeto incluirá também a adaptação do software já desenvolvido para a plataforma do *website*, de maneira a que seja articulado com a cozinha *Cook4Me* no agendamento de encomendas e oferta de aconselhamentos nutricionais personalizáveis.

Alguns dos equipamentos da cozinha que o projeto se propôs a desenvolver incluem: instrumentos de confeção, doseamento de ingredientes, empratamento, armazenamento e entrega de refeições, lavagem de equipamentos de confeção e controlo e monitorização de refeições, através de equipamentos de visão. Até à data de início do presente trabalho, o foco tem sido o desenvolvimento dos instrumentos de confeção e equipamentos de doseamento de refeições.

É importante que referir durante o desenvolvimento da cozinha *Cook4Me* teve-se em atenção as normas de segurança e higiene exigidas pela legislação portuguesa. Segundo a AHRESP (Associação da Hotelaria, Restauração e Similares de Portugal) existem diversas condições que devem ser respeitadas nos serviços de restauração, em concreto para *takeaway*. O documento “Restauração e Bebidas – Guia de Boas Práticas”, validado pela DGS (Direção-Geral da Saúde), apresenta as respetivas indicações, nomeadamente: os materiais dos utensílios e caixas que contactam com os alimentos - denominados FCM (*Food Contact Materials*) - devem ser próprios para o efeito e estarem num estado adequado de higiene e conservação; qualquer embalagem destinada a conter alimentos deverá ter a menção “próprio para alimentos” ou um símbolo (copo e garfo), caso não seja evidente que se destina a entrar em contacto com géneros alimentícios [30].

No transporte de géneros alimentícios para entrega ao domicílio, as refeições confeccionadas devem manter uma temperatura recomendada superior 65°C, podendo ter um desvio aceitável de -5°C [30]. Apesar de serem valores relacionados com entregas ao domicílio, os mesmos podem servir de objetivo a respeitar na cozinha *Cook4Me*. Como tal, será necessário definir estratégias para garantir as condições legisladas.

O trabalho desenvolvido ao longo do estágio na empresa *Wish and Cook*, foi realizado em colaboração com a respetiva equipa e outros estudantes do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica.

1.3 Objetivo

O objetivo deste projeto é conceber e construir um protótipo funcional de um sistema de empratamento e embalagem de refeições para a cozinha automatizada da *Wish and Cook*.

Serão analisados possíveis conceitos a implementar, com base nas exigências e constrangimentos de interação com os outros elementos da cozinha. O sistema a desenvolver será capaz de fazer o empratamento e disponibilização da embalagem, sem comprometer a integridade do conteúdo produzido. Isto é, o circuito que a refeição percorrerá desde o embalagem até à entrega tem de prevenir derrames da comida e minimizar falhas, para manter a qualidade do produto.

O projeto será devidamente documentado durante a sua realização, desde desenhos de conjunto dos sistemas desenvolvidos até aos projetos elétrico e de automação.

Numa fase final, para efeitos de validação do projeto realizado, pretende-se avaliar a performance de um protótipo físico que permita encontrar potenciais falhas e pontos de melhoria que possam servir de direções futuras para a continuação e progressão do desenvolvimento do sistema de empratamento e embalagem.

1.4 Estruturação do documento

Este documento está organizado em sete capítulos. O primeiro deles é a introdução no qual se faz a apresentação e enquadramento do projeto a desenvolver e da empresa *Wish and Cook*. Também se apresentam os objetivos definidos.

Segue-se o capítulo de revisão do estado de arte no qual é feita uma contextualização do impacto da automação nos serviços de hospitalidade, em particular em restaurantes, e são apresentadas diversas aplicações tecnológicas com objetivos semelhantes aos deste projeto. Também é feita uma exposição de tecnologias de âmbito industrial que podem ser adaptadas e adotadas às soluções a desenvolver.

O terceiro capítulo aborda o desenvolvimento de conceitos, através da informação recolhida no capítulo anterior. Com o auxílio de ferramentas como o modelo de *Kano* e o diagrama de *Mudge* é realizada uma hierarquização dos requisitos e conceitos, respetivamente, de maneira a determinar as direções do projeto de engenharia mais adequadas.

No quarto capítulo, é desenvolvido o projeto mecânico das soluções que são definidas no capítulo anterior. Faz-se o dimensionamento de motores e elementos mecânicos para garantir um bom desempenho e durabilidade do protótipo. Os desenhos de conjunto das soluções projetadas nesta fase são apresentados nos apêndices do documento, podendo obter uma visão geral da lista de componentes que constituem o protótipo final.

No capítulo seguinte são apresentados os projetos elétrico e de automação do protótipo. São apresentados os elementos eletrónicos selecionados, desde motores, sensores, fontes de alimentação, entre outros. O projeto elétrico, propriamente dito, segue nos apêndices. Também é abordada a forma de controlo do sistema, que é feito utilizando um controlador lógico programável (PLC), e da comunicação com outros equipamentos da cozinha, através de um protocolo de comunicação MQTT.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos pelos testes de validação do protótipo desenvolvido. O objetivo destes ensaios é analisar falhas nos sistemas desenvolvidos, bem como determinar a repetibilidade do protótipo, pelo que são realizados múltiplos testes, para validar a credibilidade dos resultados extraídos.

Por fim, no último capítulo extraem-se conclusões acerca do projeto realizado e são delineados trabalhos futuros, tendo em atenção os objetivos traçados no início do trabalho.

Capítulo 2

Revisão do estado de arte

O foco deste trabalho é o desenvolvimento dos sistemas de empratamento e embalamento de refeições. Para tal, é necessária uma pesquisa da tecnologia existente para as funções desejadas.

Sendo assim, numa primeira parte são apresentadas aplicações semelhantes existentes no mercado, sendo que a maioria não cumpre todos os requisitos que se pretendem atingir na cozinha autónoma *Cook4Me*, mas podem servir de exemplos a seguir. Seguidamente, faz-se uma amostra de soluções aplicadas no mercado para a dispensa de recipientes e tampas. Também se apresentam tecnologias utilizadas na selagem de embalagens, bem como limitações. É feita uma breve contextualização de requisitos necessários para cumprir legislação de entregas *takeaway*.

Por fim, faz-se uma introdução teórica às ferramentas de desenvolvimento de produto utilizadas no desenvolvimento do conceito.

Os exemplos demonstrados nas secções que se seguem são, de um modo geral, apenas similares, uma vez que a aplicação de sistemas semelhantes na restauração é reduzida, muito menos de maneira 100% autónoma.

2.1 Aplicações semelhantes

Hoje em dia são vários os exemplos de cozinhas automatizadas ou semi-automatizadas em que os sistemas desenvolvidos são colaborativos ou complementares às ações que os trabalhadores humanos exercem.

Robôs ou, simplesmente, sistemas automatizados podem ser utilizados em tarefas de *front of the house* ou *back of the house*. As tarefas de *front of the house* definem uma lista de funções que acontecem na sala de refeições de um restaurante, algumas das quais poderão necessitar de um contacto direto com o cliente, enquanto que as tarefas *back of the house* constituem encargos da cozinha, ou seja, uma interação com os trabalhadores humanos. Tipicamente, as ações realizadas por estes sistemas são rotineiras e repetitivas, dando a oportunidade aos trabalhadores de se focarem em tarefas mais complexas ou nos clientes, uma vez que, naturalmente, a sua satisfação é o objetivo principal [2].

2.1.1 Robôs e sistemas de *front of the house*

Os robôs desenvolvidos para auxílio nas tarefas de *front of the house* são designados de robôs de serviço. Tipicamente, têm uma morfologia mais antropométrica. Uma vez

que pretendem ajudar ou até substituir o ser humano, a figura humana pode facilitar a interação com o consumidor. Os robôs de serviço estão divididos em duas categorias: robô hospedeiro e robô empregado de mesa [2].

Os robôs hospedeiros auxiliam na recepção, proporcionam entretenimento e respondem a possíveis dúvidas que o cliente possa colocar, caso tenham uma inteligência artificial. Alguns exemplos incluem: o robô hospedeiro do restaurante TanukiTM, no Dubai, [2] que recebe os clientes, oferece cupões e até é capaz de fazer sugestões de refeições com base nas preferências do cliente; e o *Greeting Robot*TM da empresa *Orion Star* que também comunica e promove o restaurante aos clientes [6].



(a) Robot do restaurante *Tanuki*, no Dubai [2]. (b) *Greeting Robot*TM, da empresa *Orion Star* [6].

Figura 2.1: Exemplos de robôs empregados de mesa.

Os robôs empregados de mesa, através de câmaras LIDAR (*Light Detection and Ranging*), são capazes de reconhecer obstáculos e ajustar a sua rota em função deles. Um laser emite pulsos de luz (a frequências que o olho humano não reconhece) para o ambiente que rodeia. A luz é refletida de volta para o robô e em função do tempo necessário para completar a reflexão do feixe de luz e do seu ângulo, o aparelho é capaz de calcular a distância e posição do obstáculo. Alguns exemplos, ilustrados na figura 2.2, incluem: o *Servi*TM, da empresa *Bear Robotics* [2] e o robô *Lucki*TM [7] da *Orion Star*, cujas funções são fazer o transporte de bebidas, refeições e loiça. De notar, que em ambos os casos, a carga e descarga dos utensílios que os robôs deslocam está dependente da ação humana.



(a) *Servi*, da empresa *Bear Robotics*.

(b) *LuckiBot*, da empresa *Orion Star*.

Figura 2.2: Exemplos de robôs hospedeiros.

São soluções facilmente adaptáveis no âmbito da restauração e que podem ser aproveitadas na cozinha *Cook4Me* para movimentação de ingredientes, refeições prontas ou loiças, mas teriam que ser adaptadas para se tornarem completamente autônomas e evitar que alguém tenha de fazer a carga e descarga destes robôs.

2.1.2 Robôs e sistemas de *back of the house*

Enquanto que os robôs anteriores têm características antropomórficas, para facilitar a interação com os clientes, os robôs e sistemas automatizados de *back of the house* têm um aspeto mais industrial. Em alguns casos, estes sistemas apenas são responsáveis por tarefas específicas ou dar alguma assistência ao trabalhador. Também existem exemplos de aplicações que são sistemas integrais responsáveis por aglomerar os diversos processos de preparação e confeção de refeições [2].

A *Miso Robotics* desenvolveu um braço robótico colaborativo de seis eixos, denominado de *Flippy*TM [2], responsável por uma estação de grelhados, nomeadamente batatas fritas e hambúrgueres. Através de sensores laser, o sistema deteta a presença de humanos na sua área de trabalho, parando a sua atividade e apenas retomando quando estes abandonam a zona de trabalho. Graças aos vários sensores térmicos e de cor, o sistema é capaz de reconhecer o estado da confeção, monitorizar as temperaturas atingidas, e em função disso adaptar o tipo de ferramentas de culinária que utiliza e adaptar as suas trajetórias [9] [10].



(a) Robô colaborativo, *Flippy*TM, da *Miso Robotics* a preparar hambúrgueres [25].



(b) Unidade de montagem de sanduíches da *Creator Inc* [26].

Figura 2.3: Sistemas de preparação de sanduíches.

A empresa *Creator Inc.* [8] desenvolveu um sistema praticamente autônomo de preparação de sanduíches, uma vez que apenas necessita de ação humana para a preparação de molhos, descascar e lavar vegetais e fechar a sanduíche. As restantes tarefas são da responsabilidade do sistema [2] [9].

Um outro exemplo de um sistema autônomo de confeção é a cozinha *Spyce* [2], que confeciona refeições com bases de arroz. A cozinha utiliza dispensadores com ingredientes previamente cortados e preparados. Após a realização de um pedido, a massa requerida de ingredientes é dispensada para copos, monitorizando a dispensa através de células de carga. Os ingredientes são colocados numa *wok*, que troca calor através de indução, girando constantemente para proporcionar uma confeção uniforme e consistente. No final da confeção, a refeição é despejada num recipiente que um operador humano complementa com *toppings* para depois selar e entregar a embalagem ao cliente [9] [10]. Apesar de não ser um sistema inteiramente automatizado é dos mais completos na preparação de

refeições *takeaway*. De todos os exemplos encontrados é o que, do ponto de vista de engenharia, mais se assemelha à visão da cozinha *Cook4Me*. No entanto, o empratamento final, embalagem da refeição e a sua entrega são feitos por mãos humanas, que é um desafio grande no projeto *Cook4Me*, e em particular neste trabalho.



(a) Vazamento da refeição da *wok* para o recipiente.



(b) Zona de *toppings* e entrega da refeição ao cliente.

Figura 2.4: Cozinha autónoma da *Spyce* [24].

A *Picnic* [11] é uma unidade de confeção de pizzas. Trata-se de uma linha de montagem de toppings de pizza com vários módulos que incluem: dispensador e espalhador de molho e ingredientes granulados, como queijos, carnes e vegetais pré-laminados. A massa da pizza é colocada por um empregado humano no ponto inicial do circuito e movimentada ao longo de um tapete durante o processo, passando pelos vários módulos de montagem da pizza. No fim, a pizza é colocada no forno para cozer. Como se pode observar na subfigura 2.5a, os espalhadores são tapetes posicionados transversalmente à direção do tapete principal. Enquanto o tapete deixa cair os ingredientes, movimenta-se para a frente e para trás, permitindo uma queda uniforme dos *toppings* na massa [9].



(a) Espalhador de ingredientes.



(b) Empregado a colocar a massa da pizza no sistema automático.

Figura 2.5: Sistema de confeção de pizzas *Picnic* [27].

A *Speedy Eats* [12] também é uma cozinha especializada em pizzas, mas cujo conceito é diferente. O foco é principalmente a cozedura, embalagem e entrega da pizza automaticamente. Inicialmente, uma pizza previamente preparada encontra-se no frigorífico. Depois, por ação de um sistema de eixos XY com correia, é pousada num tapete onde irá passar num módulo de cozedura para depois se fechar a embalagem. Seguidamente, a

pizza é armazenada numa zona de espera até que o cliente esteja pronto para a entrega.

A *Blendid* [13] é uma estação de preparação de batidos, equipada com dispensadores de ingredientes, um manipulador articulado de seis eixos com um *gripper* e um objeto que movimenta o batido até ao cliente, atuado magneticamente. O robô é responsável pelas ações de *pick and place* de ingredientes e vazamento do batido no recipiente, controlado por equipamentos de visão. O sistema faz a sua própria limpeza, necessitando apenas de alguma intervenção humana de manutenção periódica [9].

A *CafeX* [14] é um serviço de preparação de bebidas quentes e frias, como café, chá, chocolate, limonada, entre outros. O serviço é feito, tal como no exemplo anterior, através da atuação de um manipulador robótico de seis eixos. A estação também é equipada com dispensadores de gelo, água e concentrados, máquinas de café expresso e janelas para entrega das bebidas [2] [9].



(a) Estação de preparação de batidos da *Blendid* [28].



(b) Estação de preparação de bebidas da *CafeX* [29].

Figura 2.6: Sistemas autónomos de preparação de bebidas.

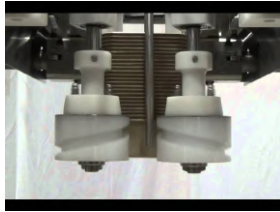
Atualmente, o que está em falta na maior parte das máquinas, é a presença de sistemas de lavagem e limpeza automatizados, sendo a *Blendid* uma das raras exceções [2].

2.2 Sistemas e técnicas para aplicação na cozinha automatizada em sistemas de dispensa de refeições

2.2.1 Dispensa de embalagens e tampas

Para tornar o processo de embalagem 100 % automatizado é necessário encontrar e adaptar soluções de dispensa de embalagens e de tampas. Um exemplo de dispensa rápida de embalagens é a máquina *Vortex* [15], da empresa *MGS Machine*. A máquina dispõe de quatro veios motorizados com uma espiral na ponta de cada um. Ao rodar uma volta completa, a embalagem que está apoiada na espiral desce até cair na plataforma. Como se pode observar na figura 2.7, as embalagens estão organizadas em linhas e antes da sua dispensa estão empilhadas em conjuntos de cerca de 40 unidades. É possível admitir que um sistema destes é capaz de dispensar embalagens durante extensos períodos de tempo, sem ser necessário fazer um reenchimento das embalagens.

A empresa *FEMC, Innovative Packaging Machinery* [16] apresenta uma solução semelhante aos dispensadores em espiral vistos anteriormente. Em acréscimo apresenta mais soluções para a aplicação de vários conjuntos de embalagens. Além de ter uma



(a) Espiral que dispensa a embalagem.

(b) Série *in-line* de conjuntos de embalagens.Figura 2.7: Máquina de dispensa de embalagens, *Vortex*, da empresa *MGS Machine*.

opção *in-line*, também apresenta acomodação de conjuntos de embalagens em círculo, com um sistema de carrossel rotativo. As soluções estão apresentadas na figura 2.8.

(a) Série *in-line* de pilhas de embalagens.

(b) Carrossel rotativo de pilhas de embalagens.

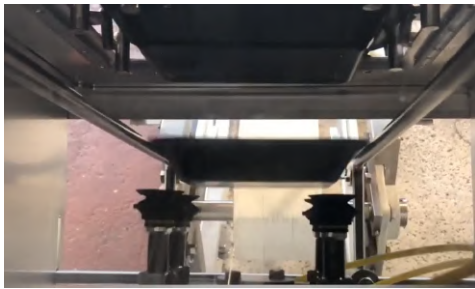
Figura 2.8: Máquinas de dispensa de embalagens, *Screw Denester*, da empresa *FEMC, Innovative Packaging Machinery* [16].

Esta mesma empresa demonstra outras soluções de dispensa de embalagens, nomeadamente a solução *Pick and Slide* [16]. Esta opção utiliza ar comprimido para pegar na embalagem uma a uma e solta-a numa rampa que, de seguida, chega ao tapete ou superfície em que se pretende colocar o recipiente, como demonstrado na figura 2.9.

Outra tecnologia de dispensa similar é o *Peel*, ilustrada na figura 2.10 [16]. Nesta solução, a máquina tem um par de veios, que rodam simultaneamente em lados opostos da embalagem. Cada um dos veios tem um acessório excêntrico que penetra na ranhura entre as embalagens, separa-as e remove-a da pilha de embalagens.

Por fim, ainda apresentam uma solução compatível para embalagens e tampas. A máquina *Pick and Place Denester* [16] permite remover objetos, principalmente tampas e coberturas, com o auxílio de ar comprimido e colocá-las com precisão numa zona predeterminada.

A empresa *Dispensing Components Inc* [17] desenvolve diversas soluções para dispensação de copos em máquinas de café. Um dos modelos, da série 674 [18], está representado na figura 2.11. Podemos observar que os copos são dispensados através da ação de um fuso, tal como em exemplos anteriores. No entanto, estas espirais são solidárias a uma engrenagem que gira num sistema de engrenagens planetário, dentro da carapaça do módulo de dispensa.



(a) Ventosas responsáveis por remoção da embalagem.

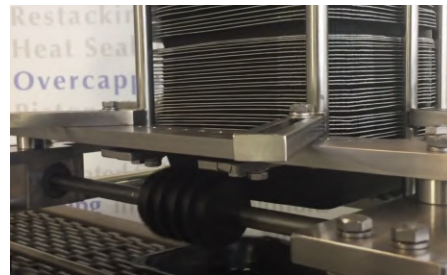


(b) Rampa por onde desce a embalagem.

Figura 2.9: Máquina de dispensa de embalagens, *Pick and Slide Denester*, da empresa *FEMC, Innovative Packaging Machinery* [16].



(a) Acessório excêntrico (laranja).



(b) Perspetiva geral da máquina.

Figura 2.10: Máquina de dispensa de embalagens, *Peel Denester*, da empresa *FEMC, Innovative Packaging Machinery* [16].



Figura 2.11: Módulo de dispensa de copos, série 674, da empresa *Despending Components Inc* [18].

2.2.2 Sistemas de selagem

Existe uma vasta rede de métodos de embalagem e selagem de produtos alimentares. A maioria destes utiliza um filme de plástico, mas alguns fazem apenas o fecho da embalagem com uma tampa. Dentro das soluções com um filme de plástico, existem os seguintes exemplos disponíveis no mercado [19].

A primeira é um *tray sealer*, que é um selador de embalagens, utilizado na indústria de embalagem de refeições. Uma máquina destas é capaz de selar múltiplas embalagens ao mesmo tempo. O tempo de operação destas máquinas é relativamente curto, cerca de 4 segundos. Imaginando que uma máquina faz a selagem de 4 embalagens em simultâneo, com um ciclo de operação de 4 segundos, obtém-se um output de 60 embalagens por minuto [19].

Estas máquinas são capazes de realizar a operação de selagem a mais do que uma embalagem, em simultâneo. Inicialmente, os recipientes cheios são colocados em linha, pela ação de um tapete e guias laterais que corrigem a posição das embalagens, como se pode observar na figura ???. Quando o primeiro recipiente da linha atinge o fim do tapete este é parado por uma barreira pneumática. O tapete, que continua a trabalhar, posiciona uma série de recipientes lado a lado com precisão, até atingir-se o número máximo de embalagens por operação. Seguidamente, uns braços agarram um número predefinido de recipientes, devidamente posicionados, e são colocados na zona de selagem propriamente dita, entre as ferramentas superior e inferior. Os braços laterais afastam-se durante a selagem e voltam a pegar nos recipientes no fim, para remover as embalagens seladas. O filme que é colocado no topo das embalagens é proveniente de um rolo de filme que é desenrolado para a área de selagem entre as ferramentas de selagem. A ferramenta superior é uma placa que permite a condução de calor do filme para a embalagem, garantindo uma selagem eficaz. A ferramenta inferior tem uns insertos de borracha para garantir que, quando as duas ferramentas se juntam, com o recipiente e filme no meio, existe uma pressão igualmente distribuída [19].

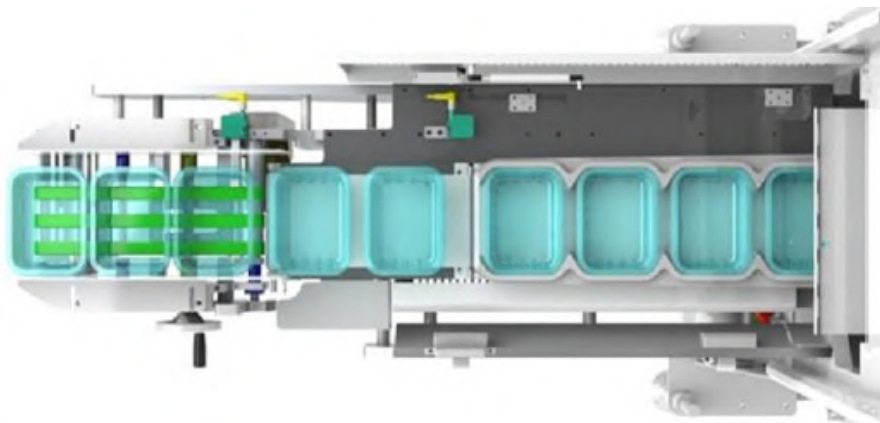
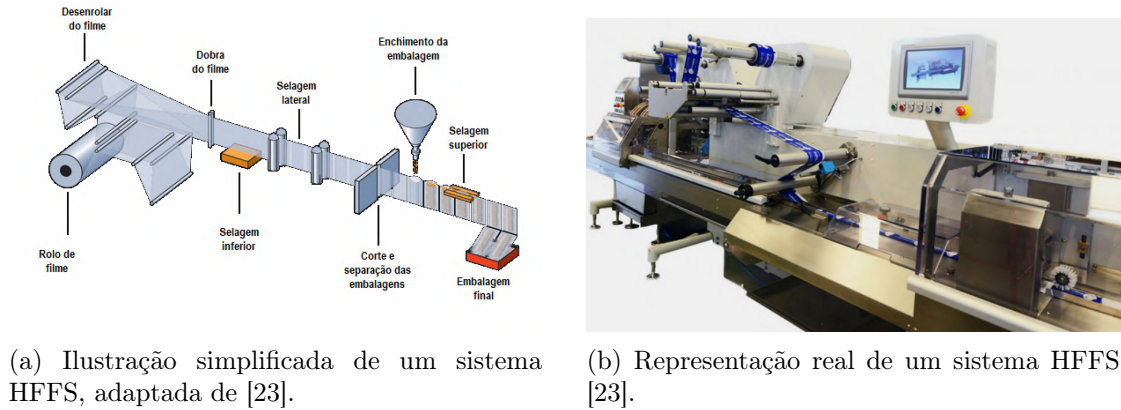


Figura 2.12: Máquina de selagem de embalagens, da empresa Proseal Ltd. [19]

Uma grande desvantagem destas máquinas é que os braços e as ferramentas dependem das dimensões geométricas da embalagem a selar, ou seja, as máquinas apenas conseguem realizar operações para um tipo de embalagem de cada vez. Caso haja necessidade de selar tipos diferentes de embalagens tem de se proceder à alteração de ferramentas e outros acessórios [19].

Uma outra opção são os sistemas de *horizontal form fill seal* (HFFS) [19]. A diferença deste equipamento em relação ao anterior é que este realiza a termoformação do recipiente. O resto do processo realiza-se da mesma forma. Neste caso, a ação da formação dos recipientes limita o output de embalagens seladas, uma vez que se trata de uma operação mais demorada.

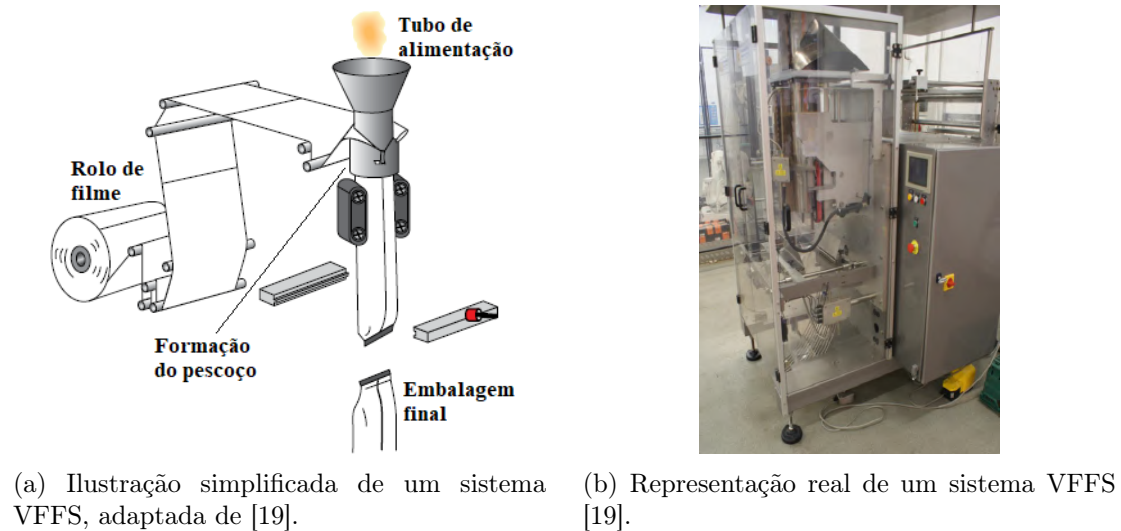


(a) Ilustração simplificada de um sistema HFFS, adaptada de [23].

(b) Representação real de um sistema HFFS [23].

Figura 2.13: Máquinas de *horizontal form fill systems*.

Também existem os sistemas de *vertical form fill seal* (VFFS) [19], cuja aplicação é diferente dos anteriores. Estas máquinas são usadas na selagem de *snacks*, congelados, cereais, entre outros. Um filme de plástico, que corre num circuito vertical, é conformado numa forma tubular e selado na abertura inferior. De seguida, o conteúdo é colocado no saco e o topo do mesmo é selado, pela ação de umas mandíbulas de vedação que conduzem calor. O saco selado é separado do restante filme, reiniciando o processo. As velocidades de operação destas máquinas variam em função do tipo, da dimensão e quantidade de comida a embalar, conseguindo chegar a *outputs* de 200 embalagens seladas por minuto.



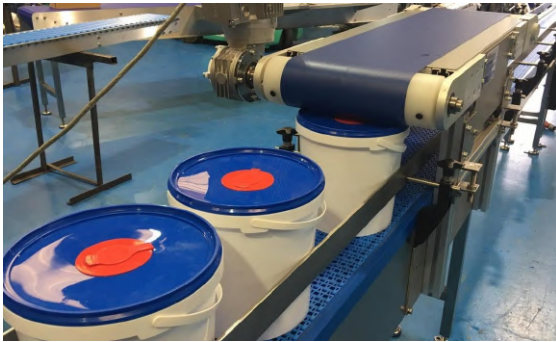
(a) Ilustração simplificada de um sistema VFFS, adaptada de [19].

(b) Representação real de um sistema VFFS [19].

Figura 2.14: Máquinas de *vertical form fill systems*.

Também existem sistemas desenvolvidos, industrialmente, para embalagens ou con-

tentores *snap-on*, utilizados no embalamento de géneros alimentícios. Algumas das soluções incluem o uso de tapetes ou rolos e prensas para o fecho correto da tampa. Encontram-se soluções automatizadas nas quais as embalagens percorrem um circuito pré-definido num tapete rolante, embora também existam casos mais rudimentares de máquinas que são de uso manual ou semi-manual com o acionamento de uma prensa automática com um botão, mas com posicionamento manual da embalagem e tampa [19].



(a) Máquina para selagem de embalagens com um tapete rolante, da empresa C-Trak Ltd [21].



(b) Máquina para selagem de embalagens com uma prensa.

Figura 2.15: Sistemas de selagem de embalagens snap-on.

Caso uma linha de produção disponha apenas de um tipo de embalagens a solução de selagem com um tapete pode ser adequada. É colocado um tapete rolante, com uma ligeira inclinação na linha, conforme representado na sub-figura 2.15a. As tampas, pré-posicionadas no topo da embalagem, são gradualmente prensadas pelo tapete contra o recipiente. No fim do tapete superior, a aplicação da tampa e selagem encontra-se concluída [21]. Uma solução similar é a utilização de um rolo, no lugar do tapete [22].

Existem outras soluções em que se utiliza uma prensa para selar a embalagem. Se a área de selagem da prensa for compatível com diferentes embalagens é possível, numa mesma linha, ter embalagens diferentes.

2.3 Segurança alimentar

Segundo a AHRESP (Associação da Hotelaria, Restauração e Similares de Portugal) existem diversas condições que devem ser respeitadas nos serviços de restauração, em concreto para *takeaway*. O documento “Restauração e Bebidas – Guia de Boas Práticas”, validado pela DGS (Direção-Geral da Saúde), apresenta as respetivas indicações, nomeadamente: os materiais dos utensílios e caixas que contactam com os alimentos - denominados FCM (*Food Contact Materials*) - devem ser próprios para o efeito e estarem num estado adequado de higiene e conservação; qualquer embalagem destinada a conter alimentos deverá ter a menção “próprio para alimentos” ou um símbolo (copo e garfo), caso não seja evidente que se destina a entrar em contacto com géneros alimentícios [30].

No transporte de géneros alimentícios para entrega ao domicílio, as refeições confeccionadas devem manter uma temperatura recomendada superior 65°C , podendo ter um desvio aceitável de -5°C [30]. Apesar de serem valores relacionados com entregas ao domicílio, os mesmos podem servir de objetivo a respeitar na cozinha *Cook4Me*. Como tal, será necessário definir estratégias para garantir as condições legisladas.

2.4 Ferramentas de desenvolvimento do produto

Nesta secção são apresentadas duas ferramentas utilizadas no âmbito do desenvolvimento de produto, que foram necessárias para a realização deste trabalho.

2.4.1 Modelo de Kano

O modelo de Kano é uma ferramenta gráfica de categorização de requisitos para a satisfação do cliente. Ao contrário de outros modelos em que quanto mais atributos melhor, no modelo de Kano existe uma distinção dos atributos, com base no desempenho e satisfação consequente para o cliente [36].

Desta forma, os requisitos são divididos em 3 categorias: obrigatórios, unidimensionais e atrativos. Os requisitos obrigatórios representam as características essenciais do produto, cuja adoção é indispensável para o bom desempenho do mesmo e a ausência cria insatisfação extrema no cliente e, possivelmente, perda de funcionalidade do produto. Os requisitos unidimensionais também são esperados pelo cliente. De uma forma linear, quanto melhor o seu desempenho, maior será a satisfação do cliente. Por fim, os requisitos atrativos são encontrados na adição de características que não influenciam imensamente a funcionalidade do produto, mas podem aumentar a satisfação do cliente, pois são inesperados e surpreendentes [36].

No âmbito deste projeto, o produto não estará em contacto direto com o cliente, uma vez que o consumidor não interage diretamente com o sistema de embalamento da cozinha. No entanto, esta ferramenta é importante para identificar as características que merecem maior realce em cada sistema, de maneira a obter uma melhor performance geral. Na fase de desenvolvimento, o conhecimento dos atributos mais desejados pode auxiliar na focalização de recursos do projeto, como tempo, material e equipamentos.

2.4.2 Diagrama de Mudge

O diagrama de Mudge é uma ferramenta que permite fazer a comparação relativa entre critérios, através de um sistema de pontuação. Os dados são representados numa matriz triangular sendo feita a comparação entre todos os critérios abordados. No final, é calculada a pontuação relativa final de cada critério e é declarada uma hierarquização dos mesmos [36].

Neste diagrama, as pontuações atribuídas podem ser alteradas, em função da quantidade de critérios em comparação. Um exemplo de pontuação é o seguinte: 0 (quando os dois critérios apresentam igual importância), 1 (pouco mais importante), 3 (mais importante) e 5 (muito mais importante).

Neste projeto, o diagrama foi utilizado para comparar e auxiliar na escolha de conceitos a implementar no desenvolvimento do sistema de empratamento e embalamento.

Capítulo 3

Desenvolvimento de conceitos

Numa primeira fase foi apresentado pela empresa o trabalho desenvolvido até à data no âmbito do projeto *Cook4Me*, nomeadamente nos módulos de dispensação de ingredientes e confeção. Foi apresentada, também, a visão para os módulos de lavagem e secagem da loiça e entrega de refeições e a forma como estes poderiam ser integrados com o restante conceito da cozinha autónoma. A partir de algumas características da cozinha, como o número de estações e tempo de confeção, condições mínimas requeridas para consumo e tipo de refeições foi possível determinar alguns requisitos para o sistema de empratamento e embalagem de refeições.

3.1 Identificação dos requisitos do projeto

Uma vez que o sistema desenvolvido não envolve contacto direto com o cliente, os atributos definidos no modelo de *Kano* são fruto de necessidades identificadas pela equipa do projeto. Tipicamente, o modelo de *Kano* é estabelecido através de pesquisa e inquéritos ao público-alvo, no entanto, neste âmbito determinou-se que os requisitos provêm de necessidades e prioridades apresentadas pela empresa.

Os requisitos abordados estão representados, de maneira sucinta, no modelo de *Kano* que se segue, na figura 3.1.

Identificam-se os seguintes requisitos obrigatórios: 1) output de refeições em intervalos de 2 minutos, para igualar o fluxo médio de refeições no módulo de confeção; 2) cumprir requisitos legais de higiene e elementos em contacto com os alimentos; 3) a embalagem tem de estar bem selada para garantir que não há entornamento do conteúdo e manter um aspeto limpo para o cliente; 4) interação e comunicação com os sistemas de confeção e entrega de refeições.

Também são definidos alguns requisitos unidimensionais: 5) garantir um percurso rápido e eficiente das refeições; 6) aplicabilidade de várias embalagens para assegurar que o sistema funciona corretamente para uma maior gama de embalagens, atribuindo flexibilidade; 7) o sistema concebido tem de ser modular e expansível, para facilitar a sua adaptação ao espaço da cozinha;

Para concluir a lista de requisitos foi assinalado um aspeto atrativo, cujo bom funcionamento traz um valor acrescentado ao sistema: 8) ter ações que previnam e limpem falhas no sistema.

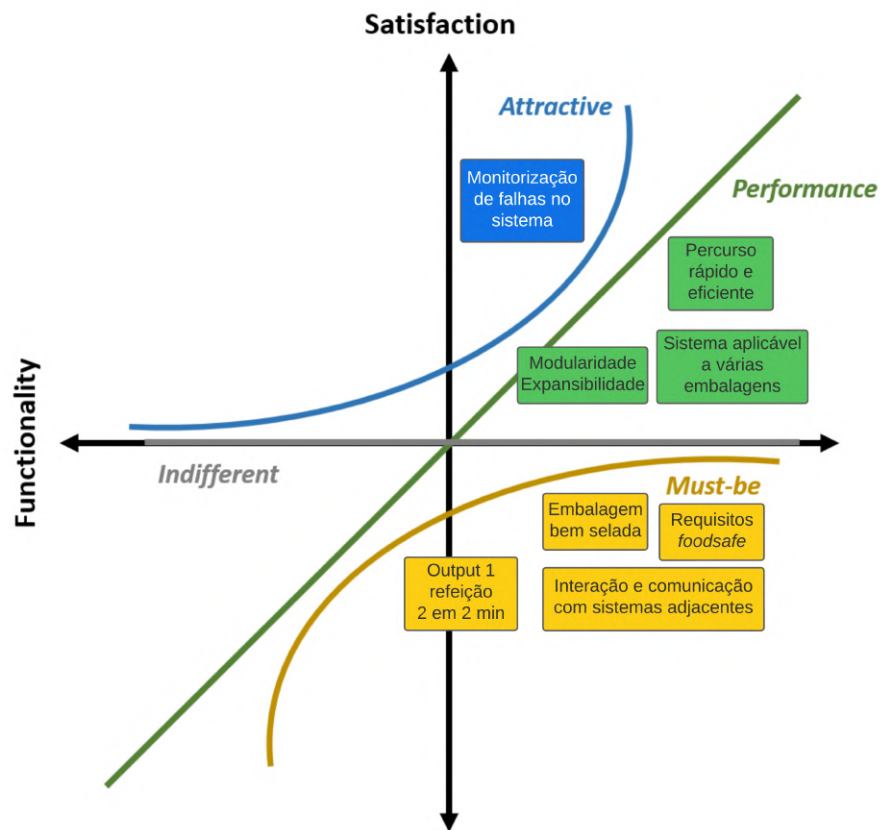


Figura 3.1: Modelo de Kano aplicado ao sistema de empratamento e embalamento de refeições.

3.2 Estudo de conceitos para as funções de embalagem e o espaço na cozinha

Para melhor estudar os conceitos para as funções do sistema de embalagem é importante ter uma ideia das limitações espaciais existentes na cozinha. Desta forma, apresenta-se na figura 3.2 o *layout* da mesma. O *layout* ilustrado é o mais recente. Ao longo do estágio, o mesmo foi sofrendo alterações, pelo que alguns dos conceitos demonstrados neste capítulo foram ponderados antes da finalização da configuração. A estrutura da cozinha é um contentor modular com as dimensões da vista de topo apresentadas na figura 3.2.

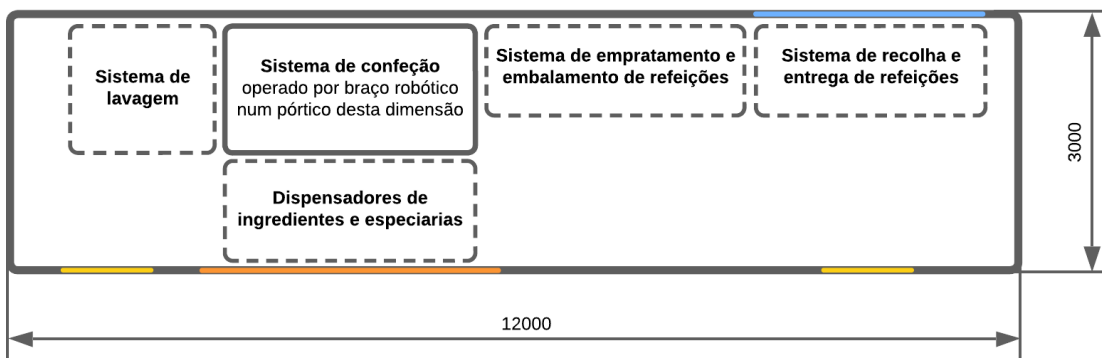


Figura 3.2: Esquema da cozinha automatizada. As linhas amarelas representam pontos de acesso à cozinha. A linha cor-de-laranja representa uma janela para reabastecimento dos dispensadores de ingredientes. A linha azul representa o quiosque de recolha de refeições. Os espaços em branco têm como objetivo facilitar a circulação, para limpeza e manutenção, servir para arrumação de material e potencial expansão dos módulos apresentados.

É importante referir que, nesta fase do trabalho, pretende-se fazer o empratamento em dois tipos de embalagens diferentes, que estão representados na figura 3.3. Este é um dado importante porque a solução aplicada terá de ser capaz de se adaptar a estas embalagens, concretamente. O objetivo é que a solução final consiga adaptar-se a outros tipos de embalagens que surjam, posteriormente.

Primeiramente, é importante listar e organizar todas as funções necessárias no sistema de empratamento e embalagem, desde a finalização da confeção até à refeição pronta para entrega. Também se pensa como se processará a fase posterior de entrega da refeição ao cliente. Sendo assim, pode-se fazer a divisão de tarefas nos seguintes módulos: empratamento e embalagem, armazenamento, entrega no quiosque e zona de armazenamento de refeições não recolhidas. Este trabalho foca-se apenas no desenvolvimento do módulo de empratamento e embalagem, cujas funções podem ser divididas da seguinte forma: dispensação de embalagem, empratamento na embalagem, dispensação de tampa e selagem. Os módulos restantes são desenvolvidos por outros membros da equipa, mas em colaboração próxima com este trabalho para garantir, numa fase final, um funcionamento harmonioso. No diagrama de blocos da figura 3.4, pode-se observar o fluxo das etapas que se pretendem adotar no sistema a conceber.



Figura 3.3: Embalagens a utilizar na cozinha *Cook4Me*: embalagem circular para sopas (à esquerda) e paralelepípedica para *risottos* (à direita).

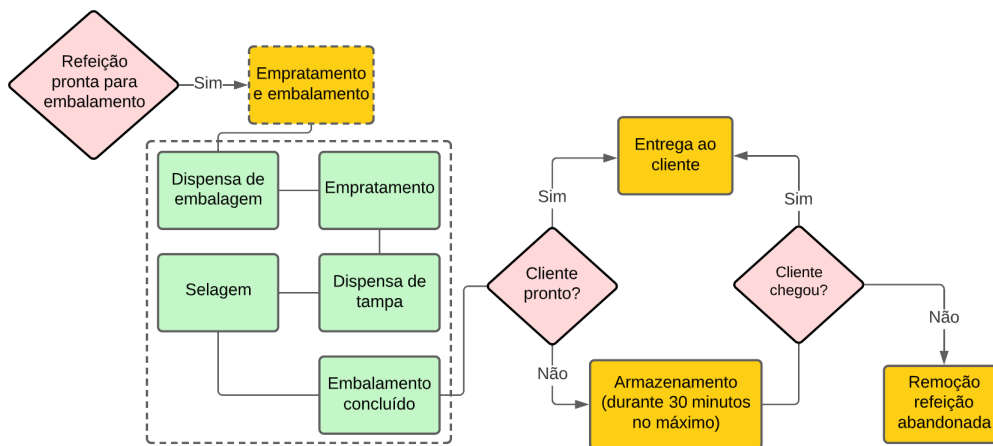


Figura 3.4: Diagrama de blocos do sequenciamento de módulos e funções. Os módulos estão representados a amarelo, enquanto que as funções estão a verde.

3.2.1 Análise morfológica do sistema e proposta de conceitos

A análise morfológica é uma técnica de geração de ideias que permite analisar aprofundadamente e organizar ideias e soluções para aplicar no desenvolvimento de um produto. Utilizando uma matriz, cruzam-se os componentes de um problema com as possíveis soluções [36]. Neste caso concreto, fez-se uma análise dos tipos de circuito do sistema e das soluções concretas para os sistemas de dispensação, selagem e transporte.

O sistema de empratamento e embalagem é afetado pela necessidade de existirem diferentes tipos de embalagens. Podem-se explorar soluções flexíveis para a dispensação, adaptáveis a diversos tipos de embalagens ou soluções rígidas, únicas para cada tipo de embalagem. A análise morfológica é apresentada na figura 3.5 e as características, vantagens e desvantagens de cada ideia são discutidas em baixo.

Na primeira linha da tabela da análise morfológica apresentam-se formas para o circuito do sistema de empratamento e embalagem. A primeira proposta apresenta um circuito linear. As funções de empratamento e embalagem estão representadas

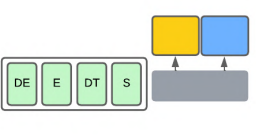
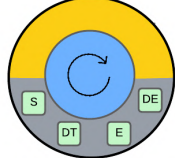
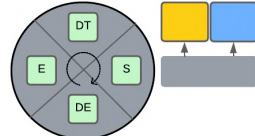


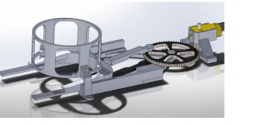
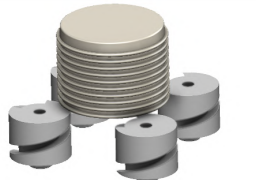

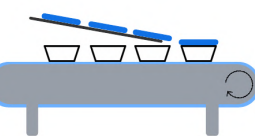
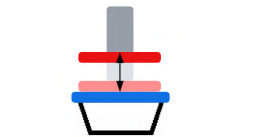
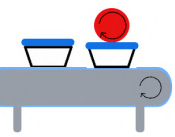
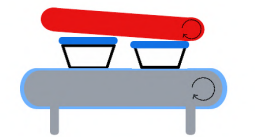



Forma do circuito			
Dispensa de embalagens			
Dispensa de tampas			
Selagem			
Transporte			

Figura 3.5: Análise morfológica.

a verde: dispensação de embalagens (DE), empratamento (E), dispensação de tampas (DT) e selagem (S). Seguidamente, passa numa faixa cinzenta que representa um meio de transporte e vai para uma zona de entrega (amarelo) ou de armazenamento (azul). Nesta fase de desenvolvimento de conceito, a abordagem linear pode tomar várias formas, dependendo do espaço disponível na cozinha, devido à necessidade de dispensar pelo menos dois tipos de embalagens. As abordagens pensadas estão na figura 3.6, com capacidade para dois tipos de embalagens distintos.

Na subfigura 3.6a, tem-se uma abordagem em que o circuito é composto por duas linhas paralelas, cada uma para um tipo de embalagem. Similarmente, existe a opção representada na subfigura 3.6c em que as linhas estão uma por cima da outra, ou seja, criam-se vários andares. As restantes soluções necessitam apenas de uma linha. A opção ilustrada na subfigura 3.6b coloca os dispensadores dispostos em série. Desta forma, quanto maior a variedade de dispensadores, maior a linha. A última sugestão, na subfigura 3.6d, é utilizar um sistema de carrossel para alternar o tipo de dispensador em função da necessidade.

Ainda na primeira linha da análise morfológica da figura 3.5, há mais duas propostas de soluções para a forma do circuito. A segunda opção é um conceito circular, em que as

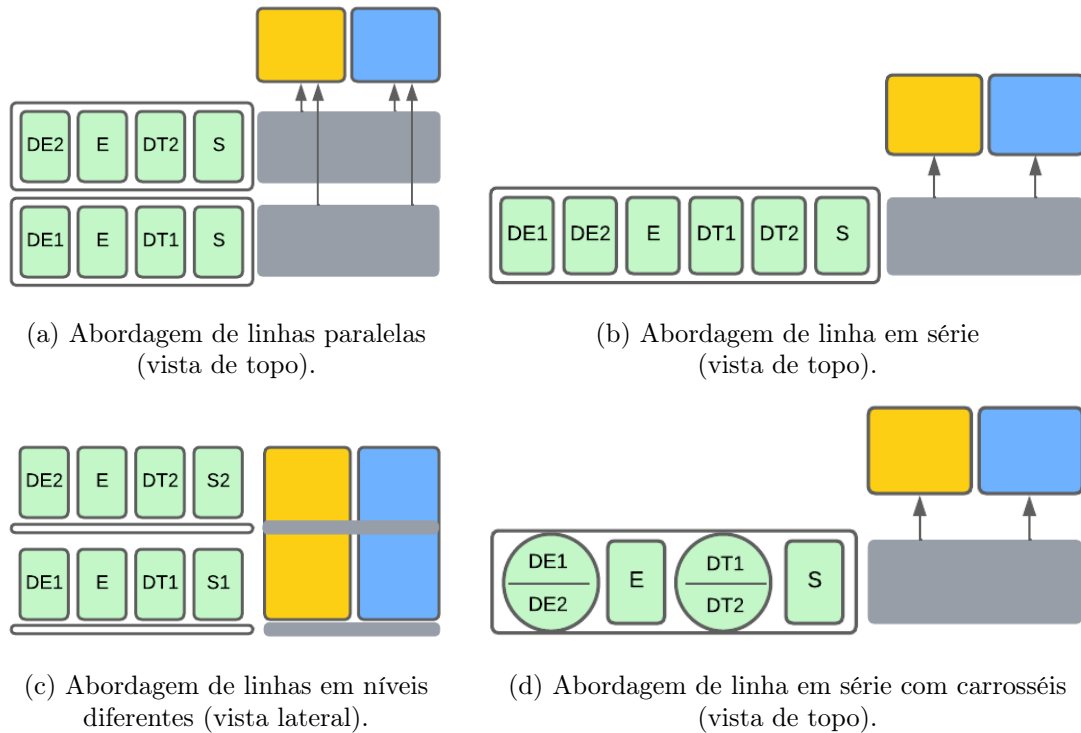


Figura 3.6: Abordagens para um circuito linear para dois tipos de embalagens.

funções de empratamento acontecem num percurso giratório que as leva diretamente à zona de entrega, com possibilidade de serem desviadas para uma zona de armazenamento, por exemplo, no interior do sistema. Para esta solução é preciso implementar pelo menos duas plataformas circulares, para cada tipo de embalagem. Por último, a terceira opção é híbrida. As funções de empratamento e embalagem acontecem num sistema circular, mas o transporte, entrega e armazenamento são independentes desse circuito. Tal como as opções anteriores, é necessário ter pelo menos duas plataformas e a sua disposição espacial pode ser semelhante às ilustrações da figura 3.6.

Na segunda linha da análise morfológica, observam-se as opções para a dispensa de embalagens, que incluem: utilização de espirais a rodar sincronamente, o uso de ventosas e ar comprimido para fazer *pick and place* da embalagem e, por fim, um mecanismo de separação de copos, que transforma um movimento rotacional em translacional, separando a última embalagem do restante pacote. Este último exemplo foi encontrado na plataforma *Youtube*.

Na terceira linha estão representadas as ideias para a dispensa de tampas. As duas primeiras são iguais à dispensa de embalagens. A terceira é uma solução de âmbito industrial, similar ao que se viu no estado de arte, em que a embalagem ao passar por um tapete, entra em contacto com a tampa, que está num tapete superior, e pousa em cima da embalagem. No entanto, esta ideia serve para cadências elevadas e não se justifica adotar na solução que se pretende desenvolver.

As propostas para a selagem estão na linha seguinte e incluem: a aplicação de uma prensa e a utilização de um rolo fixo ou tapete que, à medida que o conjunto embalagem-tampa passa, força o seu fecho. A segunda e terceira soluções não são ideais, porque

em circuitos como os 3.6b e 3.6d em que apenas existe uma linha, o rolo ou tapete estariam a uma altura fixa e não seria compatível com embalagens de alturas diferentes. Sendo assim, determinou-se imediatamente que o sistema de selagem a conceber seria uma prensa.

Para o transporte da embalagem ao longo do processo de empratamento e embalagem sugere-se: adotar um tapete, utilizar um sistema de eixos lineares ou uma garra. Tal como se vê no estado de arte em diversos casos, escolhe-se adotar um tapete. Existem diversas soluções de tapetes transportadores no mercado, com aplicações variadas. Será necessário definir as especificações do tapete para as condições em que se pretende utilizá-lo. Os sistemas de dispensação e selagem serão montados no tapete. No entanto, é necessário aplicar um sistema de eixos lineares para transportar as refeições embaladas no fim do tapete para as zonas de entrega ou armazenamento. Como referido anteriormente, esta tarefa está alocada a outro membro do projeto.

A função de empratamento não foi incluída na análise morfológica. O robô estará encarregue de fazer o vazamento da refeição, uma vez que se tratam de refeições cujo empratamento não requer uma precisão e detalhe elevados.

Desta análise morfológica retiram-se três conceitos-base, como se vê na figura 3.7, e múltiplas ideias para os sistemas a desenvolver, embora nem todas sejam compatíveis com todos os conceitos. Isso terá um peso na seleção da solução final.

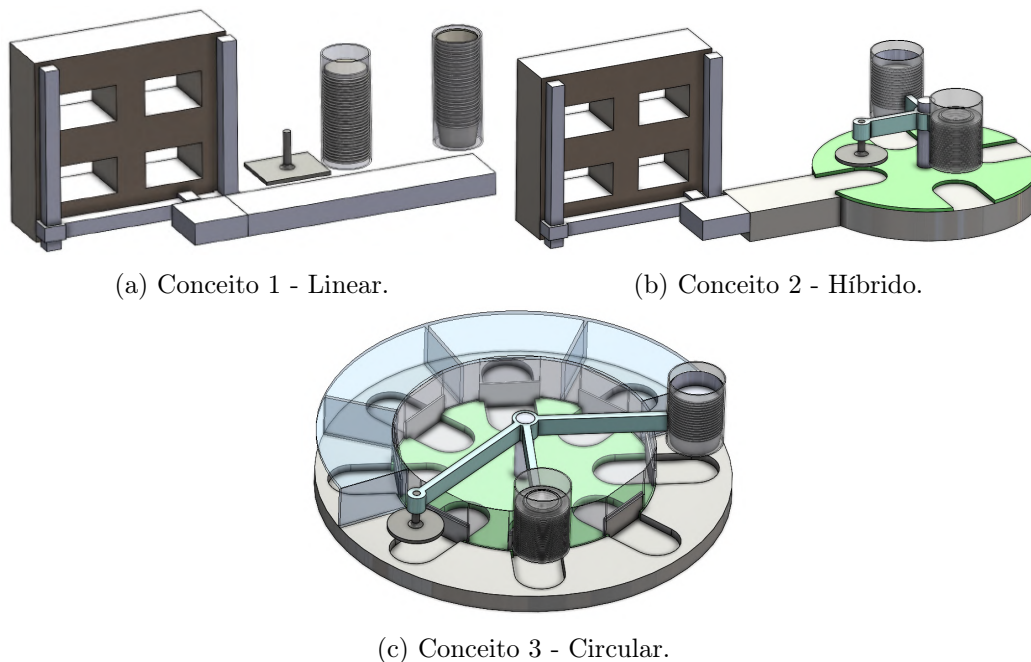


Figura 3.7: Apresentação dos conceitos para desenvolvimento do sistema de empratamento e embalagem.

3.3 Seleção de conceito

Para fazer a seleção do conceito que é explorado neste trabalho, recorre-se ao uso do diagrama de *Mudge*. Neste caso particular, definiram-se vantagens e desvantagens para

cada um dos conceitos em estudo e atribui-se uma pontuação relativa entre os conceitos. As pontuações são as seguintes: 0 (igual importância), 1 (pouco mais importante) e 3 (mais importante). Fizeram-se dois diagramas de *Mudge* separados: para a seleção do conceito da forma do circuito e escolha do tipo de dispensadores a adotar. Pretende-se que as soluções do dispensador de embalagens e tampas sejam iguais para simplificar a fase de desenvolvimento concreto. Sendo assim, no caso da dispensa de tampas, a quarta opção de dispensa em rampas perde efeito, pois não pode servir para a dispensa de embalagens.

No caso do diagrama de *Mudge*, para a seleção do conceito da forma do circuito a conceber, definiram-se alguns parâmetros a avaliar numa lista de vantagens e desvantagens. Os parâmetros são: 1) modularidade, ou seja, se é fácil e prática a adição, remoção ou troca de dispensadores ou outros sistemas sem comprometer o funcionamento da linha; 2) utilização de uma área compacta, pois um bom aproveitamento do espaço é essencial para a eficiência do sistema; 3) acessibilidade, ou seja, a capacidade de fazer uma manutenção ao sistema segura e facilitar montagem e desmontagem de componentes mecânicos e elétricos; 4) complexidade, ou seja, se o sistema, do ponto de vista projetual, aparenta ter um grau de complexidade adequado ao problema; 5) cumprimento da generalidade dos requisitos definidos no modelo de *Kano*, como fácil interação com outros sistemas e rapidez do percurso.

Depois de realizada a tabela 3.1, de vantagens e desvantagens da forma do circuito, passou-se à construção do diagrama de *Mudge*, presente na tabela 3.2. Se um conceito tiver muitas vantagens e poucas desvantagens em relação ao conceito ao qual está a ser comparado obterá uma pontuação alta, de 3 pontos. Se ambos os conceitos tiverem muitas vantagens ou muitas desvantagens em relação a si mesmos poderá ser dada uma pontuação de 0 pontos. Se a comparação for algo intermédio poderá ser atribuído apenas 1 ponto.

De acordo com a análise morfológica da figura 3.5 e a figura 3.6, definiram-se os seguintes conceitos gerais do sistema de empratamento e embalamento: linha em série (A), linha paralela (B), linha com carrossel (C), linha por níveis (D), circular (E), híbrido paralela (F) e híbrido por níveis (G).

Como se pode observar na tabela 3.2, houve dois conceitos que, claramente, se destacaram: o conceito de linha em série (A) e o conceito de linha com dispensadores em carrossel (C). Como se constatou na análise de vantagens e desvantagens da tabela 3.1, estes dois são os conceitos que melhor respeitam a maioria dos requisitos, cuja adoção é relativamente fácil do ponto de vista projetual e que garantem uma fácil adaptação dos dispensadores e restantes sistemas necessários de implementar. As restantes soluções são mais difíceis de adotar, dependem de mais materiais e, conseqüentemente, custos. Algumas nem sequer são capazes de cumprir a maioria dos requisitos definidos previamente.

Tal como no diagrama de *Mudge*, o conceito final selecionado para ser adotado foi o de linha em série (A). O conceito de linha com dispensadores em carrossel (C) é um pouco mais ambicioso do ponto de vista projetual, uma vez que, para além do desenvolvimento dos dispensadores, sistema de selagem e integração num tapete, adiciona-se o projeto de um carrossel para os dispensadores.

Similarmente, fez-se uma análise das vantagens e desvantagens e um diagrama de *Mudge* para a seleção dos dispensadores. Os parâmetros a ter em conta definidos são os seguintes: precisão, ou seja, a garantia que a embalagem ou tampa cai repetidamente na mesma posição; facilidade de programação do dispensador.

Tabela 3.1: Tabela de vantagens e desvantagens da forma do circuito.

Conceito	Vantagens	Desvantagens
A	- boa modularidade - fácil criar um espaço com boa acessibilidade - solução simples e fácil de adotar - permite cumprir, na maioria, os requisitos impostos	- se houver grande variedade de embalagens o comprimento da linha pode crescer, criando uma área de utilização muito grande
B	- é possível ter uma boa modularidade, mas afeta a área utilizada - solução simples e fácil de adotar - permite cumprir, na maioria, os requisitos impostos	- uma grande variedade de embalagens e dispensadores ocupam muito espaço - ter vários tapetes dentro de uma cozinha pode afetar o layout e acessibilidade negativamente - solução cara, porque dispense de muitos materiais - ter mais do que um tapete, aumenta a complexidade e os recursos necessários na programação
C	- dependendo do design do carrossel pode ser fácil a troca, adição ou remoção de dispensadores - é uma solução compacta para múltiplos dispensadores - fácil criar um espaço com boa acessibilidade - permite cumprir, na maioria, os requisitos impostos	- é uma solução tecnicamente mais complexa, uma vez que, além do projeto do(s) dispensador(es) requer o projeto do carrossel - para o objetivo atual de dois tipos de embalagens pode ser uma solução exagerada
D	- com a utilização do espaço vertical, a solução não ocupa uma área muito grande	- as linhas por níveis podem dificultar a troca, adição e remoção de dispensadores - ter linhas de operação sobrepostas em cima umas das outras não é adequado para a presença do braço robótico, pois aumenta o risco de colisões - a solução é complexa - a solução é cara, porque dispense de muitos materiais - ter mais do que um tapete, aumenta a complexidade e os recursos necessários na programação
E	- como se trata de uma solução integral que une todas as funções do sistema, a área é relativamente compacta - possível criar um espaço com boa acessibilidade	- não é uma solução nem modular nem facilmente expansível - como o armazenamento de refeições é integral com o restante sistema é possível que seja limitado - não há solução para a remoção de embalagens neste cenário - devido à sua integralidade é o conceito mais complexo de todos - um tipo de embalagem necessita de um sistema circular, consequentemente, no caso de múltiplos tipos de embalagens, a área utilizada é imensa e torna-se uma solução cara
F	- é possível ter uma boa modularidade, mas afeta a área utilizada - solução simples e fácil de adotar - permite cumprir, na maioria, os requisitos impostos - pode ser melhor que o conceito B se se conseguir aplicar apenas um tapete, diminuindo o impacto na área utilizada	- uma grande variedade de embalagens e dispensadores ocupam muito espaço solução cara, porque dispense de muitos materiais quantos mais dispensadores são necessários
G	- com a utilização do espaço vertical, a solução não ocupa uma área muito grande	- as linhas por níveis podem dificultar a troca, adição e remoção de dispensadores - ter linhas de operação sobrepostas em cima umas das outras não é adequado para a presença do braço robótico, pois aumenta o risco de colisões - a solução é complexa - a solução é cara, porque dispense de muitos materiais - ter mais do que um tapete, aumenta a complexidade e os recursos necessários na programação

Tabela 3.2: Diagrama de *Mudge* da forma do circuito.

	B		C		D		E		F		G		TOTAL	%
A	A	3	A	1	A	3	A	3	A	3	A	3	16	39,0
B			C	3	B	1	B	1	F	1	B	1	3	7,3
C					C	3	C	3	C	3	C	3	15	36,6
D							E	1	F	1	D	0	0	0,0
E									F	1	E	0	1	2,4
F											F	3	6	14,6
G													0	0,0
													41	100,0

Tabela 3.3: Tabela de vantagens e desvantagens dos dispensadores.

Dispensador	Vantagens	Desvantagens
Espiral	- pode ter uma boa precisão - fácil de programar, porque apenas requer o movimento de um ou dois motores de passo	- pode criar situações de encravamento
Ventosas	- precisão elevada	- programação pouco mais complexa, porque além de ativar/desativar a ventosa é necessário projetar e programar um braço para se movimentar do pack de embalagens à zona de queda
Copo	- pode ter uma boa precisão - fácil de programar, porque apenas requer a programação de um motor que converte o movimento circular num movimento translacional	- mais adequado para embalagens circulares, o que limita o tipo de embalagens disponíveis

Tabela 3.4: Diagrama de Mudge dos dispensadores.

	Ventosas		Copo		Total	%
Espirais	Espirais	1	Espirais	3	4	57,1
Ventosas			Ventosas	3	3	42,9
Copo					0	0,0
					7	100,0

Surge, então, na tabela 3.3, a análise de vantagens e desvantagens dos diferentes conceitos de dispensador. Seguidamente, está representado o diagrama de *Mudge*, na tabela 3.4. Sendo assim, definiu-se que se vai conceber um dispensador com espirais, uma vez que, tal como se viu no estado de arte, poderá ter uma precisão adequada, cadência apropriada e os projetos mecânico e de automação do mesmo não deverão ser muito complexos.

Desta forma, fica definido que, neste trabalho, se conceberá uma linha de empratamento e embalamento das refeições em que o deslocamento das mesmas será feito num tapete, onde estarão montados os diversos dispensadores, sistema de selagem e outros possíveis elementos que sejam adicionados posteriormente. O foco deste trabalho é, portanto, o desenvolvimento, projeto e teste dos dispensadores e sistema de selagem e o projeto de automação destes sistemas em interação com um tapete.

Capítulo 4

Projeto mecânico

Este capítulo destina-se à análise das soluções desenvolvidas para o desenvolvimento dos conceitos definidos anteriormente, no projeto dos dispensadores de recipientes e tampas e dispositivo de selagem. Serão também expostos os cálculos que auxiliaram a tomada de decisões acerca dos componentes selecionados.

Numa primeira fase é feito o estudo e apresentação do projeto para cada sistema desenvolvido, como um módulo individual. O intuito é apenas compreender o funcionamento e limitações projetuais para cada sistema. Numa fase posterior será analisada a integração dos sistemas num circuito integral, bem como as alterações que daí surgem.

Todos os cálculos realizados ao longo desta secção têm como base os métodos e equações presentes na literatura [37].

4.1 Primeiro protótipo do dispensador

O primeiro dispensador de embalagens desenvolvido está representado na figura 4.1. Cada espiral é solidária com um veio acionado por um motor de passo. O motor selecionado (NEMA 17) foi escolhido por ser comum, de baixo custo e fácil de programar. Para controlar em simultâneo os dois motores de passo, ambos foram ligados ao mesmo *driver* (A4988), de maneira a rodarem em direções contrárias, trocando as ligações das bobinas do motor ao *driver*. O controlo do dispensador é feito com um microcontrolador *Arduino*.

4.1.1 Resultados do primeiro dispensador

Na fase de prototipagem desta solução, foram evidenciados vários desafios que influenciaram o funcionamento da mesma. Sendo assim, são listados os seguintes problemas: 1) não havia repetibilidade, uma vez que as embalagens nem sempre eram dispensadas; 2) as embalagens dispensadas não tinham um comportamento uniforme, pois a queda não era exata e precisa; 3) devido ao uso de apenas dois apoios (um acoplamento e um casquilho) e ao comprimento extenso dos veios notou-se, visualmente, alguma excentricidade da espiral; 4) as embalagens nem sempre engatavam nas espirais devido à instabilidade da sua posição; 5) o número de guias era insuficiente e a folga entre a guia e a embalagem era grande demais para manter um posicionamento firme; 6) por vezes o engate das embalagens corria mal, resultando em encravamento e conseqüentemente, à perda de passos de um dos motores.

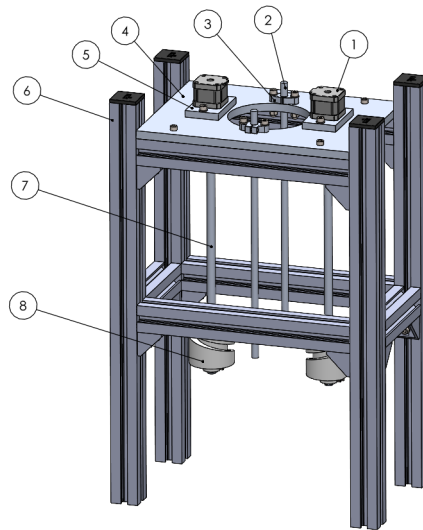


Figura 4.1: Representação CAD do primeiro protótipo dos dispensadores.

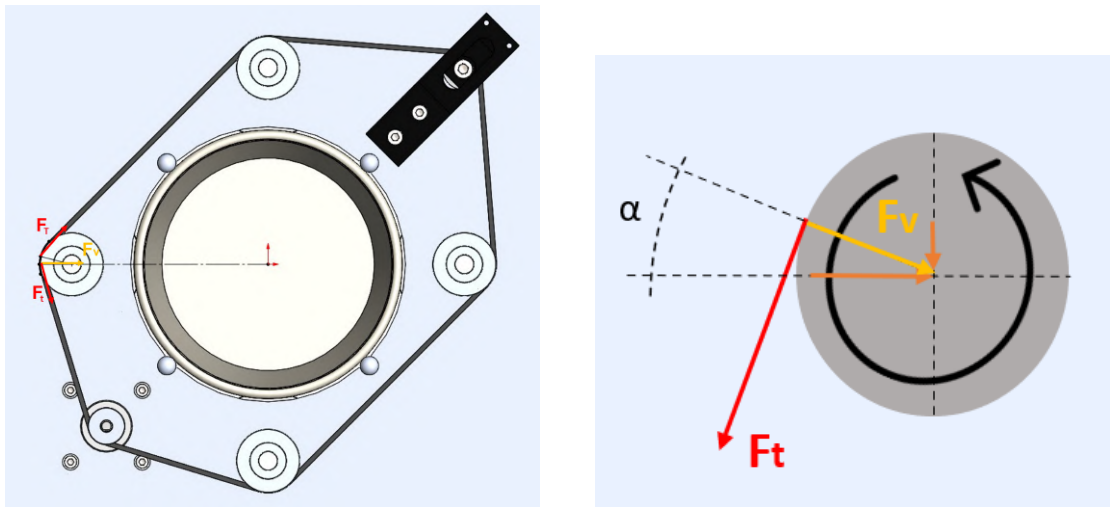
4.1.2 Medidas a aplicar no segundo dispensador

A partir das dificuldades encontradas no teste do primeiro protótipo do dispensador, definiram-se as seguintes medidas para adotar no desenvolvimento do segundo dispensador, para correção das falhas detetadas: 1) diminui-se o comprimento dos veios, para atenuar a excentricidade causada à espiral; 2) também se desenhou uma peça que encaixa debaixo das espirais com alojamento para casquilhos, para dar mais um apoio a cada veio e garantir uma maior estabilidade do mesmo; 3) para tornar a queda da embalagem mais precisa e estabilizar o posicionamento da pilha de embalagens adicionaram-se mais um par de veios com espirais e outro par de guias; 4) para não adicionar mais dois motores e colmatar a perda de passos observada nos testes, adaptou-se uma solução em que os veios são acionados pelo mesmo motor com o auxílio de uma corrente e polias; 5) modificou-se o desenho da espiral, tendo apenas um corpo com meio volta do corte helicoidal; 6) apesar de não ser um constrangimento funcional do dispensador, alterou-se a aplicação de perfis de alumínio por chapas quinadas em aço inoxidável, diminuindo o peso total do sistema sem abdicar da resistência estrutural.

4.2 Segundo protótipo do dispensador

Como foi referido anteriormente, o dispensador concebido passou por várias iterações, no entanto, demonstra-se apenas o dimensionamento de componentes do protótipo final adotado. O dispensador desenhado e prototipado, presente ao longo do documento, funciona apenas para as embalagens circulares.

O dispensador consiste num sistema de polias, acionadas por um motor de passo, ligadas por uma correia. Como se pode observar na figura 4.2, definiram-se, quatro posições para as polias mandadas e outras duas: para a polia mandante, diretamente ligada ao motor e para o tensor, que permite ajustar a tensão da correia. O posicionamento dos veios, do tensor e motor é praticamente simétrico, para criar um equilíbrio nas forças exercidas nos veios e não ter veios em esforços muito superiores em relação aos outros.



(a) Representação das forças exercidas no veio numa polia, no plano XOY.

(b) Aproximação e repartição da força de pré-tensão nos eixos x e y.

Figura 4.2: Representações de forças exercidas no veio de um dispensador.

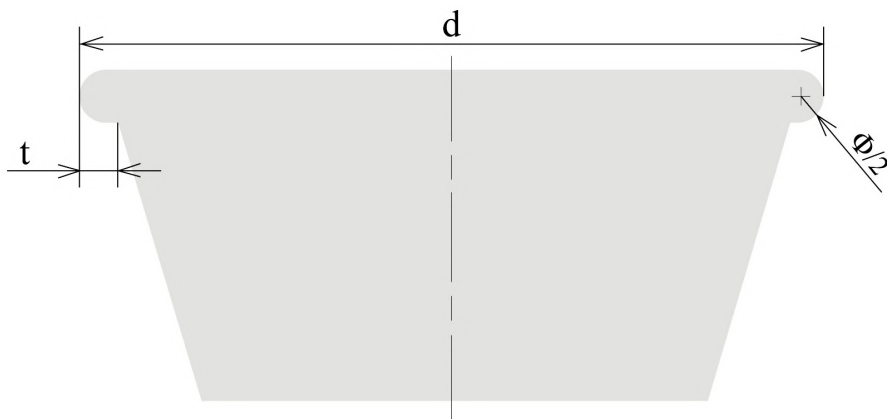


Figura 4.3: Esquema das dimensões da embalagem circular.

Cada uma das polias está montada num veio que roda solidário com uma espiral que faz a dispensação propriamente dita. Cada veio tem dois apoios (casquilhos) em superfícies de alumínio maquinadas com esse efeito. Desta forma, é necessário fazer o dimensionamento dos seguintes componentes: motor, correia e polias, veios e respetivos apoios.

4.2.1 Embalagens e tampas circulares

As embalagens a dispensar são apenas suportadas pelo contacto com as espirais. Pode afirmar-se que o peso destas embalagens é igualmente repartido pelas quatro espirais, ou seja, cada espiral tem uma carga de um quarto da massa das embalagens. Considerou-se que o dispensador irá suportar uma pilha de 60 embalagens.

Tabela 4.1: Medidas geométricas das embalagens e tampas circulares.

	Embalagens				Tampas			
	d (mm)	t (mm)	ϕ (mm)	m (g)	d (mm)	t (mm)	ϕ (mm)	m (g)
1	113,45	4,06	4,42	12,0	120,86	2,98	4,57	7,0
2	113,99	4,07	4,24	13,0	121,06	3,00	4,50	7,0
3	113,72	3,86	4,67	12,0	120,40	3,16	4,82	7,0
4	114,07	4,08	4,42	13,0	120,51	3,02	4,67	7,0
5	114,35	4,02	4,43	13,0	120,70	2,93	4,61	8,0
6	114,11	4,07	4,54	13,0	120,36	3,25	4,43	8,0
7	113,73	3,86	4,01	12,0	120,82	2,75	4,80	7,0
8	114,78	4,00	4,35	13,0	120,84	3,08	4,34	7,0
9	113,74	3,97	4,26	12,0	120,99	3,08	4,60	7,0
10	114,39	3,92	4,45	12,0	120,60	3,05	4,29	8,0
Média	114,03	3,99	4,38	12,5	120,71	3,03	4,56	7,3
Desvio-padrão	0,38	0,08	0,17	0,50	0,23	0,13	0,17	0,46

4.2.2 Escolha do motor e dimensionamento da correia e polias

Como referido na secção 4.1, foram feitos testes à primeira iteração dos dispensadores utilizando motores de passo NEMA 17, por serem motores de baixo custo e boa qualidade para os protótipos pretendidos. Para rotações abaixo dos 100 rpm o motor apresentou grandes vibrações e produzia ruído excessivo. No entanto, para rotações acima de 100 rpm o seu funcionamento era normal. Uma vez que se pretende utilizar o mesmo motor e rodá-lo a velocidades superiores, definiu-se que será aplicada uma redução nas polias, como está representado na figura 4.2.

Na literatura encontraram-se soluções para correias bastante comuns, utilizadas em impressoras 3D e sistemas de eixos lineares. As correias *Polychain* GT2 são correias de poliuretano, com um coeficiente de fricção extremamente baixo e uma geometria de dente particularmente silenciosa. De acordo com os fornecedores, estas correias são vendidas como circuitos fechados, em comprimentos variados, ou ao metro. Juntamente com as correias também são vendidas as polias. De acordo com os produtos disponíveis no mercado, fez-se a seleção das polias (mandante e mandadas) e do tensor. De maneira a criar alguma simetria na análise a realizar escolheu-se uma polia mandante igual à polia disponível para os tensores existentes, em que $Z_1 = Z_4 = 20$ e o diâmetro interno da polia é 5 mm (compatível com o diâmetro do veio do motor de passo, que pode ser conectado diretamente). Determinou-se que as polias que transmitirão potência para rodar os veios terão uma redução de 1:2. Sendo assim, foram escolhidas polias com $Z_2 = Z_3 = Z_5 = Z_6 = 40$, cujo diâmetro interno é de 8 mm. Aquando do dimensionamento dos veios, é necessário confirmar que o diâmetro mínimo do veio é inferior a este valor. As posições de cada polia são afetadas pelos comprimentos disponíveis da correia GT2 e pelo diâmetro da espiral desenhada, de maneira a garantir o contacto da espiral com a borda da embalagem, como se observa na figura 4.4. Com atenção a estas condições, marcaram-se as posições, finalizando a geometria das polias e correia. Sendo assim, pode-se fazer uma análise das forças presentes neste sistema, para dimensionar os veios projetados.

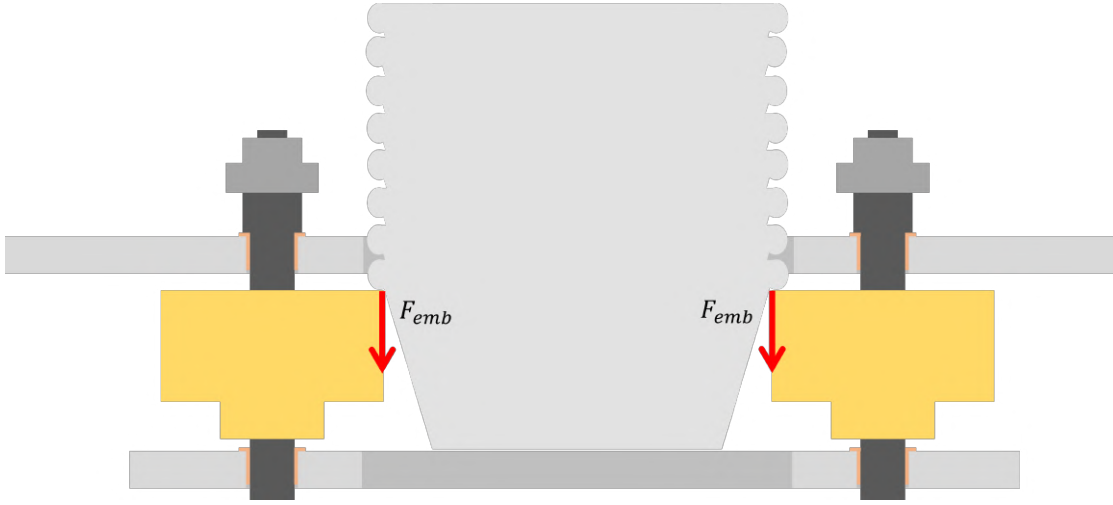


Figura 4.4: Representação CAD de uma vista de corte do dispensador.

Para obter as forças presentes na figura 4.2 analisaram-se as fórmulas seguintes, de acordo com a literatura:

$$F_t = F_B + F_H + F_R = m \times a + m \times g + \mu \times m \times g \quad (4.1)$$

em que F_B é a força de aceleração dada pela segunda Lei de Newton. A força de elevação, F_H , é $F_H = 0$ para um movimento linear horizontal, uma vez que a correia está num plano de nível de cota constante, ou seja, não há um movimento que contrarie o sentido da força gravítica. A força de fricção, F_R , também é nula, considerando o atrito desprezável.

A massa m na equação 4.1 é dada pela expressão

$$m = m_L + m_B + m_{Zred} + m_{Sred} \quad (4.2)$$

em que, m_L representa a massa da carruagem que a polia movimenta, ou seja, os veios e espirais; m_B é a massa da correia, disponibilizada pelo fornecedor; m_{Zred} é a massa reduzida das quatro polias e m_{Sred} é a massa reduzida das polias mandante e do tensor. As fórmulas para obter estes valores são apresentadas, seguidamente, em que m_Z e m_S são, respetivamente, a massa das polias e a massa das polia mandante e tensor. As variáveis B e ρ são a largura e densidade da polia, respetivamente.

$$m_{Zred} = \frac{m_Z}{2} \times \left[1 + \left(\frac{d}{d_K} \right)^2 \right] \quad m_{Sred} = \frac{m_S}{2} \times \left[1 + \left(\frac{d}{d_S} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

$$m_Z = \frac{(d_K^2 - d^2)}{4} \times \pi \times B \times \rho \quad m_S = \frac{(d_S^2 - d^2)}{4} \times \pi \times B \times \rho \quad (4.4)$$

A força de pré-tensão da correia é dada pela expressão $F_V \geq 0,5 \times F_t$, admitindo que a distribuição de potência é igualmente dividida por entre as polias mandadas.

Observando a subfigura 4.2b, podemos ver o desmembramento da força de pré-tensão, em relação ao referencial definido. Estas forças serão importantes no cálculo dos momentos fletores ao longo do veio, para determinar o diâmetro mínimo do mesmo.

O resultado das forças exercidas numa polia mandada pela correia estão na tabela 4.2, admitindo que se define inicialmente que a polia mandante roda a 300 rpm e, conseqüentemente, as polias mandadas rodam a 150 rpm.

Tabela 4.2: Resultados de cálculos referentes à correia, polias e forças no veio.

d_1 (mm)	5	d_2 (mm)	8
d_S (mm)	12	d_K (mm)	25
m_S (kg)	1,52E-06	m_Z (kg)	7,16E-06
m_{Sred} (kg)	8,92E-06	m_{Zred} (kg)	3,95E-06
B (mm)	6	m_B (kg)	5,70E-03
ρ (kg/mm ³)	2,71E-09	m_L (kg)	5,60E-01
m (kg)	5,70E-01	a (m/s ²)	2,47
$v_{correia}$ (m/s)	2,47	α (°)	14,05
F_v (N)	0,70	F_t (N)	1,40
F_{vx} (N)	0,061	F_{vy} (N)	0,695

Em qualquer sistema de transmissão, não considerando perdas de energia, $P_{in} = P_{out}$, tal como se vê na equação 4.5.

$$P = M_t \times \omega \Rightarrow M_{t_{in}} \times \omega_{in} = M_{t_{out}} \times \omega_{out} \quad (4.5)$$

Admitindo que o tensor (polia P_4) não transmite potência tem-se que $M_{t1} = M_{t2} + M_{t3} + M_{t5} + M_{t6}$, $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3 + \omega_5 + \omega_6$ e $\omega_1 = \frac{\omega_2}{2}$. Juntando com a relação 4.5, obtém-se:

$$M_{t1} \times \omega_1 = 4 \times M_{t2} \times \omega_2 \Leftrightarrow M_{t1} \times \omega_1 = 2 \times M_{t2} \times \omega_1 \Leftrightarrow M_{t1} = 2 \times M_{t2} \quad (4.6)$$

A potência para cada polia também pode ser obtida através da relação $P_2 = M_{t2} \times \omega_2$, em que $M_{t2} = F_{t2} \times r$. Como se conhece o valor da força tangencial, pode-se determinar a potência requerida para rodar as polias mandadas nas condições descritas. Utilizando as relações em cima consegue-se obter dados como a velocidade angular, momento torçor e potência nas polias mandadas e mandante. A tabela 4.3 apresenta esses mesmos dados. Como se pode observar, o motor tem potência suficiente para as necessidades requeridas. O torque do motor tabelado foi encontrado na curva de binário para $n = 300$ rpm (ou 1000 pulsos por segundo) na *datasheet* em anexo.

Tabela 4.3: Dados do veio e motor.

ω_1 (rad/s)	31,42	ω_2 (rad/s)	15,71
M_{t1} (N.m)	0,035	M_{t2} (N.m)	0,017
P_1 (W)	1,096	P_2 (W)	0,274
massa das embalagens (kg)	1,2	F_{emb} (N)	3
$r_{espiral}$ (mm)	30	M_{fletor} (Nm)	0,09
Tensão do motor (V)	4	Corrente do motor (A)	1,2
Potência do motor (W)	4,8	Torque do motor (N.m)	0,040

4.2.3 Dimensionamento dos veios e respectivos apoios

Parâmetros de dimensionamento e verificação

De acordo com o livro [37], existem três parâmetros principais para garantir a utilização segura e o desempenho de um veio.

O cálculo à cedência diz que a tensão de cedência máxima instalada no veio não poderá ultrapassar um determinado valor, para as suas condições corretas de funcionamento. Tipicamente, este valor é calculado aplicando dois critérios de dimensionamento estrutural: o critério de *Tresca* (equação 4.7) e o critério de *Von Mises* (equação 4.8), em que σ_{bmax} é a tensão normal máxima, τ_{tmax} é a tensão de corte máxima, σ_Y é a tensão de cedência do veio e γ é o coeficiente de segurança aplicado no dimensionamento.

$$\sqrt{\sigma_{bmax}^2 + 4\tau_{tmax}^2} \leq \frac{\sigma_Y}{\gamma} \quad (4.7)$$

$$\sqrt{\sigma_{bmax}^2 + 3\tau_{tmax}^2} \leq \frac{\sigma_Y}{\gamma} \quad (4.8)$$

Sabendo que $\sigma_{bmax} = \frac{32 \times M_b(x)}{\pi \times D^3}$ e $\tau_{tmax} = \frac{16 \times M_t(x)}{\pi \times D^3}$, pode-se obter uma expressão para o diâmetro mínimo do veio, D_i , para ambos os critérios. Como se pode verificar observando as equações 4.9 e 4.10, para o mesmo estado de tensão, ou seja para as mesmas condições, o diâmetro mínimo exigido pelo critério de *Tresca* é superior, pelo que será o adotado.

$$D_i \geq \sqrt[3]{\frac{32 \times \gamma}{\pi \times \sigma_\gamma} \times \sqrt{(M_b(x))^2 + (M_t(x))^2}} \quad (4.9)$$

$$D_i \geq \sqrt[3]{\frac{32 \times \gamma}{\pi \times \sigma_\gamma} \times \sqrt{(M_b(x))^2 + 0,75 \times (M_t(x))^2}} \quad (4.10)$$

Também se procede ao cálculo da rigidez. Ainda que um veio satisfaça o critério de tensão de cedência limite, a distorção do mesmo, ou seja, flecha e rotação angular, pode afetar o funcionamento dos componentes instalados, como engrenagens ou polias. Por outras palavras, mesmo respeitando o critério de tensão de cedência limite, um veio pode ser demasiado flexível, afetando a cinemática dos elementos de transmissão de potência ou ter uma rotação excessiva nos seus apoios, prejudicando a precisão e fiabilidade do mecanismo inteiro. A literatura consultada apresenta os valores admissíveis para estes parâmetros. Os mesmos foram descobertos com o auxílio do *software MDSolids*.

Por fim, a fadiga permite avaliar a integridade do veio sob ações de cargas cíclicas ao longo da sua vida útil pretendida. Sendo assim, trata-se de um procedimento de verificação.

Cálculo do momento fletor e verificação do diâmetro mínimo

Nesta fase, fez-se o cálculo dos momentos fletores ao longo do veio por ação das forças da correia e da carga das embalagens. Com estas forças pode-se iniciar o estudo das reações nos apoios, para posteriormente calcular o diâmetro mínimo do veio, através dos momentos fletor e torçor máximos.

Determinou-se o esquema de forças, reações e momento, representado na figura 4.5.

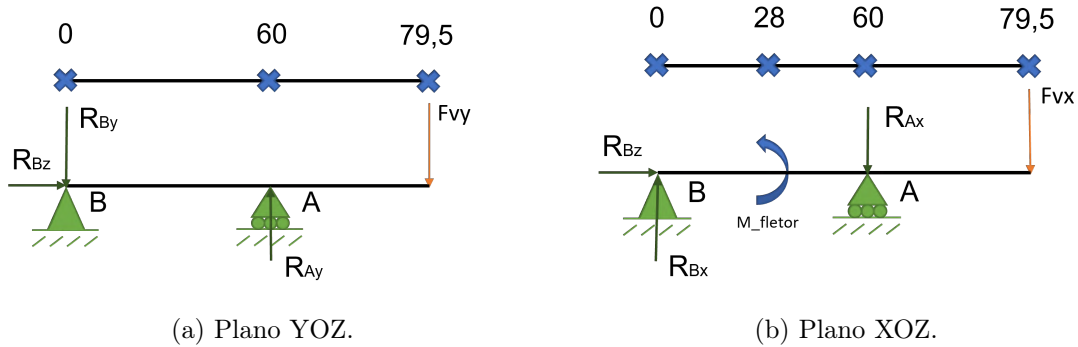


Figura 4.5: Esquema de forças, reações e momentos no veio nos dois planos principais.

Obtém-se, através do método dos deslocamentos, as expressões que se seguem que definem os momentos fletores $M_{bx}(z)$ e $M_{by}(z)$ para os planos YOZ e XOZ, respetivamente:

$$M_{bx}(z) = -R_{By} \langle z - 0 \rangle + R_{Ay} \langle z - 0,060 \rangle - F_{vy} \langle z - 0,0795 \rangle \quad [Nm] \quad (4.11)$$

$$M_{by}(z) = R_{Bx} \langle z - 0 \rangle - M_{fletor} \langle z - 0,028 \rangle^0 - R_{Ax} \langle z - 0,060 \rangle - F_{vx} \langle z - 0,0795 \rangle \quad [Nm] \quad (4.12)$$

Sabendo que para haver um equilíbrio estático $\Sigma F = 0$ N e $\Sigma M = 0$ Nm, determinou-se o valor das reações para, conseqüentemente, obter os momentos fletores. Os restantes valores de forças e momento são apresentados nas tabelas anteriores.

Tabela 4.4: Reações nos apoios.

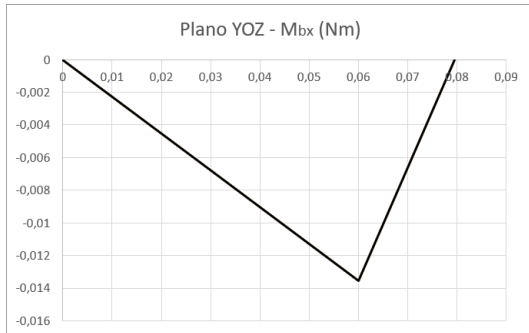
R_{Ax} (N)	1,42
R_{Ay} (N)	0,92
R_{Bx} (N)	1,48
R_{By} (N)	0,23

Na tabela 4.5 encontram-se os resultados dos momentos fletores para cada plano analisado, bem como a combinação dos mesmos. Na figura 4.6 podem observar-se as representações gráficas desses resultados. De acordo com o critério de *Tresca* anteriormente analisado podem-se calcular as tensões normais e de corte máximas, bem como o diâmetro mínimo do veio. O momento fletor máximo é o resultado máximo da combinação dos momentos do plano YOZ e XOZ e o momento torsor máximo é o valor de M_{t2} previamente calculado. O material considerado para o cálculo dimensional do veio é um aço Ck35 normalizado e o fator de segurança aplicado é $\gamma = 1,5$.

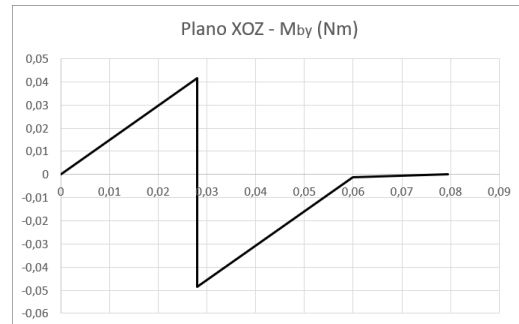
O diâmetro mínimo do veio obtido é de $D_i \geq 1,38$ mm, ou seja, 2 mm (valor normalizado). Como se pode constatar, este valor é espetavelmente baixo, uma vez que o veio está sujeito a cargas muito baixas. Os diâmetros das secções do veio que serão aplicados são escolhidos, posteriormente, em função da montagem dos componentes normalizados que serão utilizados. No entanto, como essas dimensões são tão superiores às calculadas, o veio estará sobredimensionado.

Tabela 4.5: Resultados do momento fletor, nos planos YOZ e XOZ e combinados.

			-	+			
		z(mm)	0	28	28	60	79,5
Plano YOZ	$M_{bx}(z)$ (Nm)	0	-0,006	-0,006	-0,014	0	
Plano XOZ	$M_{by}(z)$ (Nm)	0	0,041	-0,049	-0,001	0	
Combinação	$M_b(z)$ (Nm)	0	0,042	0,049	0,014	0	



(a) Plano YOZ.



(b) Plano XOZ.

Figura 4.6: Gráfico do momento fletor ao longo do comprimento do veio, em z , para os dois planos principais.

Cálculo à rigidez

Seguidamente, verificou-se o veio à rigidez, através do cálculo da flecha e rotação. Esta verificação foi realizada com o auxílio do software *MDSolids*, fazendo duas simulações, para cada um dos planos estudados anteriormente, no cálculo à cedência.

O *software* necessita da rigidez à flexão do veio e das forças e momentos que estão a ser aplicadas no mesmo. Sendo assim, definiu-se um diâmetro $d = 8$ mm uniforme ao longo do veio, para calcular o momento de inércia, I , e utilizou-se um valor de módulo de Young, $E = 193$ GPa, comum em aços inoxidáveis. Introduziu-se o valor da rigidez à flexão, EI , e obtiveram-se os resultados da rotação e flecha, para ambos os planos, que são apresentados na figura 4.7. Além dos resultados, foi possível confirmar as reações dos apoios calculadas.

Segundo a literatura, o valor de rotação admissível para um rolamento de esferas é $3,0 \times 10^{-3}$ rad e os valores obtidos são muito inferiores. A flecha admissível pode ser tida como um centésimo do comprimento do veio. No caso concreto é aproximadamente 0,8 mm. O valor de flecha máxima obtido, de acordo com o gráfico, é da ordem das milésimas de milímetro, ou seja, pode-se afirmar que o veio passa o cálculo à rigidez. No entanto, como referido anteriormente, este valor é ínfimo devido aos constrangimentos dimensionais do elementos disponíveis no mercado, que sobredimensionam o veio a aplicar.

Cálculo à fadiga

Para verificar o dimensionamento do veio através do teste à fadiga determinaram-se os pontos de estudo. Na figura 4.8 pode-se observar o perfil do veio e as zonas de estudo: as duas transições de diâmetro do veio (pontos 2 e 3) e a zona de momento fletor máximo

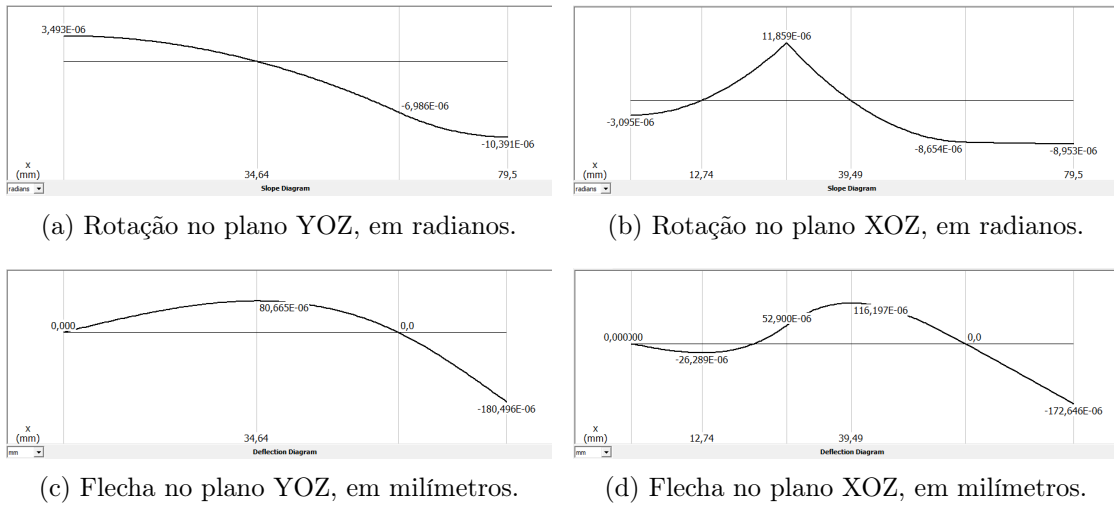


Figura 4.7: Representação da rotação e flecha no veio, nos planos YOZ e XOZ.

(ponto 1). De acordo com a literatura, fez-se a tabela D.1 que está nos apêndices, em que se pretende obter um coeficiente de segurança $\gamma \geq 1,5$ para cada um dos pontos de estudo.



Figura 4.8: Representação do veio e dos pontos de estudo para o teste da fadiga.

Como se pode constatar ao observar a tabela D.1, devido às tensões baixas a que o veio está sujeito, obtiveram-se valores de coeficiente de segurança muito elevados. Por outras palavras, segundo o critério de *Soderberg*, os veios projetados irão ter uma vida útil superior a 10^8 ciclos. Salienta-se, novamente, que estes resultados são consequência do sobredimensionamento feito ao veio.

Escolha dos apoios

Na figura 4.8 pode-se ver o perfil do veio e os apoios. As secções do veio têm as seguintes dimensões, da esquerda para a direita: $\phi_1 = 12$ mm, $\phi_2 = 16$ mm e $\phi_3 = 8$ mm. A terceira e última secção do veio tem esta dimensão para o encaixe das polias mandadas. A secção anterior tem uma dimensão para servir de encosto nas abas do casquilho. E, por fim, definiu-se uma dimensão para a secção mais longa do veio de acordo com o casquilho selecionado. Os dois apoios que estão nesta secção são iguais, simplificando a montagem e lista de componentes. Para verificar se os apoios selecionados são mecanicamente adequados fez-se o cálculo da pressão de contacto e da resistência à flexão, usando as expressões que se seguem:

$$P_c = \frac{F}{A_c} \qquad \sigma_f = \frac{M_f}{I} \times y \qquad (4.13)$$

O momento de inércia é dado pela expressão $I = \frac{\pi \times (r_o^2 - r_i^2)}{4}$ e y é o raio interior do casquilho. A força, F , na pressão de contacto é resultado da força exercida pelas embalagens no veio. Como se constatou anteriormente cada veio está sujeito a uma carga $F_{emb} = 3$ N. Se dividirmos este valor por ambos os casquilhos obtemos uma força, $F = 1,5$ N. A área, A_c , é dada pela área de contacto da flange com a mesa. O momento fletor, M_f utilizado no cálculo é o momento fletor máximo combinado, para estudar o pior caso.

Tabela 4.6: Verificação da pressão de contacto e tensão à flexão do casquilho.

Pressão superficial máxima (MPa)	80	Resistência à flexão (MPa)	210
P_c (MPa)	0,015	σ_f (MPa)	0,903
F (N)	1,5	M_f (Nm)	0,131
A_c (mm^2)	100,5	I (mm^4)	876,865
		y (mm)	6

Como se pode observar pelos resultados dos cálculos, as pressões de contacto e tensão de flexão são consideravelmente inferiores aos limites do casquilho. Como as forças presentes neste sistema são residuais e o veio tem dimensões superiores às necessárias para se adaptar aos elementos normalizados existentes, é natural que haja um sobredimensionamento dos apoios.

4.2.4 Restantes elementos

Os elementos restantes do dispensador servem apenas para conectar e suportar os elementos normalizados e veios dimensionados, incluindo: duas placas de alumínio para alojar os casquilhos que apoiam os veios e duas paredes para suportar e poder montar o dispensador. Cada dispensador necessita de duas paredes que são fixas às placas de alumínio e montam no tapete na posição desejada. Estas paredes também têm rasgos para facilitar a montagem de componentes eletrónicos, como sensores. Por fim, desenhou-se um tampo em chapa de aço inoxidável para proteger a correia, polias e eletrónica presente no dispensador.

O dispensador de tampas funciona com os mesmos princípios e podem-se aplicar os seguintes componentes, sem quaisquer alterações: polias, veios, espirais, casquilhos, motor e paredes. No entanto, como as dimensões da tampa são ligeiramente superiores às da embalagem é necessário desenhar e maquinar placas de alumínio e aumentar o comprimento da correia.

4.3 Sistema de selagem

O sistema de selagem tem que ser capaz de selar corretamente a tampa. Com o auxílio de objetos de massa conhecida que cobrissem totalmente a área da tampa, determinou-se a massa necessária para garantir uma selagem eficaz. A massa requerida é de 1,5

kg. Atribuindo um fator de segurança de 1,5, obtém-se uma força de selagem de $F = 1,5 \times 9,8 \times 1,5$ N.

O sistema de selagem desenhado consiste numa prensa que ocupa a totalidade da área da tampa e de um elemento que garanta o movimento vertical da mesma, com um curso de aproximadamente 50 mm. Decidiu-se que, para um primeiro protótipo, se utilizará um atuador linear. Analisando algumas soluções de baixo custo, comprou-se um atuador linear com um curso de 50 mm, capaz de exercer uma força até 75 N. O atuador linear irá descer até atingir a força de compressão da tampa calculada. Depois de atingir este valor, irá inverter o curso e recolher até à sua posição mínima. Para fazer a medição decidiu-se adotar uma célula de carga no sistema. A célula de carga irá enviar sinais analógicos ao controlador e quando este fizer a leitura da força que pretende atingir, inverte o sentido do atuador linear, através do uso de relés. Foi selecionada uma célula de carga capaz de suportar cargas até 10 kg. Sendo assim, é necessário desenhar dois acessórios para conectar a prensa e a célula de carga ao atuador linear. Por fim, é necessário projetar a parede no qual o sistema estará montado ao tapete. Determinou-se que esta parede terá um formato em U invertido (\sqcap) e a célula de carga estará montada diretamente nela. No apêndice B pode-se ver o desenho final deste protótipo.

Considerando o topo da parede estrutural uma barra com apoio duplo de cada lado e que o peso dos restantes elementos têm uma carga uniformemente distribuída, pode-se obter uma flecha máxima através da expressão 4.14.

$$f_{max} = \frac{5 \times F_{distr} \times L^3}{384 \times E \times I} \quad (4.14)$$

Para obter a rigidez à flexão escolheu-se o material desta parede que é aço inoxidável AISI 304, pelo que o módulo de elasticidade é $E = 193$ GPa. E atribuíram-se diversos valores de espessura e largura ao perfil da parede, de maneira a obter uma flecha máxima adequada às condições existentes. Na tabela 4.7 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 4.7: Cálculo da flecha em função do perfil da parede em aço inoxidável AISI 304.

L (mm)	258
E (GPa)	193
b (mm)	80
h (mm)	3
I (mm^4)	180
m_{corpo} (kg)	1,76
F_{distr} (N)	17,25
f_{max} (mm)	1,67

Desta forma, é definido que a chapa a quinar terá uma espessura de 3 mm e uma largura de 80 mm. A flecha máxima calculada inferior a 2 mm não deverá causar problemas no funcionamento do protótipo.

4.4 Dimensionamento do tapete

De acordo com a ilustração da figura 3.2, observa-se que o sistema de empratamento tem de cobrir um grande comprimento até chegar à zona de recolha para o quiosque. Sendo

assim, o tapete terá de ter um comprimento de 4 m. No entanto, para uma fase de teste e validação, é apenas necessário que o tapete albergue um dispensador de embalagens, um dispensador de tampas, um sistema de selagem e tenha espaço livre para a zona de empratamento e a zona de recolha da embalagem. Sendo assim, é necessário que o tapete tenha um comprimento mínimo de 1 m e uma largura de cerca de 250 mm. Também se pretende que o tapete se mova nos dois sentidos, a uma velocidade ajustável e variável. De acordo com estas características, encomendou-se um tapete bidirecional, com controlo de velocidade manual. O tapete encomendado é acionado por um motor AC com uma multiplicação por corrente. Para os testes a realizar foi alterado o motor, optando por um motor de passos (NEMA 23) para poder facilitar o ajuste das posições de cada operação. A base onde a tela roda e que suporta as coisas em cima do tapete tem de ser adaptada para a solução futura de 4 m de comprimento. Nesta fase, foi necessário redesenhar essa base em aço inoxidável com o mesmo comprimento para adicionar as furações que permitem fixar os dispensadores e sistema de selagem ao tapete. Os restantes elementos do tapete incluem os carretos e corrente para transmissão de potência, a tela, o rolo e respetivos apoios e as pernas. O tapete usado na fase de testes manteve estes elementos originais. Resumidamente, os únicos elementos alterados face ao tapete originalmente encomendado foram a base e o motor.

4.4.1 Seleção da tela do tapete e dimensionamento do motor

O tapete encomendado tem um comprimento útil de 1400 mm. Ainda assim, nesta secção, faz-se o dimensionamento do motor para o tapete futuro de 4 metros de comprimento, para se seleccionar antecipadamente o motor adequado para esse cenário.

Os carretos têm 15 e 24 dentes, cada um. No tapete original, o carreto maior está montado diretamente no motor, enquanto que o mais pequeno está montado num dos rolos do tapete. Nesse formato, tem-se uma razão de transmissão de $u = 0,63$. Consequentemente, essa razão de transmissão permite ao tapete atingir velocidades lineares elevadas. Porém, como não se pretende atingir velocidades elevadas que resultem em entornamentos ou outro tipo de falhas, é necessário definir uma velocidade linear máxima. Determinou-se que a velocidade máxima do tapete é de 1 m/s. Para ter um maior controlo sobre a velocidade e exatidão na posição, decidiu-se trocar os carretos, como estão ilustrados na figura 4.9, criando uma redução, com razão de transmissão $u = 1,60$. Foram desenhados e maquinados acopladores para montar os carretos nas novas posições, uma vez que os seus diâmetros internos não são iguais.

Por fim, é necessário definir a massa máxima que o tapete irá mover e escolher uma tela para as condições de 4 metros de comprimento para proceder ao cálculo da potência e torque desta configuração. Através da massa da tela e da carga que o tapete move pode-se obter a força linear que é requerida. Seguidamente obtém-se a potência, usando a expressão $P = F \times v$. Finalmente, determina-se o torque exigido ao motor, a partir da potência calculada. Estes resultados estão demonstrados na tabela 4.8 e permitem fazer a escolha do motor de passo a adotar neste sistema.

Para efeitos de dimensionamento do motor, selecionou-se um tapete em PVC, com boa resistência a óleos e gorduras, uma vez que pode entrar em contacto com comida, que respeita normas de segurança alimentar europeias. Calculou-se a massa da tela, através da densidade e dimensões gerais, que podem ser consultadas na tabela 4.8, que contém outros dados acerca do dimensionamento do motor.

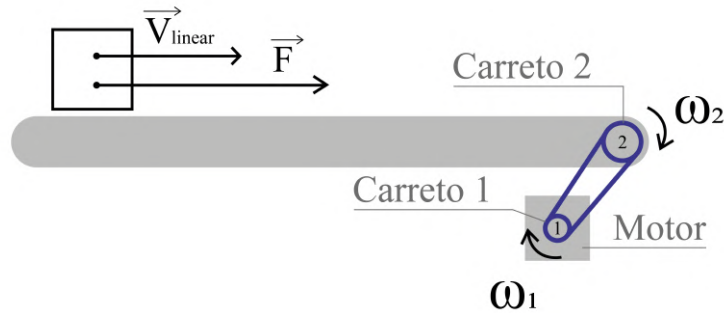


Figura 4.9: Representação do tapete adaptado.

Seguidamente, fez-se a seleção do motor. Nas condições desejadas, de acordo com a curva de torque na figura 4.10, o motor apresenta um torque de 0,8 Nm, o que é adequado às necessidades.

Tabela 4.8: Cálculos de dimensionamento do motor.

n_1	300	rpm	comprimento do tapete	9,132	m
n_2	187,5	rpm	largura do tapete	0,19	m
u	1,60	-	espessura do tapete	0,002	m
v_{linear}	0,53	m/s	densidade do material	2,2	kg/m ²
w_1	31,42	rad/s	m_{tapete}	3,82	kg
w_2	19,63	rad/s	$m_{movimentar}$	5	kg
a	1	m/s ²	coeficiente fricção	1	-
M_{t1}	0,38	Nm	F	8,82	N
M_{t2}	0,24	Nm	P	4,67	W

4.5 Montagem final

A figura 4.11 mostra a montagem dos sistemas desenvolvidos ao longo do trabalho. Os protótipos concebidos são compostos, maioritariamente, por peças maquinadas de alumínio e chapa de aço inoxidável, cortada e quinada. As peças foram fabricadas em empresas locais e na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica. Durante a fase de prototipagem foram feitas correções às dimensões das mesmas, bem como a elementos obtidos por fabrico aditivo, com o uso de impressoras 3D da empresa.

Como referido anteriormente, a configuração final do protótipo é composta por: um tapete, dois dispensadores (o de embalagens e o de tampas) e um sistema de selagem. O espaço observado na figura 4.11 entre os dois dispensadores existe para, futuramente, se instalarem dispensadores de *toppings* como sementes de girassol ou salsa, para finalização do empratamento. Como o tapete final terá 4 metros, haverá espaço suficiente para adicionar esse tipo de dispensadores ou outros elementos pertinentes.

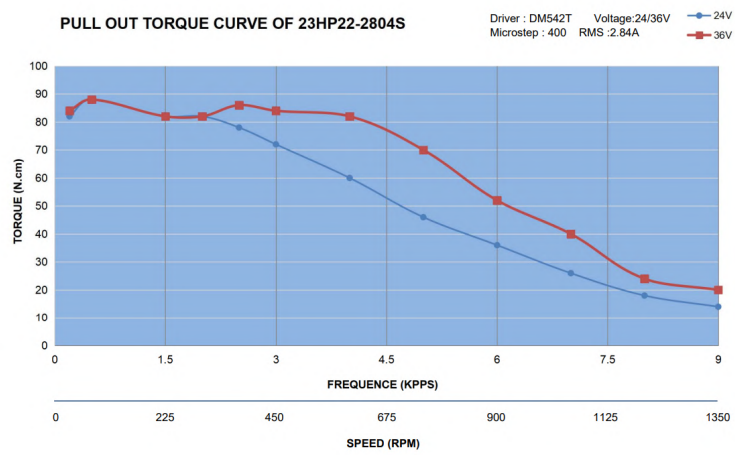
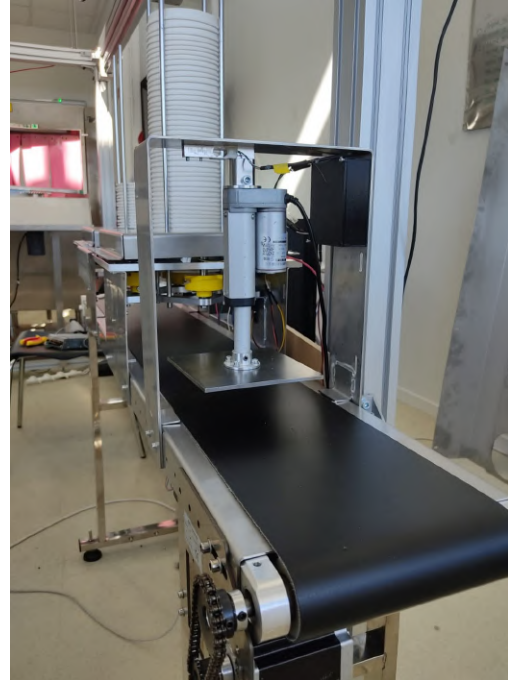


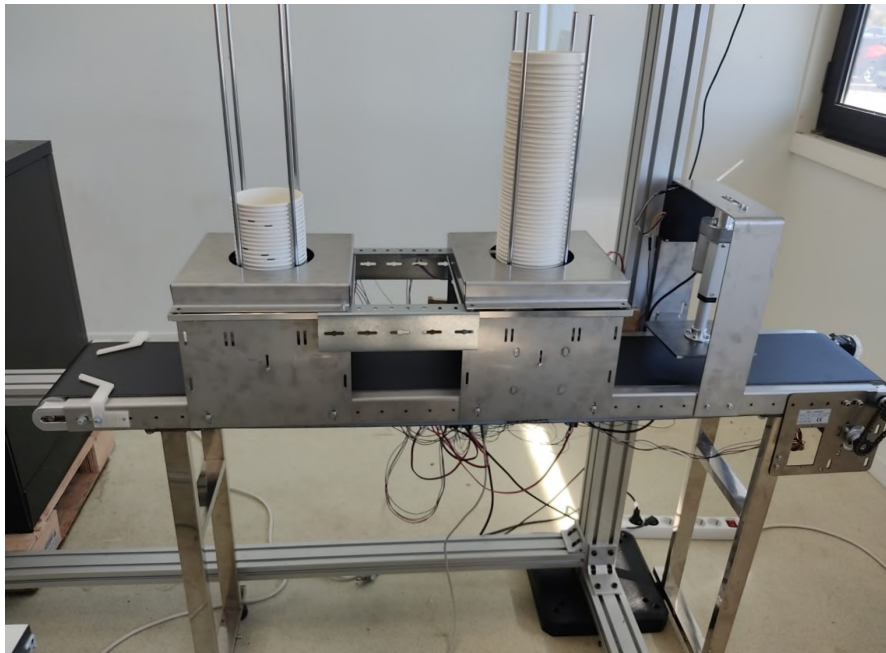
Figura 4.10: Curva de torque do motor do tapete.



(a) Perspetiva do lado dos dispensadores.



(b) Perspetiva do acionamento.



(c) Visão geral.

Figura 4.11: Imagens do protótipo final.

Capítulo 5

Projeto de automação

Neste capítulo é apresentado o projeto de automação realizado para o funcionamento do sistema de empratamento de refeições da cozinha *Cook4Me*. Em conformidade com a restante equipa decidiu-se fazer o controlo dos sistemas projetados através de um controlador lógico programável (PLC). O controlador utilizado é um PLC Siemens S7-1200, CPU 1214C DC/DC/DC. Também é necessário adicionar um módulo de saída digitais. Usa-se o modelo SM 1222 DQ8x24VDC, versão 6ES7 22-1BF30-0XB0. Ambos os equipamentos já estavam previamente disponibilizados pela empresa, pelo que foram utilizados neste projeto.

Ao longo do capítulo faz-se a apresentação dos componentes eletrónicos utilizados. Também se demonstra como o PLC aciona os vários estados do processo. Por fim, aborda-se a questão da comunicação com os diversos dispositivos da cozinha. Dá-se uma visão geral da forma como o servidor da cozinha acompanha o controlador ao longo da sua utilização e permite ao PLC comunicar com os restantes equipamentos, nomeadamente o braço robótico, uma vez que têm um papel fundamental no processo de empratamento. De momento, está definido pela empresa que o sistema de empratamento e o sistema de recolha e entrega de refeições irão partilhar o controlador. Sendo assim, não é necessário os dois comunicarem através do protocolo MQTT, uma vez que, ao partilharem o PLC comunicam diretamente um com o outro. A adição de múltiplos módulos de entradas e saídas digitais ou analógicas a um PLC é a solução prevista para garantir o número de portas que os dois sistemas necessitarão. No entanto, o projeto de automação e elétrico apenas se foca no presente trabalho, deixando de parte o sistema de recolha de refeições que ainda está em desenvolvimento.

5.1 Tia Portal

Nesta secção aborda-se o programa *ladder* desenvolvido para a automação do sistema de empratamento. O *software* utilizado foi o Tia Portal e os blocos de programa estão organizados da seguinte forma: 0) Geral - contém o bloco organizacional principal onde todas as funções do programa estão declaradas; 1) *Grafcet* - tem o código sequencial principal para o funcionamento do sistema de empratamento; 2) Elementos - tem o código desenvolvido para o acionamento dos elementos físicos do sistema (exemplo: motores); 3) MQTT - contém a definição do protocolo de comunicação entre o servidor e o controlador.

5.1.1 Grafcet

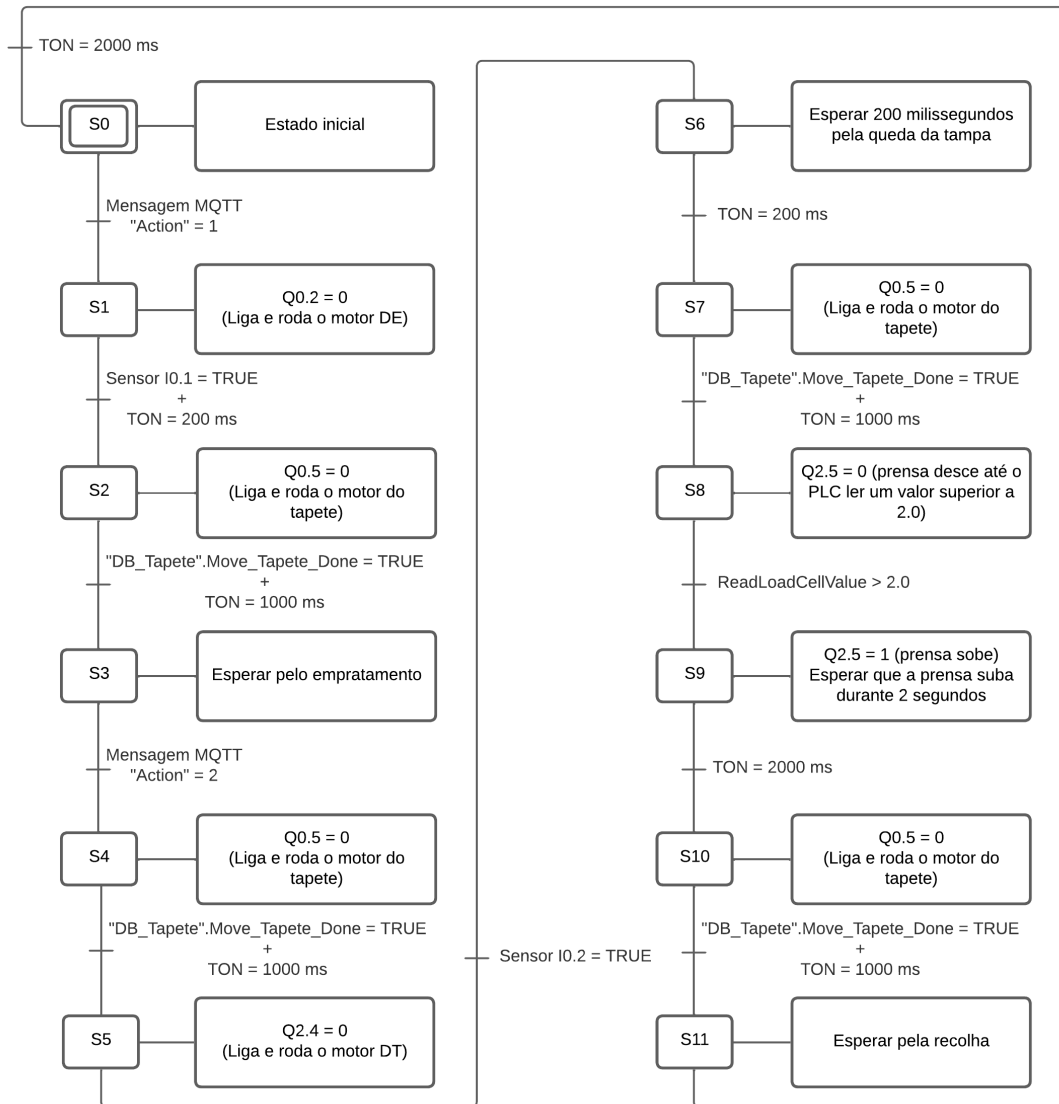


Figura 5.1: *Grafcet* do sistema de empratamento e embalagem.

A primeira *network* do *grafcet* apresenta as condições que arrancam o estado inicial (S0), na figura 5.2. Este apenas está ligado quando se garante que a emergência não está acionada e mais nenhum estado está ativo. Não existe nenhum botão de emergência, de momento. A emergência é uma variável booleana que pode ser declarada ativada manualmente. Ao ligar o PLC, o *grafcet* está, por defeito, no estado inicial.

A última *network* desta função permite dar *reset* ao estado que estiver ativo quando a emergência for acionada. Na figura 5.3 mostra-se o código *ladder*, que se repete para todos os estados, inclusive os que não estão representados na imagem.

Como se pode observar no *grafcet* do sistema, representado na figura 5.1, há dois casos em que a transição para a etapa seguinte é feita ao receber uma mensagem de

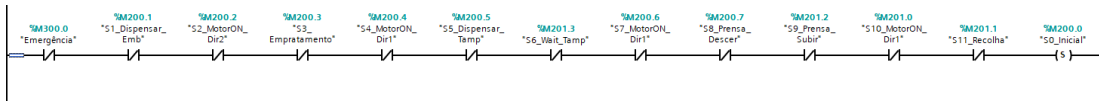


Figura 5.2: Condições iniciais de segurança do *grafcet*.

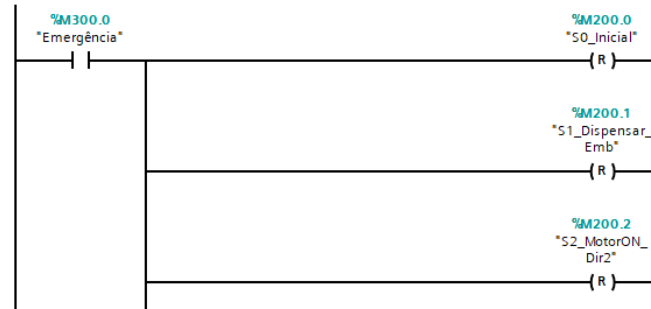


Figura 5.3: Reset das etapas, em caso de emergência.

entrada no PLC, do servidor MQTT: nas transições S0 - S1 e S3 - S4. A estrutura das mensagens MQTT é explicada em pormenor posteriormente, na subsecção 5.2.2. Como se pode observar na figura abaixo, quando se está no estado S0, apenas se transiciona para a etapa seguinte recebendo um valor de uma variável "Action". Quando o valor inteiro recebido coincide com o comparador ilustrado na imagem, ativa-se o estado seguinte.

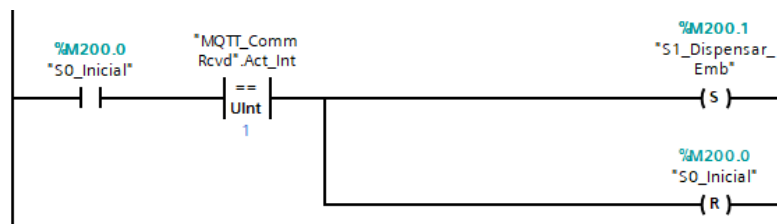


Figura 5.4: Transição do estado inicial, S0, para a etapa S1, através de uma mensagem MQTT.

Ao iniciar a etapa S1, o estado inicial sofre um *reset*, garantindo que não se está em duas etapas simultaneamente. O mesmo procedimento repete-se ao longo do *grafcet*, em cada transição de etapa.

Na transição das etapas S1 - S2 acontece a dispensação de uma embalagem. Quando o sensor faz ligar a entrada digital I0.1, o PLC espera 200 milissegundos para transicionar para a etapa seguinte. Isto acontece para garantir que o tapete não anda enquanto a embalagem não caiu completamente.

Na queda da tampa a solução é um pouco diferente. No dispensador de embalagens, o sensor está posicionado de maneira que capta a presença da tampa após a conclusão da sua dispensa. No entanto, no dispensador de tampas, o sensor, que liga a entrada digital I0.2, é apenas interrompido durante instantes, pois está posicionado a uma altura superior ao conjunto embalagem - tampa. Sendo assim, quando a entrada digital I0.2 é ativada, aciona imediatamente a etapa S6, que apenas serve para esperar pela finalização da queda da tampa. Ao fim de 200 milissegundos, ativa-se a etapa S7.

Na etapa S8, o atuador linear desce para selar a refeição. A entrada analógica AI0.1

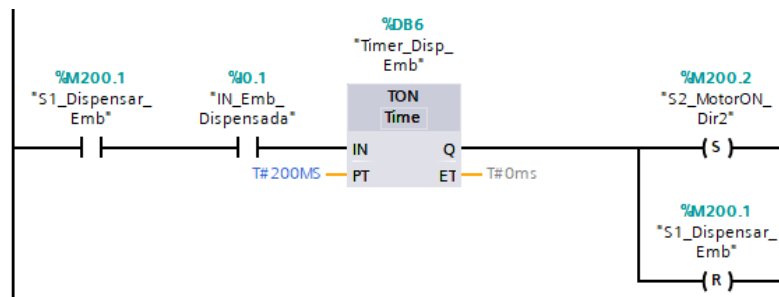


Figura 5.5: Transição da etapa S1 para a etapa S2, através do sensor IO.1.

do PLC lê os sinais enviados pela célula de carga, ampliados por um amplificador. Estas portas lógicas são capazes de ler tensões entre os 0V e 10V, logo os sinais recebidos têm de estar neste alcance. Para uma leitura de 2V, o estado seguinte é acionado, tal como na figura 5.6.

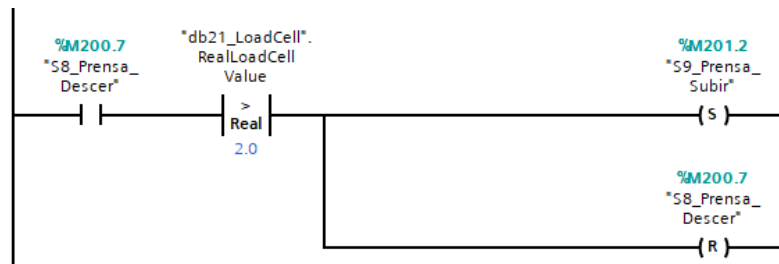


Figura 5.6: Transição da etapa S8 para a etapa S9, através da leitura obtida pela célula de carga.

As restantes transições do *grafcet* do sistema são para estados após a movimentação do tapete. Como se pode observar na figura 5.7, cada um deles é um composto por uma confirmação de que o motor do tapete concluiu a sua rotação, seguido de um temporizador de 100 milissegundos.

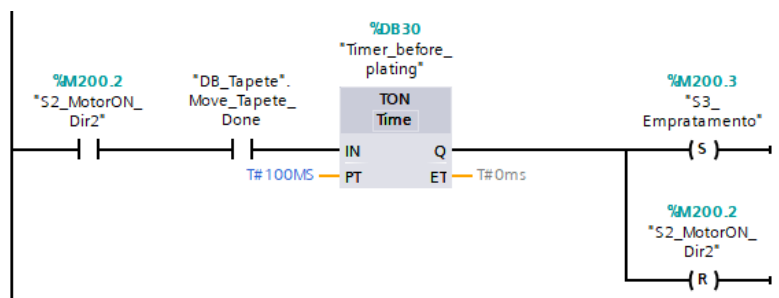


Figura 5.7: Transição da etapa S2 para a etapa S3, após a conclusão da translação do tapete.

É importante notar que no *grafcet* várias transições de estado são realizados com recurso a temporizadores, como é o caso da transição da espera pela recolha para o estado inicial. Isto acontece, porque, ao momento, ainda não se encontram implementados alguns sensores que detetam o posicionamento da embalagem ao longo do circuito. Sendo

assim, adotou-se um temporizador para reiniciar o *grafcet*.

5.1.2 Controlo dos elementos

Nesta subsecção é explicado o controlo dos motores de passo para os dispensadores e tapete e o controlo do atuador linear em relação com a leitura da célula de carga.

Motores de passo

No sistema testado no capítulo 6 são utilizados três motores de passo: dois NEMA17 (um para cada dispensador) e um NEMA23 (tapete). O procedimento de configuração no Tia Portal é semelhante.

Numa primeira fase, é necessário declarar o objeto tecnológico no Tia Portal, definindo: o tipo de *driver*, unidades de medição do curso, o tipo de sinal, as saídas do PLC que estão conectadas ao *driver*, pulsos por rotação do motor, rampas de velocidade e velocidades e acelerações máximas e mínimas. De seguida, é preciso fazer as ligações elétricas, de acordo com o apêndice E. Isto permite imediatamente utilizar uma ferramenta chamada *commissioning* que possibilita a rotação do motor manualmente e confirmação que as ligações estão bem estabelecidas. Ao longo dos testes fizeram-se alterações às velocidades, acelerações e rampas das mesmas, em função da necessidade, pelo que estes valores não são precisamente iguais para os três motores de passo.

Por fim, cada motor tem uma função própria, dentro da pasta Elementos, para automatizar a sua rotação. As funções são compostas por funções tecnológicas de *motion control* que permitem programar o controlo automático e manual dos motores. O *motion control* inclui as seguintes funções tecnológicas utilizadas: *power on* (ligar o eixo de cada motor), *move relative* (permite rodar o motor os passos desejados, a uma velocidade previamente definida, relativamente 'posição inicial) e *move jog* (que permite controlar o motor em modo manual). No fundo, cada função funciona como um *output*. Quando o motor se encontra na etapa em que irá rodar, desliga uma saída digital, conectada no *enable* do *driver* (por exemplo Q0.2, no caso do motor DE), que permite ligar o motor. Nesse instante a função *power on* é ativada. De acordo com a figura 5.8, observa-se que quando essa função está ligada e o seu estado é verdadeiro, executa-se a função *move relative*, atuando o motor desejado. A posição e a velocidade são definidas num bloco de dados (DB_DE).

Como se irá referir no capítulo 6, em caso de falha, pode existir a necessidade de rodar o motor de um dispensador mais do que uma vez, caso a dispensação não aconteça numa primeira tentativa. Como tal, definiu-se uma maneira de continuar a provocar a rotação do motor. Como se pode observar na figura 5.9, no caso do dispensador de embalagens, após a finalização da rotação do motor, se o PLC ainda se encontra na etapa S1 e o sensor I0.1 não foi ativado, é acionada uma variável chamada *Trigger* que desencadeia uma nova rotação do motor DE (é apenas um pulso, ou seja, logo a seguir a ser acionada a variável volta a 0). O temporizador permite que a nova rotação do motor não seja quase instantânea. Através de uma nova função *move relative*, semelhante à anterior (figura 5.8), é dada a execução pela variável *Trigger*. Como a variável volta a 0, seguidamente, esta função *move relative* pode ser reiniciada. A primeira função estará sempre ligada e não pode ser reiniciada, pois não se desliga a função *power on*, enquanto não se sair da etapa S1.

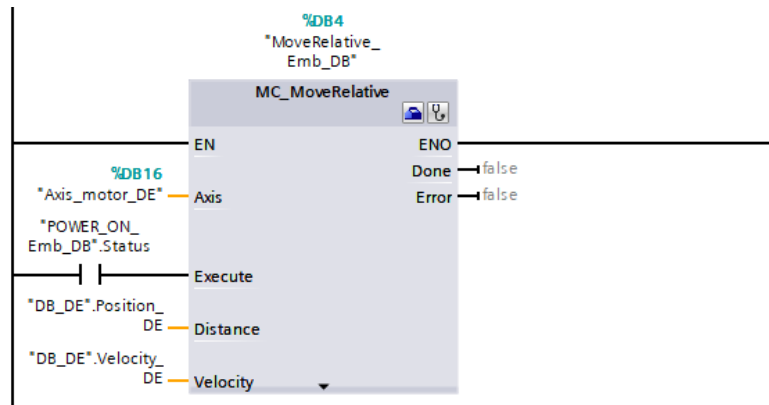


Figura 5.8: *Network* responsável por ativar a rotação do motor do dispensador de embalagens.

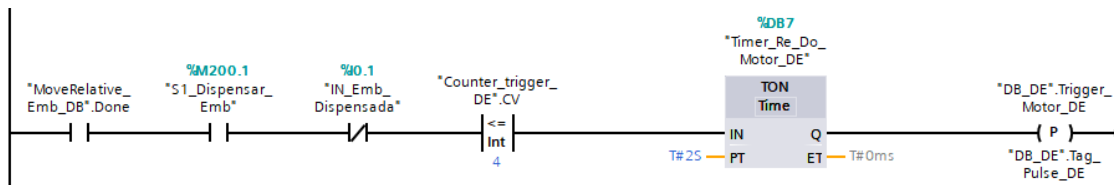


Figura 5.9: Código de contingência para rodar novamente o motor do dispensador de embalagens.

Simultaneamente, um contador soma o número de vezes que a variável *Trigger* é acionada. Esta variável é reacionada, de acordo com a figura 5.9, até quatro vezes. Ou seja, após a primeira rotação do motor DE, este pode rodar mais quatro vezes, no máximo, antes de acionar um alarme, indicando uma falha no sistema. O mesmo é aplicado no motor do dispensador de tampas.

O motor do tapete não necessita deste plano de contingência, pois o seu funcionamento não é posto em causa. No entanto, ao contrário dos restantes motores, o número de passos que faz difere de etapa para etapa. Sendo assim, uma das *networks* da função de controlo do tapete permite a definição do número de passos e velocidade do tapete, para diferentes etapas do ciclo. Durante a fase de testes, os passos e velocidade do motor são cuidadosamente ajustados para assegurar o posicionamento correto da embalagem ao longo do tapete.

Atuador Linear

Como se pode observar nos anexos do projeto elétrico, a alimentação do atuador linear está ligada a dois relés que partilham uma saída digital com o PLC. Para o atuador linear se movimentar nos dois sentidos é preciso trocar as posições do positivo e negativo na alimentação. Dessa forma, de acordo com o projeto elétrico, quando se muda o sinal da saída digital alteram-se esses sinais e troca-se o sentido de movimento do atuador.

Os sinais analógicos enviados pela célula de carga para o PLC são valores inteiros entre 0 e 27648. Estas portas analógicas interpretam sinais numa amplitude entre os 0V e 10V. Para poder interpretar o valor recebido é necessário normalizá-lo e depois escalá-lo,

como se pode observar na figura 5.10. Primeiro, o valor lido é convertido num valor real entre 0 e 1, em que 1 corresponde a um sinal recebido de 27648. Qualquer valor superior dá erro no PLC. Como as portas leem sinais entre 0V e 10V, converte-se o valor real num valor de tensão. Definiu-se, na fase de testes, que para um selagem adequada, o atuador tem de descer até se atingir uma leitura de tensão do sinal analógico da célula de carga de 2V. Ao atingir este valor, a etapa seguinte é ativada e o atuador linear inverte o seu curso, como se vê na figura 5.6.

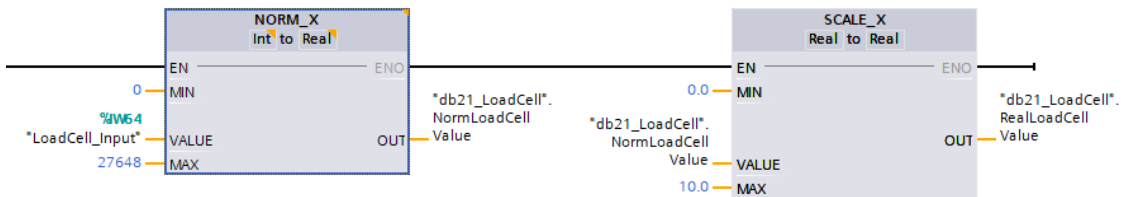


Figura 5.10: Código das funções de normalização e escala do valor analógico enviado pela célula de carga.

5.2 Comunicação

No âmbito da cozinha *Cook4Me* é necessário estabelecer um protocolo de comunicação entre os diversos sistemas utilizados na cozinha, nomeadamente: confeção, lavagem, empratamento e entrega. Um protocolo é uma convenção que cria e controla uma conexão, comunicação ou transferência de dados entre dois sistemas. O protocolo de comunicação definido pela equipa do projeto *Cook4Me* é o *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Sendo assim, é preciso ter uma visão geral do seu funcionamento e forma de aplicação.

5.2.1 Protocolo de comunicação MQTT

O MQTT é um protocolo de comunicação leve, escalável e de baixo consumo de energia que permite a troca de mensagens entre dispositivos ligados à Internet das Coisas (IoT). O MQTT atua, tipicamente, sobre o modelo TCP/IP e faz parte dos protocolos pertencentes à camada de aplicação [32].

Trata-se de um protocolo de modelo servidor-cliente. Existem clientes que estão ligados ao servidor ou *broker* MQTT, inscrevendo tópicos. Quando dois ou mais clientes estão inscritos no mesmo tópico, o *broker* serve de intermediário, recebendo a mensagem de um cliente e passando-a para quaisquer clientes inscritos no mesmo tópico. Por outras palavras, os clientes nunca estão ligados entre si e não têm conhecimento da informação de cada um, se não tiverem inscritos no mesmo tópico [33]. Na figura 5.11 pode-se observar uma ilustração representativa do funcionamento do protocolo.

O tópico é uma sequência de texto ou *string* hierarquizada por níveis que permite organizar e classificar as mensagens trocadas entre clientes. Por exemplo, podem-se ter os tópicos casa/quarto ou casa/cozinha. Apenas equipamentos inscritos nesses tópicos recebem ou enviam dados a outros dispositivos nas mesmas condições, sem misturar desnecessariamente informações indesejadas.

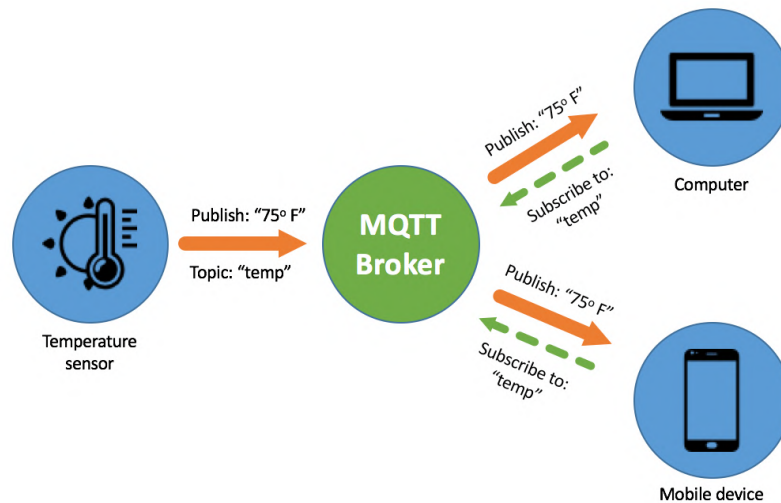


Figura 5.11: Exemplo representativo do funcionamento do protocolo MQTT.

Os três principais tipos de mensagens MQTT são conexão, desconexão e publicação/subscrição. A conexão permite criar uma ligação entre os clientes e o servidor. A desconexão espera pela finalização de qualquer trabalho por parte do cliente MQTT e do TCP/IP para desconectar os clientes do servidor. A publicação/subscrição é a troca de dados entre clientes, através do *broker* [34].

Cada conexão ao servidor tem uma medida QoS (*Quality of Service*) específica. Esta medida está relacionada com o envio e certificação da recepção da mensagem. O QoS pode estar classificado em 0, 1 e 2, incrementando o nível de certeza de recepção da mensagem. Para um $QoS = 0$ a mensagem será enviada no máximo uma vez, sem garantias da sua entrega. Este é apenas adequado para dispositivos que enviam mensagens frequentemente, como sensores, não tendo importância a perda ocasional de uma mensagem. Para um $QoS = 1$ a mensagem será entregue pelo menos uma vez, podendo ser recebida a mesma mensagem múltiplas vezes. Para um $QoS = 2$ tem-se a garantia de que a mensagem foi recebida uma única vez. Quanto maior o QoS, maior o número de mensagens trocadas entre clientes e servidor para garantir a entrega da mensagem. Sendo assim, de maneira a não sobrecarregar o MQTT de mensagens, o melhor é adotar o nível de segurança mais baixo necessário para a aplicação desejada [35].

As principais vantagens do MQTT incluem:

- permite eliminar conexões a clientes vulneráveis ou inseguras;
- pode ser utilizado com milhares de dispositivos;
- fácil implementação;
- simples, rápido e seguro;
- permite uma distribuição organizada e eficiente dos dados.

5.2.2 Aplicação do protocolo MQTT

Os motores, atuador e sensores que são utilizados no sistema de empratamento e embalagem são controlados por um controlador lógico programável (PLC), através das entradas e saídas analógicas e digitais, como já foi referido. No entanto, o PLC é apenas capaz de receber ordens e enviar feedback autonomamente para outros sistemas, através do servidor MQTT, como se observa na figura 5.12.



Figura 5.12: Arquitetura da comunicação.

Através de uma biblioteca de MQTT, disponível no website da *Siemens* para ser usada no *software* TIA Portal, configurou-se o controlador permitindo conectá-lo com o *broker* MQTT da cozinha *Cook4Me*. Para isto é necessário configurar o IP e credenciais do *broker* no programa do TIA Portal, numa função. Além da função, a pasta MQTT contém vários blocos de dados, responsáveis por colecionar informação acerca das mensagens recebidas e enviadas, entre outras coisas.

Os quatro tópicos principais usados para comunicar com os outros equipamentos da cozinha *Cook4Me* são: *In*, *Out*, *Status* e *LastWill*. O *In* e *Out* servem, respetivamente, para receber e publicar mensagens. O *Status* é semelhante ao *Out* e distingue a publicação de mensagens de notificação e monitorização, de mensagens que indicam o resultado final de um ciclo de empratamento. Para situações em que a conexão entre o PLC e o servidor seja perdida, o *Last Will* permite enviar uma mensagem a comunicar a perda de conexão. Para efeitos de organização na troca de mensagens com o servidor é acrescentado um subtópico que define qual o sistema que envia a mensagem. Neste caso, se o sistema de embalagem estiver a receber mensagens, recebe no tópico *In/Packaging*.

As mensagens são enviadas em formato JSON. A estrutura das mesmas está pensada da seguinte forma:

- *In/Packaging*: {"Id_Number": "x", "Package_Type": "x", "Action": "x"}, em que o x representa a *string* que se pretende enviar; *Id_Number* é a identificação do número da mensagem; *Package_Type* indica o tipo de embalagem que está a ser usada no ciclo a iniciar; e *Action* é o tipo de ação que se pretende que aconteça. Como se viu no *grafcet*, a *Action* pode tomar apenas dois valores (1 e 2) para iniciar o dispensador de embalagens ou indicar que o empratamento está finalizado;
- *Out/Packaging*: {"Id_Number": "x", "Outcome": "x", "Comment": "x", "Alarm": "x"}, em que, no fim de um ciclo por conclusão ou interrupção do mesmo, o *Outcome* informa acerca do sucesso ou insucesso do embalamento; o *Comment* serve para, porventura, deixar algum comentário; e o *Alarm* serve para notificar o servidor do alarme de algum erro que tenha ocorrido na operação;

- Status/Packaging: {"Id_Number": "x", "Position": "x", "System": "x", "Comment": "x"}, em que, ao longo do ciclo, Position atualiza a posição no sistema de embalagem; System informa acerca do sistema que está em operação, quer seja um dispensador, tapete, atuador ou sistema externo.

Por defeito, a função de subscrição no tópico In/Packaging está ligada, ou seja, a qualquer momento consegue-se receber mensagens de outros equipamentos. Para publicar é utilizada uma função de *trigger* que, momentaneamente, permite a publicação. Logo a seguir, o PLC reinicia a subscrição. Conseguiu-se fazer a publicação no tópico Status/Packaging da seguinte forma: ao iniciar-se a etapa S3, a função *trigger* inicia a publicação. Numa *network* diferente, em código SCL e utilizando uma condição *if*, é definido o tópico e o conteúdo de cada parte da mensagem.

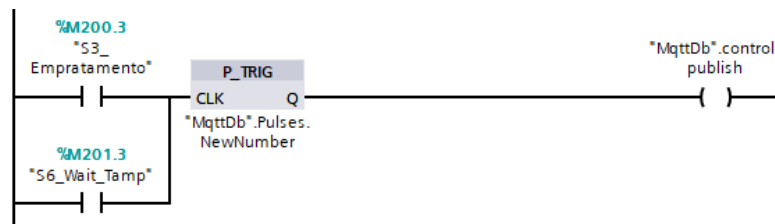


Figura 5.13: Função de *trigger* para acionar a publicação no servidor MQTT.

5.3 Seleção de componentes eletrónicos

Nesta secção explicam-se alguns dos elementos eletrónicos seleccionados e aplicados no projeto elétrico do sistema de empratamento e embalagem, nomeadamente os representados na figura 5.14. Estes equipamentos, juntamente com os motores e PLC, foram alimentados com uma tensão de 24V. De acordo com as especificações técnicas do atuador linear foi necessário alimentá-lo com uma fonte de tensão de 12V.

O projeto elétrico pode ser consultado, na íntegra, no apêndice E.



(a) Driver TB6600 para os motores de passo.

(b) Regulador de tensão, TL05, aplicado para conectar aos sensores de barreira foto-elétricos.

(c) Amplificador de sinal, INA125PA, para a célula de carga.

Figura 5.14: Componentes eletrónicos aplicados no sistema de empratamento e embalagem.

5.3.1 Drivers

No caso dos dispensadores e do tapete é feita a ligação dos respectivos motores ao seu *driver*. O driver selecionado é o TB6600, pelo seu baixo custo. Necessita de uma tensão de entrada entre os 9V e 42V, indicado para estar ligado no circuito de 24V do PLC. Em função do motor que é ligado pode se alterar a configuração de pinos, de maneira a alterar a corrente que suportará. Similarmente, pode-se fazer *microstepping* do motor de passo, isto é diminuir o passo do motor por cada pulso, atribuindo-lhe movimentos mais curtos, precisos e suaves.

5.3.2 Sensores

Também foi necessário utilizar sensores de barreira fotoelétricos, como já foi explicado previamente, para detetar a dispensa das embalagens ou tampas. Para redução de custos, utilizou-se um sensor de baixa gama, que funciona a uma tensão de 5V. Aplicou-se um regulador de tensão (TL05) para ligar ao circuito de 24V do PLC. O sensor está ligado a um relé que é ativado quando o sinal no recetor é quebrado. Ao atracar, o relé muda o sinal da saída digital a que está ligado no PLC, declarando a presença de um objeto.

5.3.3 Amplificador de sinal

No caso do sistema de selagem, dada a necessidade de obter uma leitura da célula de carga com as portas lógicas do PLC, foi necessário amplificar o pequeno sinal que esta envia, para amplitudes na gama das entradas do PLC, entre 0V e 10V. Selecionou-se um amplificador de instrumentação para trabalhar a 24V, com o mínimo de componentes externos. O único componente extra necessário é uma resistência que define o ganho no amplificador (INA125PA). A resistência utilizada tem 1000 Ω , dando um ganho de cerca de 50, de acordo com a folha de especificações do amplificador. Durante os testes, o PLC fez leituras da tensão na ordem das unidades como pretendido, validando a resistência selecionada.

Capítulo 6

Validação e ensaios

Neste capítulo são descritos os resultados recolhidos dos testes a que o sistema de empratamento e os seus componentes foram sujeitos. Faz-se uma análise crítica das falhas observadas e testam-se hipóteses de melhoria, caso os resultados obtidos não estejam de acordo com a expectativa delineada.

Cada secção do capítulo está focado num determinado teste. Fizeram-se testes à funcionalidade dos sistemas de dispensação de embalagens e tampas e do sistema de embalamento como um todo.

O objetivo, para ambos os dispensadores, é garantir que a dispensação tem um repetibilidade de 95%, ou seja, pretende-se que 95% dos ensaios realizados sejam bem sucedidos. Além de confirmar a queda destes elementos também se pretende observar se a dispensação é bem feita, garantindo que as bordas que vão atravessar o rasgo helicoidal da espiral o fazem apropriadamente. Sendo assim, os testes foram filmados para posteriormente se poder avaliar a dispensação com maior detalhe. Os testes realizados consistiram em 2 séries de 30 embalagens, no caso do dispensador de embalagens, e 3 séries de 20 tampas, no caso do dispensador de tampas. No total cada teste acumulou 60 ensaios.

Por fim, foi testado o sistema de embalamento, a trabalhar com um todo. Observou-se o comportamento do sistema geral, principalmente de casos em que houve falhas. Pode dizer-se que se identificaram vários tipos de falhas que podem ser categorizadas como críticas ou não. As falhas críticas são casos em que se compromete o sucesso do embalamento, como por exemplo o sistema de dispensação de tampas não funcionar. Uma falha não crítica é, por exemplo, não dispensar uma embalagem à primeira tentativa, mas conseguir fazê-lo numa oportunidade imediata.

Foram realizados 100 ensaios para validar o funcionamento do sistema de embalamento. É de notar que, ao longo deste teste, também se verificou o funcionamento da comunicação MQTT, na troca de mensagens com o servidor. Como esclarecido no capítulo anterior apenas as mensagens *In* funcionaram como pretendido.

O braço robótico não fez empratamento de nada e não havia um sistema de recolha da refeição, pois ambas as soluções ainda estão em fase de desenvolvimento.

6.1 Dispensador de embalagens

Os testes do dispensador de embalagens foram muito positivos, obtendo uma taxa de sucesso de 98,36%. Foram necessários 61 ensaios para dispensar as 60 embalagens utilizadas

no teste. A única falha detetada aconteceu, possivelmente, devido a perda de passos do motor. Notou-se que em alguns instantes as espirais não rodavam 360° completamente. Isso criou uma situação, como se pode observar na figura 6.1, em que a embalagem não está encravada, mas o motor não rodou o suficiente para dispensar a embalagem. Sendo assim, foi necessário adicionar na programação a possibilidade de reacionar o motor de passo. Este procedimento foi abordado no capítulo anterior.

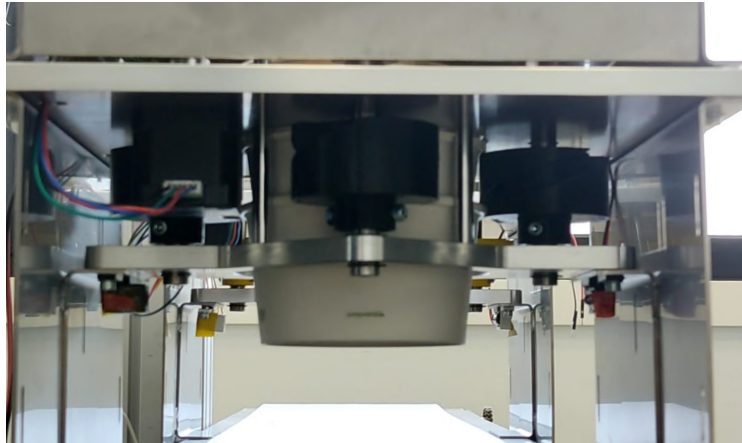


Figura 6.1: Caso de dispensação falhada, nos testes do dispensador de embalagens.

Neste caso limite, em que a embalagem está na iminência de cair notou-se que o sensor já captava a sua presença e acionava o tapete. Foi necessário, então, corrigir a posição do sensor de maneira a que apenas detete a embalagem, após o início da sua queda. Estas correções foram implementadas no teste geral do sistema de empratamento.

Também se notou que a embalagem nem sempre cai na mesma posição. Para evitar falhas nas posições de empratamento e dispensação de tampas, decidiu-se aplicar um guiamento para ajustar a posição da embalagem, através de manufatura aditiva, como se observa na subfigura 4.11c.

6.2 Dispensador de tampas

Fez-se a dispensa de uma amostra de 60 tampas. Considerou-se um sucesso quando era dispensada apenas uma tampa. Quando não se dispensava nada ou caíam duas tampas em simultâneo considerou-se um insucesso. Verificou-se que, em alguns casos, a tampa não era dispensada ficando torta, como se pode observar na figura 6.2. Uma das bordas está assente no rasgo da espiral, enquanto que a outra não.

No entanto, quando isto acontecia, caso se acionasse o dispensador novamente em alguns casos dispensava a tampa que previamente ficou presa. Noutros casos, continuava presa ou provocava a queda de duas tampas (presa e a seguinte). Verificaram-se 9 casos em que se deu a queda de duas embalagens. As tampas ficaram encravadas e impediram a queda um total de 27 vezes, resultando num total de 36 insucessos. Conseguiu-se fazer a dispensação com sucesso de tampas um total de 42 vezes, embora apenas 10 casos decorreram sem quaisquer problemas. Os restantes 32 casos de sucesso aconteceram com uma tampa já previamente inclinada dentro das espirais, como a figura 6.2 sugere. Ainda assim, consideraram-se sucessos, porque repetidamente comprovou-se que mesmo tendo

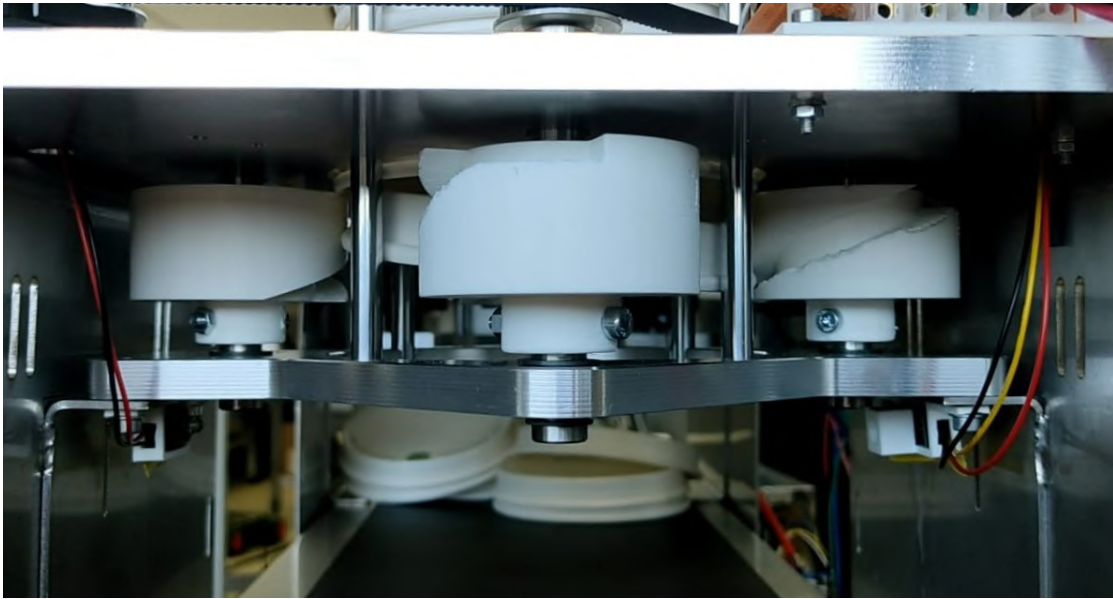


Figura 6.2: Exemplo de uma situação de encravamento, na qual a tampa fica torta.

a tampa já presa na espiral consegue-se fazer a dispensação dela. Afirma-se, então, que dispensação foi bem sucedida em 53,85% dos ensaios.

Identificou-se que, por vezes, existe alguma dificuldade em fazer a separação correta da tampa que se pretende dispensar e a precedente. Para facilitar o engate correto da espiral decidiu-se alterar o *design* da mesma, de maneira a que haja um degrau antes da separação. A borda das tampas tem cerca de 4,5 mm de diâmetro, de acordo com as medições que foram feitas. Em média, o espaço entre duas bordas de duas embalagens por dispensar é de 8 mm. Como tal, numa segunda iteração, a espiral foi alterada para acomodar um degrau de 5 mm. Desta forma, garante-se que a borda está inteiramente no degrau e que tem espaço suficiente para fazer o engate da espiral na tampa.

Ao longo dos testes fizeram-se mais alterações ao design da espiral. Na tabela 6.1, podem-se ver as alterações que foram feitas para cada iteração da espiral. Os resultados de cada uma delas estão na tabela 6.2.

Tabela 6.1: Especificações dimensionais de cada espiral utilizada nos teste do dispensador de tampas.

	E1	E2	E3	E4
Ângulo de hélice ($^{\circ}$)	60	60	60	70
Passo (mm)	60	60	50	45
Altura do degrau (mm)	-	5	5	6

Nos segundos testes obtiveram-se 60 sucessos em 72 tentativas, o que dá uma taxa de 83,33%. Ao contrário dos testes anteriores não houve nenhum caso de queda de duas tampas, o que é uma melhoria positiva. Desta forma, conseguiram-se dispensar todas as 60 tampas utilizadas. Em 21 dos casos de sucesso notou-se algum encravamento, apesar da queda da tampa. A maioria destes encravamentos eram similares ao ilustrado na figura 6.2. Os 12 casos de insucesso são consequência de encravamentos que prenderam

por completo a espiral. Apenas em 2 desses casos foi necessário intervir para desprender as espirais. Nos restantes casos, uma segunda rotação do dispensador permitiu soltar e dispensar a tampa.

Um dos problemas mais recorrentes é o encravamento da tampa. As observações feitas nestes ensaios mostram que, tipicamente, a embalagem fica presa antes da ranhura helicoidal, como é evidenciado na figura 6.2. Isto sugere que o passo da espiral pode ser grande demais. Sendo assim, modificou-se o passo da espiral, de acordo com a tabela 6.1.

Tabela 6.2: Resultados obtidos nos testes do dispensador de tampas, para diferentes *designs* da espiral.

	E1	E2	E3	E4
Dispensações sucedidas	42	60	54	60
Sem complicações	10	39	44	47
Com ligeiros problemas	32	21	10	13
Dispensações falhadas	36	12	17	12
Casos de 0 tampas dispensadas	27	12	15	12
Casos de 2 tampas dispensadas	9	0	2	0
Nº de intervenções humanas	2	2	1	2
Nº total de ensaios	78	72	71	72
Nº de tampas dispensadas	60	60	58	60
Percentagem de dispensações sucedidas (%)	53,85%	83,33%	76,06%	83,33%

Nos testes seguintes houve um erro e apenas se dispensaram 58 tampas, em vez de 60 tampas. Obtiveram-se 54 sucessos para um total de 71 testes, dando uma taxa de sucesso de 76,06%. Em 10 casos a tampa foi dispensada, no entanto um pouco torta, pois não engatou corretamente na ranhura. Houve duas ocorrências de queda de duas tampas em simultâneo, fruto de encravamentos no engate da tampa na espiral. Houve também um caso em que foi necessário desprender a tampa para prosseguir os testes.

Os resultados obtidos foram menos satisfatórios do que os da solução anterior. Ao diminuir o passo a ranhura da espiral ficou mais pequena, pelo que se decidiu aumentar o ângulo de hélice. Também se notou que o degrau de 5 mm poderia ser aumentado, uma vez que se detetaram alguns erros no engate da espiral e havia folga suficiente entre as tampas para o aumentar.

Na quarta iteração dos testes, obtiveram-se 60 casos de sucesso, em 72 tentativas, totalizando numa taxa de sucesso de 83,33%, tal como na segunda iteração das espirais. Houve 2 instantes de intervenção humana, quando havia menos de 5 tampas no dispensador. Isto sugere que é necessário definir um número mínimo de tampas presentes no dispensador para funcionar corretamente. Em 13 dos casos de sucesso a tampa foi dispensada ligeiramente torta. Na maior parte destes casos, isto acontece, porque a tampa anterior já tinha sido dispensada torta ou a tampa tinha ficado presa previamente. O cenário mais extremo que se verificou foi o de uma tampa que estava presa durante 3 tentativas, mas na quarta tentativa conseguiu ser dispensada.

Ao comparar a segunda e quarta espirais, cujas as taxas de sucesso foram iguais, podem-se identificar algumas diferenças. Em ambos os casos não houve situações de queda de mais do que uma tampa. Houve duas intervenções humanas para os dois casos,

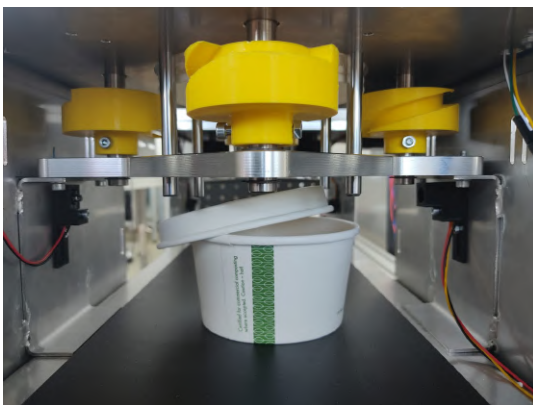
no entanto, nos testes da quarta espiral isso apenas aconteceu devido a um número insuficiente de tampas no dispensador. Para a segunda espiral, este cenário aconteceu independentemente do número de tampas no dispensador. Finalmente, a segunda espiral teve mais casos de sucesso em que houve algum encravamento e a tampa caía torta. Sendo assim, selecionou-se apenas a quarta espiral para usar nos testes gerais de empratamento.

6.3 Testes gerais

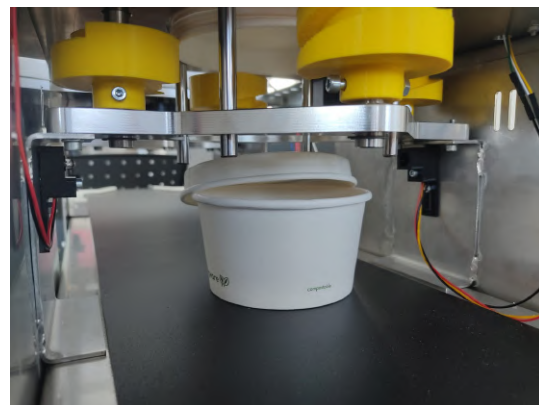
Como explicado anteriormente, foram realizados 100 ensaios para determinar a repetibilidade do sistema de embalagem. Considera-se um teste bem sucedido quando, no fim de cada ciclo, a embalagem se encontra na posição de recolha devidamente selada. Ao contrário dos dispensadores não foram realizados testes apenas ao sistema de selagem, porque o grau de complexidade é baixo e a sua funcionalidade foi facilmente observada no teste de rotinas completas. Foram registados comportamentos irregulares ao longo do ciclo, principalmente nos casos em que o objetivo do teste não é conseguido.

Previamente, nos testes do dispensador de tampas, usaram-se as mesmas tampas repetidamente, o que causou algum desgaste do material. Para garantir que a qualidade do material não afeta os testes, optou-se por utilizar tampas novas. O dispensador de embalagens, além de funcionar melhor, não causou tanto desgaste das embalagens. Sendo assim, não foi necessário utilizar embalagens novas. Foram utilizadas cerca de 40 tampas novas para os 100 ensaios. Depois de serem todas dispensadas são colocadas novamente no dispensador para continuar os testes.

Dos 100 testes realizados, 74 obtiveram um resultado positivo. Os restantes 26 testes não tiveram uma conclusão positiva e definiram-se os obstáculos encontrados. 17 dos testes sem sucesso falharam, porque no momento da queda a tampa não caiu com precisão no topo da embalagem.



(a) Tampa cai para uma lateral.



(b) Tampa cai para trás.

Figura 6.3: Ilustração das falhas na queda da tampa no topo da embalagem.

Na maior parte das vezes, a tampa cai para um dos lados, mas também chegou a cair para trás. Ambas as situações estão representadas na figura 6.3. Por outras palavras, 65% das falhas identificadas devem-se a falta de precisão na queda. Esta imprecisão pode ser fruto do funcionamento do dispensador ou do tapete que não posiciona a embalagem com precisão num sítio constante.

De resto, 3 dos casos de falha devem-se a encravamentos no dispensador de tampas e foi necessário intervir com mão humana para solucionar o problema. Os últimos 6 casos de insucesso são menos preocupantes. Notou-se que a queda da tampa não foi perfeita, o que resultou em algo similar ao que está representado na figura 6.3. Apesar de uma queda da tampa pouco satisfatória, a posição da tampa em relação à embalagem foi corrigida no momento da selagem. No entanto, a tampa não selou corretamente, chegando ao ponto de recolha a necessitar de voltar ao ponto de selagem para ser efetivamente bem selada.

Dos 74 casos de sucesso 2 deles tiveram uma queda da tampa pouco satisfatória. No entanto, a posição da tampa em relação à embalagem foi corrigida graças à interação com o sistema de selagem e à inércia do movimento gerado pelo tapete.

Por fim, também se fez uma estimativa do tempo de operação de um ciclo de empratamento, fazendo 10 medições com um cronómetro. Colocou-se um temporizador de 5 segundos no programa *ladder*, na etapa S3 (estado de empratamento). Ao descontar esse tempo à média das leituras obtidas determina-se o tempo das restantes operações. Como se pode ver na tabela 6.3, as ações de embalamento demoraram cerca de 21 segundos. Imaginando que a operação de empratamento pelo braço robótico demora 40 segundos, pode-se completar o empratamento de uma refeição em cerca de 1 minuto. Se a operação de entrega tiver um tempo de operação inferior a 1 minuto consegue-se cumprir o requisito inicial de *output* de uma refeição de 2 em 2 minutos.

Tabela 6.3: Medições de tempo de operação para um ciclo de embalamento (em segundos).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Média (sem empratamento)
25,86	26,65	26,12	26,80	26,45	26,16	26,07	26,25	26,08	26,11	26,26	21,26

Capítulo 7

Conclusão e trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Nos dias de hoje, existe necessidade e tecnologia capaz de auxiliar o ser humano na preparação e entrega de refeições, que se testemunha num crescente número de serviços de *catering* e restauração semi ou completamente automatizados. A interação humano-máquina é cada vez mais normalizada, tornando os clientes suscetíveis à adaptação para uma restauração mais automatizada. Além de libertar os trabalhadores das tarefas mais repetitivas e exaustivas do espaço da cozinha, consegue-se garantir uma maior fidelidade, segurança e higiene em todo o processo.

Apesar de já existirem exemplos de cozinhas maioritariamente automatizadas como a *Spyce*, o serviço e contacto com o trabalhador humano ainda é, na maior partes dos casos, requerido e valorizado pelo consumidor. Principalmente nas fases de embalagem e entrega em que, de modo geral, dependem da ajuda de funcionários humanos para serem cumpridas. No entanto, no âmbito do projeto *Cook4Me*, pretende-se estar na vanguarda do desenvolvimento de soluções que possibilitem a autonomia completa das operações de um serviço de *takeaway*, dando protagonismo ao cliente não enquanto cozinheiro, mas como o *chef* por detrás das ideias culinárias que a *Wish and Cook* quer ajudar a concretizar. Através de benchmarking e pesquisa de tecnologias e técnicas existentes com aplicações similares à exigida, foram definidos diversos conceitos, com possível aplicação na cozinha *Cook4Me*. Após a definição do conceito, iniciou-se o projeto e *design* dos sistemas de dispensação e selagem. Fizeram-se protótipos ao longo dos meses do trabalho, aplicando melhorias no *design*, sistemas mecânicos utilizados e no controlo, até se atingir os sistemas demonstrados ao longo do documento. Como se viu na discussão dos ensaios, os resultados obtidos não atingiram plenamente os objetivos traçados, mas são promissores. Ao longo do processo de desenvolvimento dos dispensadores notou-se que o controlo e manuseamento de materiais maleáveis como o das embalagens e tampas apresenta muitos desafios. A sua maleabilidade faz com que, em contacto com outros elementos se possam deformar ou já vir encomendadas com deformações pré-existentes. Naturalmente, as suas medidas não são extremamente precisas dificultando a tarefa de dispensação. Estes problemas são notórios nos testes do dispensador de tampas em que existiram vários casos de encravamento devido ao comportamento das tampas com as espirais. Apesar de se não atingir o objetivo estabelecido de 95% de repetibilidade, através de alterações ao *design* da espiral conseguiu-se melhorar e aproximar-se desta meta. No entanto, pelos problemas descritos com o manuseamento das tampas em particular,

concluí-se que não foi a melhor abordagem, pois a sua implementação gerou várias dificuldades. A dificuldade em dispensar tampas também afetou o funcionamento geral do sistema, criando dúvidas se as falhas na queda da tampa eram fruto dos defeitos do dispensador ou do posicionamento da embalagem no tapete. Será necessário melhorar a solução de dispensação de tampas para confirmar a fiabilidade do tapete.

Através dos requisitos definidos no modelo de *Kano* podem ser avaliados outros aspetos da solução obtida. Não se atingiu a flexibilidade de aplicabilidade de várias embalagens. O tapete permite a adição, remoção e troca de dispensadores com facilidade, atribuindo alguma flexibilidade. No entanto, era melhor que o próprio dispensador fosse flexível e se adaptasse a embalagens de diferentes dimensões ou geometrias. A solução encontrada para sincronização das espirais, com o uso de uma correia, é um pouco limitadora, pois dificulta o rearranjo das posições das espirais. Além disso, durante os testes, na montagem e desmontagem do protótipo de dispensador verificou-se que o facto da espiral estar entre duas placas de alumínio torna o processo mais demorado e menos prático. Através dos tempos de ciclo medidos no capítulo anterior, estima-se que seja cumprido o tempo de *output* exigido. No entanto, o percurso pode ser otimizado, uma vez que não permite embalamentos simultâneos. Em horas de maior utilização pode-se gerar um engarrafamento, atrasando a entrega da refeição ao cliente. Conseguiu-se também interagir com os restantes sistemas através da comunicação MQTT, mas a interação física deverá ser testada com maior rigor em ambiente real.

7.2 Trabalhos futuros

De acordo com as conclusões obtidas acerca dos dispensadores, uma das medidas mais importantes a explorar é a flexibilidade do mesmo. Isto requer a investigação de uma solução em que se consegue mover o posicionamento das espirais, o que afeta o comprimento e o tensionamento da correia. Uma outra alteração aos dispensadores seria que a montagem da espiral fosse a última etapa para que, caso seja necessário trocá-la, facilite a desmontagem. Também se deve continuar a explorar *designs* da espiral para melhorar o funcionamento no caso das tampas e para ser compatível com outros tipos de embalagens. No caso da embalagem paralelepípedica, a tampa não tem uma borda circular, então o *design* da espiral teria que ser diferente para poder dispensá-la. Penso que se deve continuar a analisar este tipo de dispensadores, pois os testes demonstram que este sistema de dispensação tem potencial para funcionar melhor, no caso das tampas.

Ainda no âmbito da solução prototipada, será necessário testá-la num ambiente mais próximo do real, interagindo com o braço robótico no empratamento e com o sistema de recolha de refeições. É importante saber se, no momento do empratamento, o posicionamento da embalagem não é alterado durante o vazamento da refeição. É igualmente crucial averiguar se o vazamento da refeição acontece de forma limpa e higiénica. Finalmente, é necessário confirmar se o posicionamento na fase de entrega é constante e permite à garra do sistema de recolha de refeições remover a refeição pronta, sem problemas.

Era bom adicionar a possibilidade do sistema de empratamento e embalamento rastrear o número de embalagens utilizadas durante um designado período de operação, bem como adotar alarmes para casos de falha.

Por fim, com base nas conclusões, sugere-se rever alguns dos conceitos pensados

previamente. Numa fase mais avançada em que haja uma alta frequência de refeições e uma variedade de tipos de embalagem maior, pode ser mais conveniente realizar as etapas de empratamento em áreas separadas, em vez de todas ocorrerem no tapete. Considerando a abordagem de conceito híbrida, poderia explorar-se a viabilidade de criar um sistema compacto e multiplicável, que centralize as operações de empratamento. Esse sistema teria a capacidade de embalar uma refeição e colocá-la sobre o tapete, para ser transportado até o ponto de recolha. Ao contrário da solução linear testada, esta ideia permitiria empratar diferentes tipos de refeição simultaneamente, melhorando a capacidade de *output* de refeições do sistema e da cozinha.

Referências

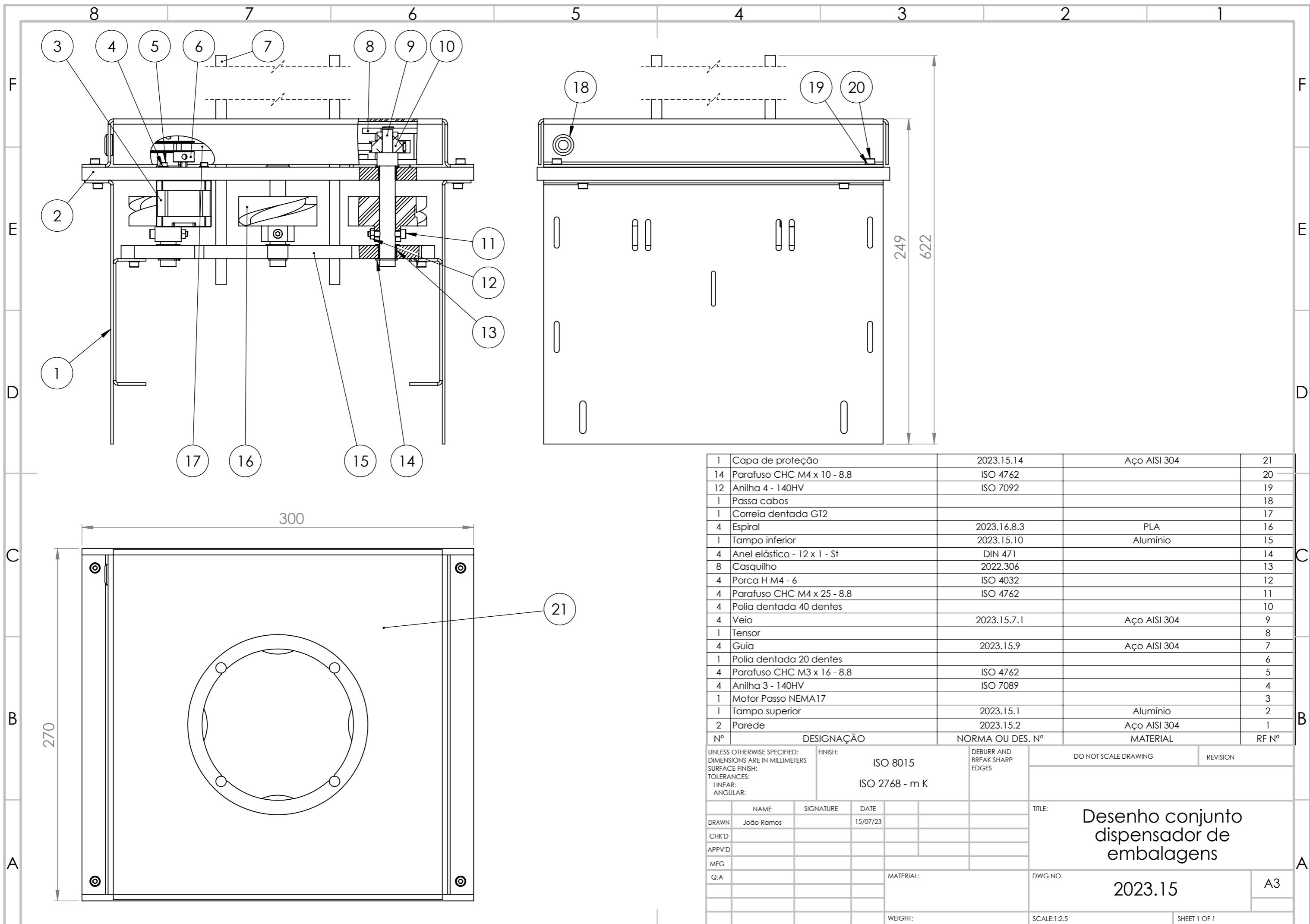
- [1] Meuter, M. Ostrom, A. Roundtree, R. Biner, M. (2000). Self-Service Technologies: Understanding Customer Satisfaction with Technology-Based Service Encounters. *Journal of Marketing*.
- [2] Berezina K, Ciftci O, Cobanoglu C. Robots, artificial intelligence, and service automation in restaurants. In: *Robots, Artificial Intelligence and Service Automation in Travel, Tourism and Hospitality*. Emerald Group Publishing Ltd.; 2019. p. 185–219.
- [3] Khan, Z. H., Khalid, A., & Iqbal, J. (2018). Towards realizing robotic potential in future intelligent food manufacturing systems. In *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (Vol. 48, pp. 11–24). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.011>
- [4] Park S, Lehto X, Lehto M. Self-service technology kiosk design for restaurants: An QFD application. *Int J Hosp Manag*. 2021 Jan 1;92.
- [5] Kokkinou A, Cranage DA. Using self-service technology to reduce customer waiting times. *Int J Hosp Manag*. 2013 Jun;33(1):435–45.
- [6] Greeting Robot - AI Greeting Robot [Internet]. [cited 2022 Oct 19]. Available from: <https://en.orionstar.com/greeting-robot.html>
- [7] LuckiBot- The leader of restaurant service robot [Internet]. [cited 2022 Oct 19]. Available from: <https://en.orionstar.com/lucki.html>
- [8] Creator [Internet]. [cited 2022 Oct 26]. Available from: <https://www.creator.rest/>
- [9] Towards Foodservice Robotics: a taxonomy of actions of Towards Foodservice Robotics: a taxonomy of actions of foodservice workers and a critical review of supportive foodservice workers and a critical review of supportive technology technology. Available from: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.14974179.v1>
- [10] Garcia-Haro JM, Oña ED, Hernandez-Vicen J, Martinez S, Balaguer C. Service robots in catering applications: A review and future challenges. Vol. 10, *Electronics* (Switzerland). MDPI AG; 2021. p. 1–22.
- [11] Picnic Pizza Station - Picnic. Automated Pizza Made Easy. [Internet]. [cited 2022 Oct 26]. Available from: <https://www.picnicworks.com/picnic-pizza-station/>
- [12] Speedy Eats – Automated Restaurant [Internet]. [cited 2022 Oct 19]. Available from: <https://speedy-eats.net/>

- [13] Blendid – Blendid [Internet]. [cited 2022 Oct 26]. Available from: <https://www.blendid.com/>
- [14] Coffee Robot | Robot Barista | Bubble Tea Machine | Bubble Tea Robot [Internet]. [cited 2022 Oct 26]. Available from: https://www.coffeeroobot.co/?gclid=Cj0KCQjwteOaBhDuARIsADBqReh-Q34twJ9ShPKUzQWyuuLCYE7Th3fuNP3leDsof3ulVbLxwkuGpCkaArI9EALw_wcB
- [15] Vortex | MGS [Internet]. [cited 2022 Oct 26]. Available from: <https://www.mgsmachine.com/en/solutions/product/vortex>
- [16] Denesting Machines, Denesters | Food Equipment Manufacturing Company [Internet]. [cited 2022 Oct 20]. Available from: <https://www.femc.com/products/denesting/>
- [17] DCI Cup Dispensers [Internet]. [cited 2022 Oct 20]. Available from: <https://www.dispensingcomponents.com/cup-dispensers.html>
- [18] DISPENSING DIVISION CHARACTERISTICS 1 OF 2 COMPONENTI VENDING S.P.A RESERVE RIGHT TO MODIFY THE PRESENT PRODUCT EVERY MOMENT AND WITHOUT NOTICE [Internet]. Available from: www.compo.it
- [19] Dudbridge M. Handbook of Seal Integrity in the Food Industry. WILEY Blackwell; 2016.
- [20] Mahalik, N. (2014). Advances in Packaging Methods, Processes and Systems. Challenges, 5(2), 374–389. <https://doi.org/10.3390/challe5020374>
- [21] Automated Lid Closer / Sealer with Conveyors Fabricated in the UK at C-Trak Ltd - YouTube [Internet]. [cited 2022 Oct 20]. Available from: https://www.youtube.com/watch?v=vbegVTP_lks
- [22] ABA Automatic Lid Placer and Closer for Five Gallon Pails Model M304 - YouTube [Internet]. [cited 2022 Oct 20]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=8uYcufRaAyg>
- [23] AIPAK. (2023). HFFS Machine: The Complete FAQ Guide in 2023. <https://www.icapsulepack.com/hffs-machine/>
- [24] Repanich, J. (2018). A Restaurant in Boston Has Replaced Chefs with Robots. <https://robbreport.com/food-drink/dining/spyce-restaurant-boston-bouludmit-eg18-2792324/>
- [25] Heater, B. (2017). Flippy, the hamburger cooking robot, gets its first restaurant gig. <https://techcrunch.com/2017/09/19/flippy-the-hamburger-cooking-robot-gets-its-first-restaurant-gig/>
- [26] Constine, J. (2018). Taste test: Burger robot startup Creator opens first restaurant. <https://techcrunch.com/2018/06/21/creator-hamburger-robot/>

- [27] Thorne, J. (2019). Secretive Seattle startup Picnic unveils pizza-making robot — here’s how it delivers 300 pies/hour. <https://www.geekwire.com/2019/secretive-seattle-startup-picnic-unveils-pizza-making-robot-heres-delivers-300-pies-hour/>
- [28] Chang, B. (2020). A robot is now making Jamba smoothies in a California Walmart in less than 3 minutes. <https://www.businessinsider.com/jamba-using-robot-arm-smoothies-blendid-walmart-2020-12>
- [29] Budds, D. (2018). Can a \$25,000 robot make better coffee than a barista?. <https://archive.curbed.com/2018/2/23/17041842/cafex-automated-coffee-robot-ammunition-design>
- [30] AHRESP. Restauração e Bebidas - Guia de Boas Práticas. 2021.
- [31] O que é TCP/IP? [Internet]. [cited 2023 Sep 8]. Available from: <https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-tcp-ip/>
- [32] MQTT - The Standard for IoT Messaging [Internet]. [cited 2023 Sep 8]. Available from: <https://mqtt.org/>
- [33] MQTT Essentials - All Core Concepts explained [Internet]. [cited 2023 Sep 8]. Available from: <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/>
- [34] MQTT Publish, MQTT Subscribe & Unsubscribe – MQTT Essentials: Part 4 [Internet]. [cited 2023 Sep 8]. Available from: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-4-mqtt-publish-subscribe-unsubscribe/>
- [35] What is MQTT Quality of Service (QoS) 0,1, & 2? – MQTT Essentials: Part 6 [Internet]. [cited 2023 Sep 8]. Available from: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-6-mqtt-quality-of-service-levels/>
- [36] Ramos AM, Relvas C, Simões JA, Dias LM. Engenharia + Design da ideia ao produto. Publíndustria, editor. Aveiro; 2017. 1–276 p.
- [37] Completo A, Melo F. Introdução ao Projeto Mecânico. 2a. Porto: Quântica Editora; 2019.
- [38] Perneder R, Osborne I. Handbook Timing Belts: Principles, Calculations, Applications. 2012.

Apêndice A

Desenho de Conjunto do Dispensador de Embalagens



1	Capa de proteção	2023.15.14	Aço AISI 304	21
14	Parafuso CHC M4 x 10 - 8.8	ISO 4762		20
12	Anilha 4 - 140HV	ISO 7092		19
1	Passa cabos			18
1	Correia dentada GT2			17
4	Espiral	2023.16.8.3	PLA	16
1	Tampo inferior	2023.15.10	Alumínio	15
4	Anel elástico - 12 x 1 - St	DIN 471		14
8	Casquilho	2022.306		13
4	Porca H M4 - 6	ISO 4032		12
4	Parafuso CHC M4 x 25 - 8.8	ISO 4762		11
4	Polia dentada 40 dentes			10
4	Veio	2023.15.7.1	Aço AISI 304	9
1	Tensor			8
4	Guia	2023.15.9	Aço AISI 304	7
1	Polia dentada 20 dentes			6
4	Parafuso CHC M3 x 16 - 8.8	ISO 4762		5
4	Anilha 3 - 140HV	ISO 7089		4
1	Motor Passo NEMA17			3
1	Tampo superior	2023.15.1	Alumínio	2
2	Parede	2023.15.2	Aço AISI 304	1
Nº	DESIGNAÇÃO	NORMA OU DES. Nº	MATERIAL	RF Nº

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:
 ISO 8015
 ISO 2768 - m K

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:
**Desenho conjunto
 dispensador de
 embalagens**

DRAWN: João Ramos, 15/07/23

CHK'D

APPV'D

MFG

Q.A

MATERIAL:

DWG NO.: 2023.15

A3

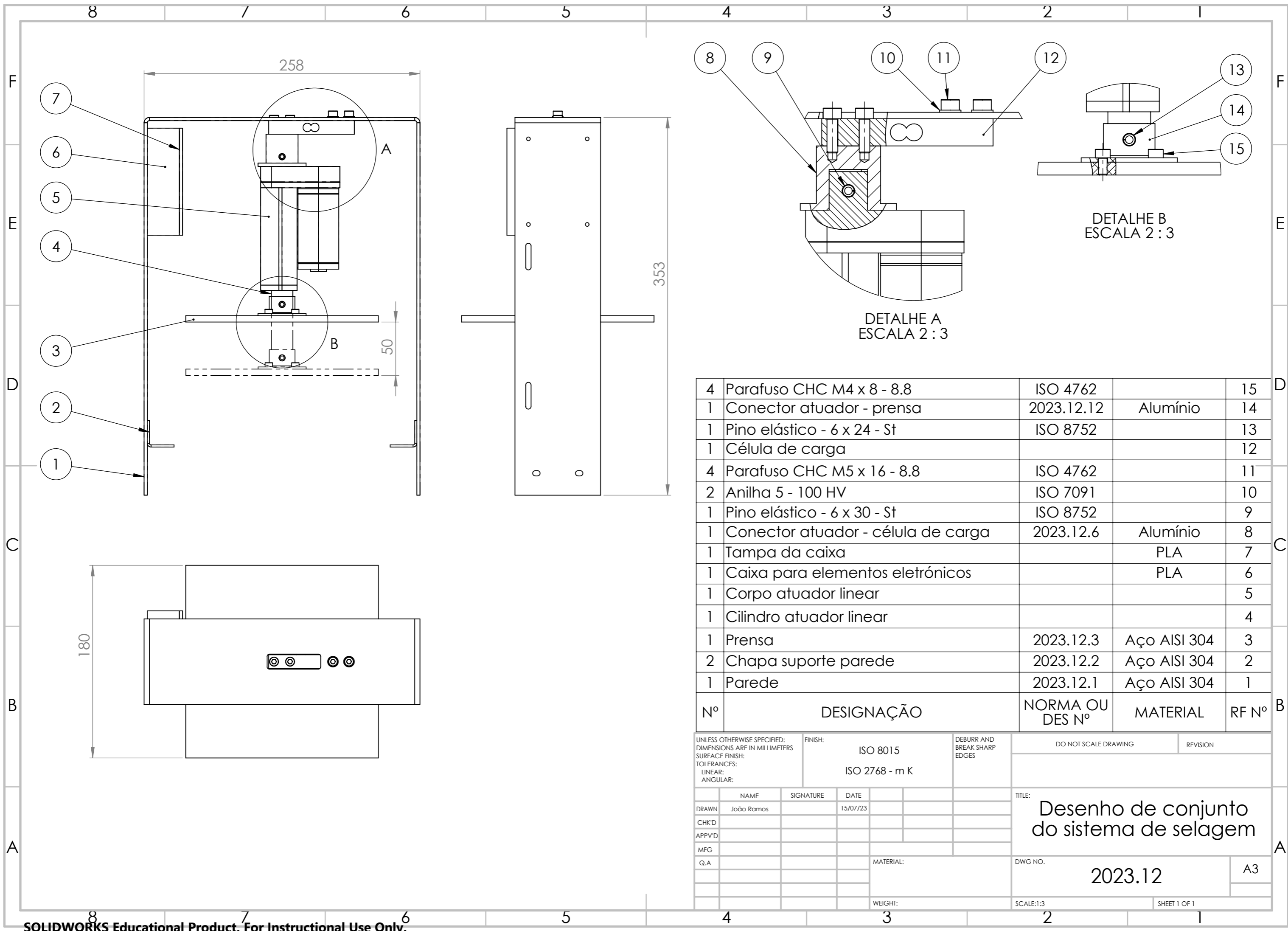
WEIGHT:

SCALE:1:2.5

SHEET 1 OF 1

Apêndice B

Desenho de Conjunto do Sistema de Selagem

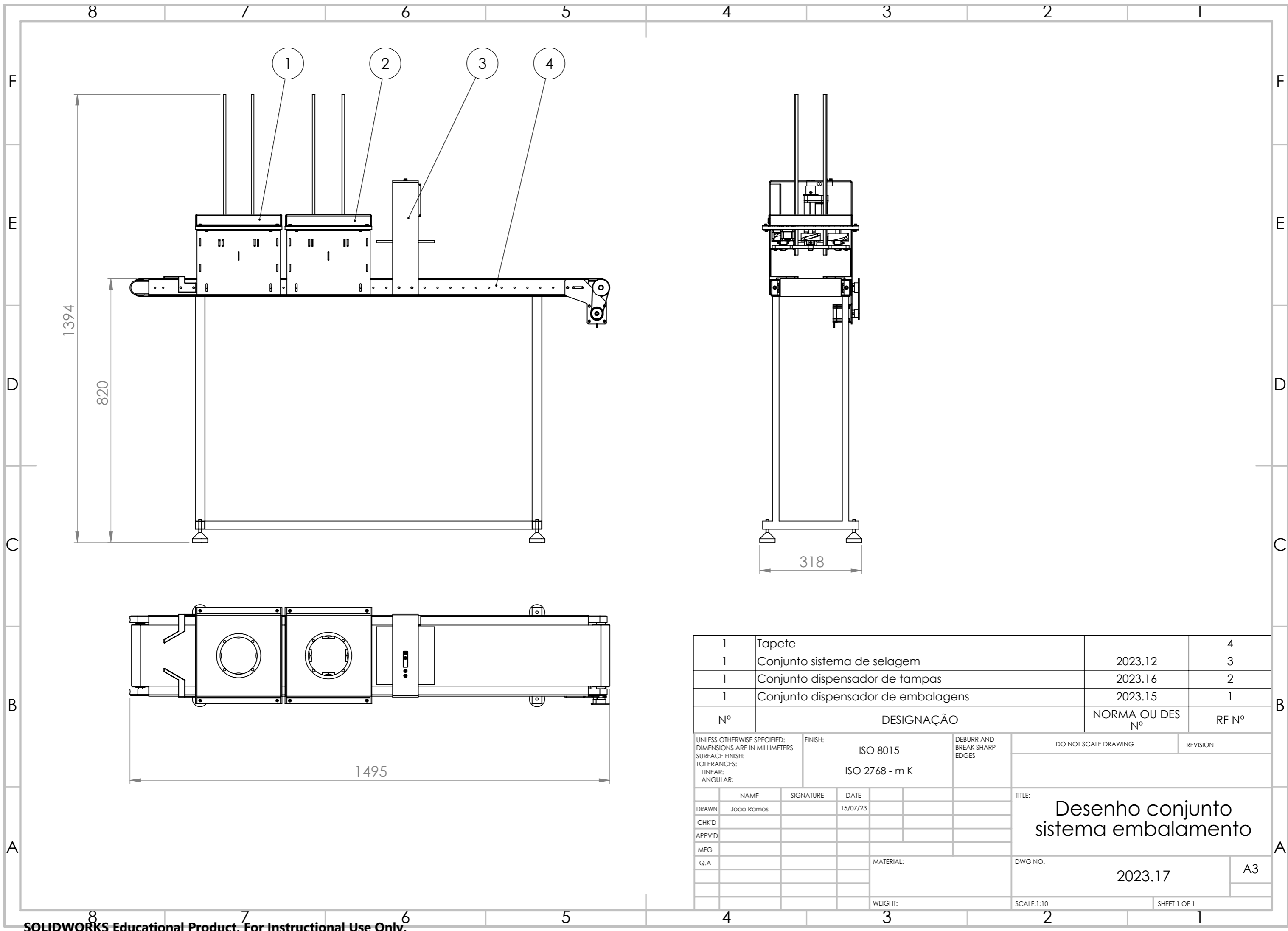


4	Parafuso CHC M4 x 8 - 8.8	ISO 4762		15
1	Conector atuador - prensa	2023.12.12	Alumínio	14
1	Pino elástico - 6 x 24 - St	ISO 8752		13
1	Célula de carga			12
4	Parafuso CHC M5 x 16 - 8.8	ISO 4762		11
2	Anilha 5 - 100 HV	ISO 7091		10
1	Pino elástico - 6 x 30 - St	ISO 8752		9
1	Conector atuador - célula de carga	2023.12.6	Alumínio	8
1	Tampa da caixa		PLA	7
1	Caixa para elementos eletrónicos		PLA	6
1	Corpo atuador linear			5
1	Cilindro atuador linear			4
1	Prensa	2023.12.3	Aço AISI 304	3
2	Chapa suporte parede	2023.12.2	Aço AISI 304	2
1	Parede	2023.12.1	Aço AISI 304	1
Nº	DESIGNAÇÃO	NORMA OU DES Nº	MATERIAL	RF Nº

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH: ISO 8015 ISO 2768 - m K	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE: Desenho de conjunto do sistema de selagem		
DRAWN João Ramos		15/07/23			
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A			MATERIAL:	DWG NO. 2023.12	A3
		WEIGHT:	SCALE:1:3	SHEET 1 OF 1	

Apêndice C

Desenho de Conjunto do Sistema Geral



1	Tapete		4
1	Conjunto sistema de selagem	2023.12	3
1	Conjunto dispensador de tampas	2023.16	2
1	Conjunto dispensador de embalagens	2023.15	1
Nº	DESIGNAÇÃO	NORMA OU DES Nº	RF Nº
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH: ISO 8015 ISO 2768 - m K	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES
		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN CHK'D APPV'D MFG Q.A		TITLE: Desenho conjunto sistema embalagem	
NAME: João Ramos SIGNATURE: DATE: 15/07/23		DWG NO. 2023.17	A3
WEIGHT:		SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1

Apêndice D

Tabela do Cálculo à Fadiga do Veio do Dispensador

Tabela D.1: Tabela da fadiga do veio.

	1	2	3
Posição x (mm)	60	77	87
d (mm)	12	12	8
D (mm)	-	16	16
r (mm)	-	0,5	0,5
D/d	-	1,33	2
r/d	-	0,0417	0,0625
K_t (flexão)	0	2,1	2,1
K_t (torção)	0	1,75	1,75
K_t (Axial)	-	-	-
q (flexão)	1	0,65	0,65
q (torção)	1	0,65	0,65
K_f (flexão)	0	1,72	1,72
K_f (torção)	0	1,49	1,49
σ_u (MPa)	480	480	480
σ_y (MPa)	300	300	300
σ_e (MPa)	240	240	240
τ_m (MPa)	0,051	0,051	0,174
K_s	0,934	0,934	0,972
K_{AS}	0,8	0,8	0,8
σ_{ec} (MPa)	179,392	179,392	186,588
τ_e (MPa)	139,200	139,200	139,200
τ_{ec} (MPa)	104,047	104,047	108,221
σ_m (MPa)	0	0	0
M_f (Nm)	0,014	0,02	0
M_t (Nm)	0,017	0,017	0,017
σ_a (MPa)	0,080	0,010	0
τ_f (MPa)	0,051	0,051	0,174
σ_{fmax} (MPa)	0	0,018	0
τ_{fmax} (MPa)	0	0,076	0,258
$\sigma_{est}^e q$ (MPa)	0,134	0,017	0
$\tau_{est}^e q$ (MPa)	0	0,076	0,258
σ_{VM} (MPa)	0,134	0,134	0,447
γ	2236,206	2245,477	670,909

Apêndice E

Projeto Elétrico



EPLAN GmbH & Co. KG

An der alten Ziegelei 2
 40789 Monheim am Rhein
 Phone +49 (0)2173 - 39 64 - 0

Company / customer **Muster GmbH**
 Project description **Projeto do sistema de embalagem da cozinha Cook4Me**
 Job number **IEC_bas003_sample_project**
 Commission **EPLAN**

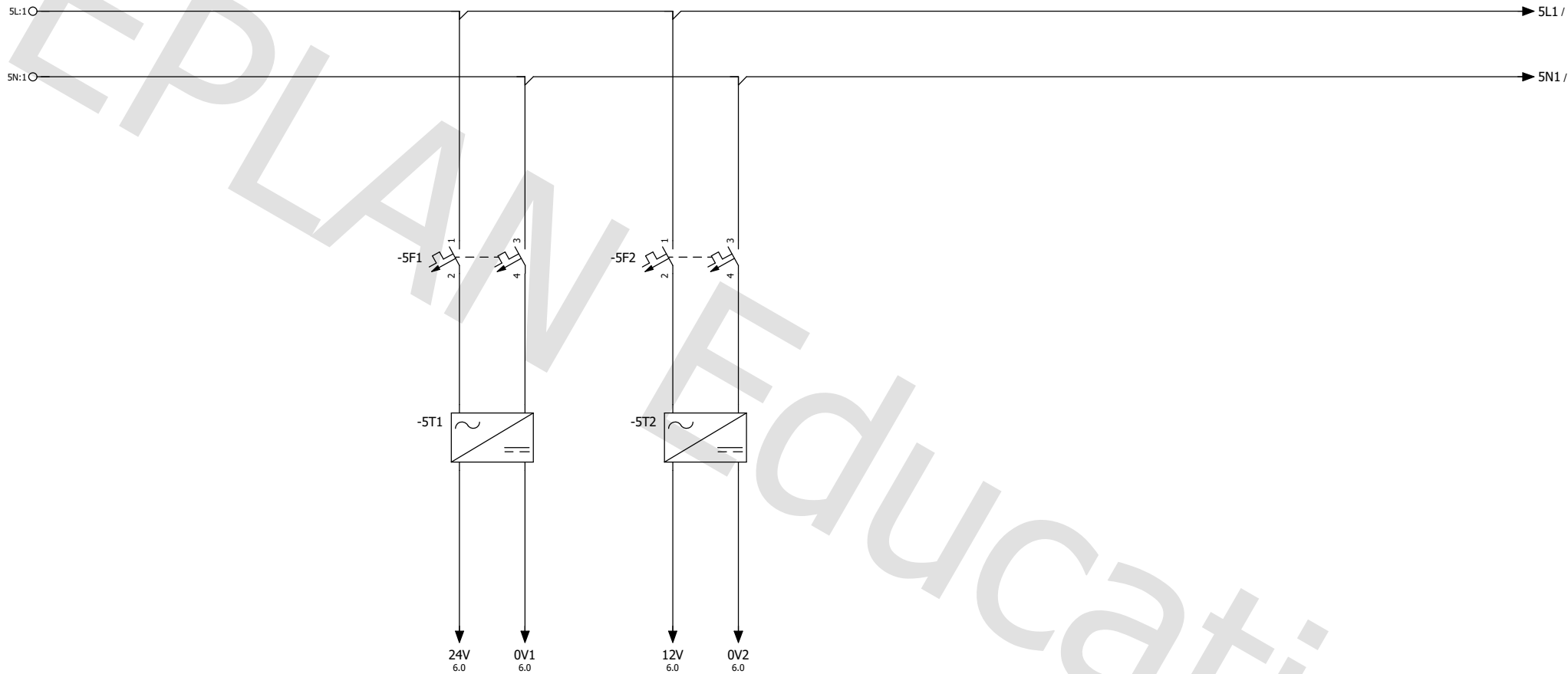
Manufacturer (company) **EPLAN GmbH & Co. KG**
 Path **Page structure with function designation and location designation and document type**
 Project name **Sistema_embalamento**
 Make
 Type
 Place of installation
 Responsible for project **EPL**
 Part feature


Created on **13/06/2023**
 Edit date **01/09/2023** by (short name) **joao.ramos99** Number of pages **6**

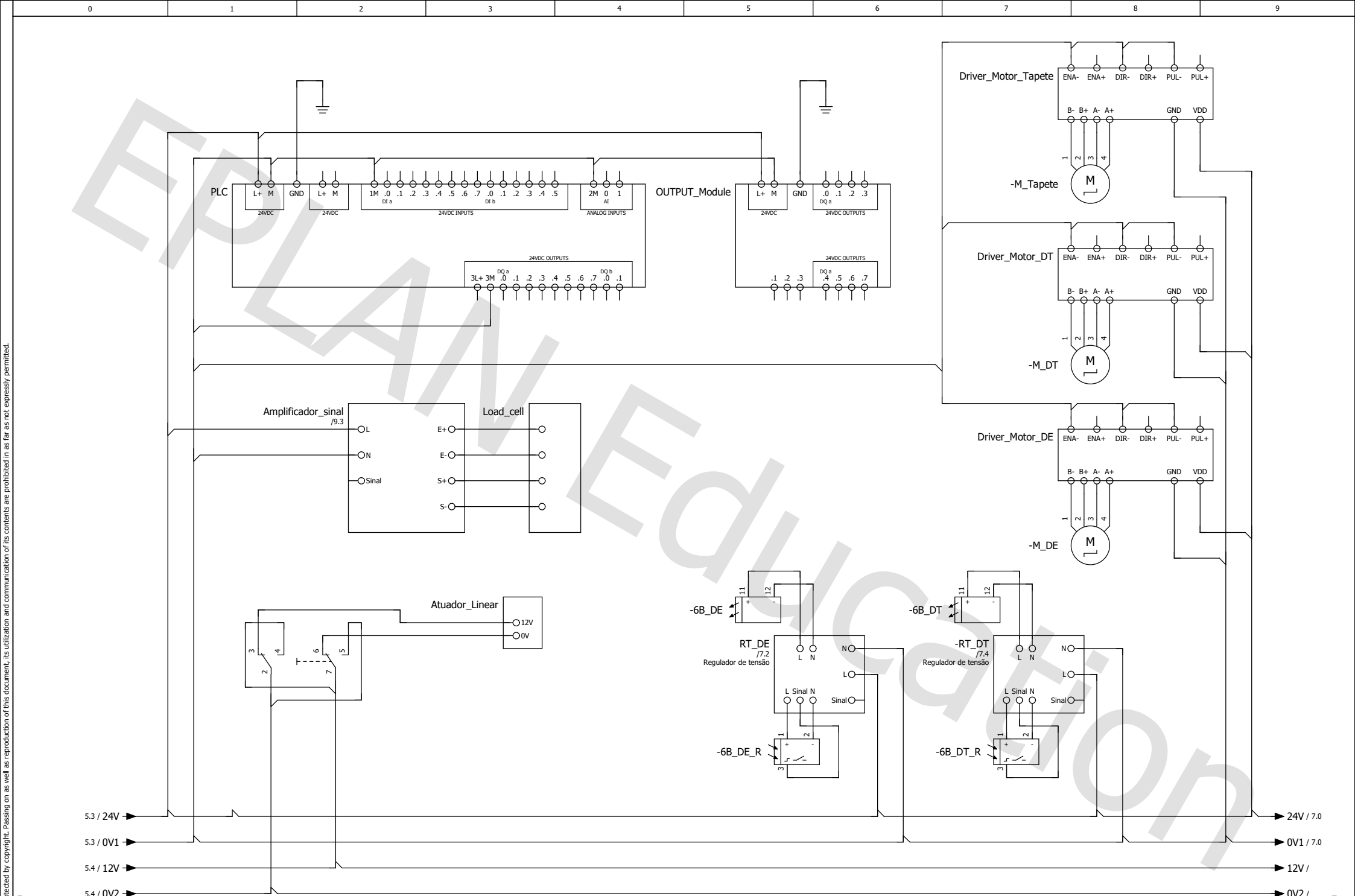
Protected by copyright. Passing on as well as reproduction of this document, its utilization and communication of its contents are prohibited in as far as not expressly permitted.

			Project name	Sistema_embalamento	Job number	IEC_bas003_sample_project	EPLAN GmbH & Co. KG			=	&	
			Projeto do sistema de embalagem da cozinha Cook4Me		Drawing number					+	Page	
Modification	Date	Name	Creator	João Ramos	Approved by			Date	28/08/2023	Ed.	joao.ramos99	
											Page	1 from

Protected by copyright. Passing on as well as reproduction of this document, its utilization and communication of its contents are prohibited in as far as not expressly permitted.

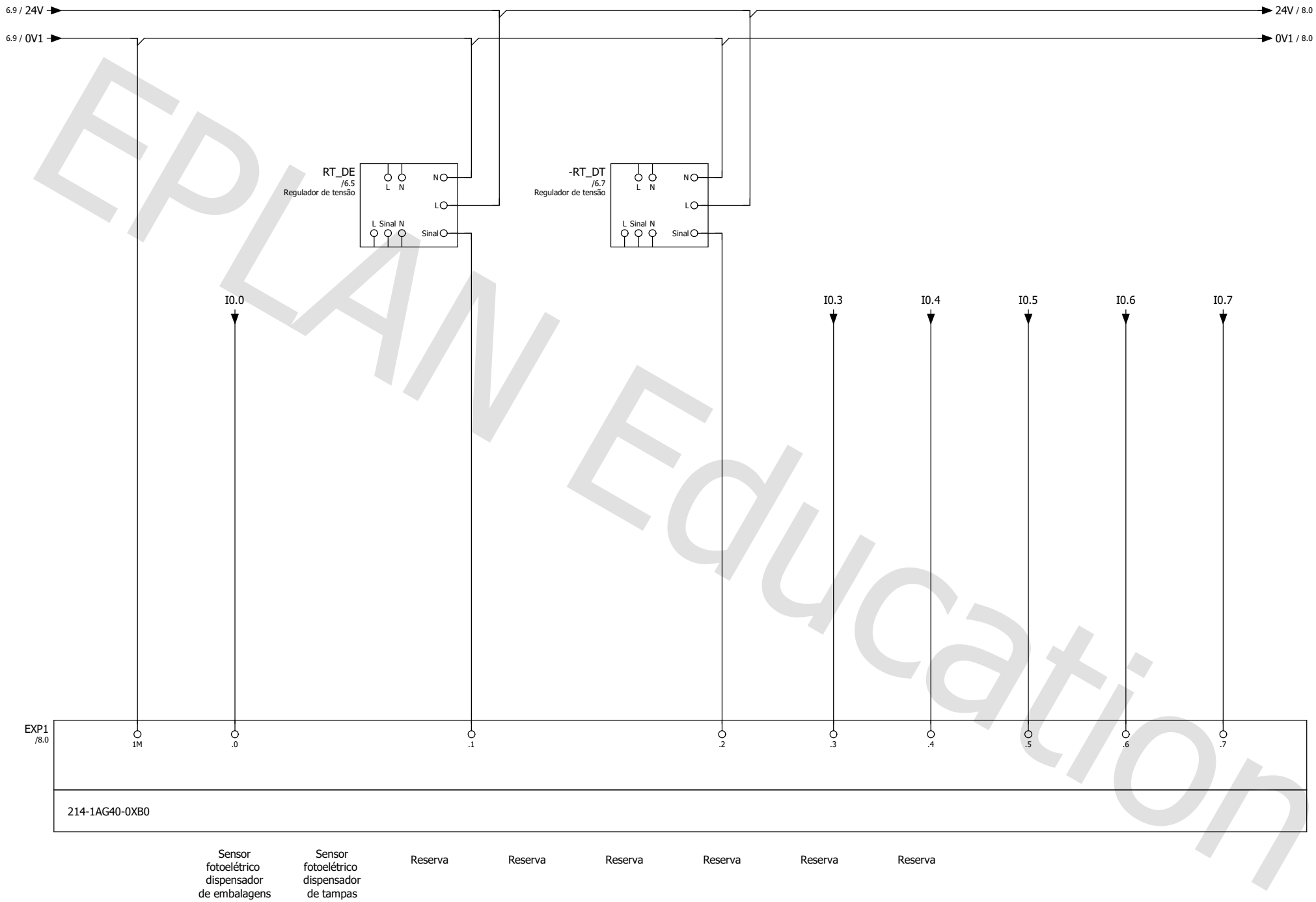


			Project name	Sistema_embalamento	Job number	IEC_bas003_sample_project	EPLAN GmbH & Co. KG		Distribuição de potência		=		&		
			Projeto do sistema de embalamento da cozinha Cook4Me		Drawing number							+		Page	5
Modification	Date	Name	Creator	João Ramos	Approved by				Date	01/09/2023	Ed.	joao.ramos99	Page	2 from	6




Protected by copyright. Passing on as well as reproduction of this document, its utilization and communication of its contents are prohibited in as far as not expressly permitted.

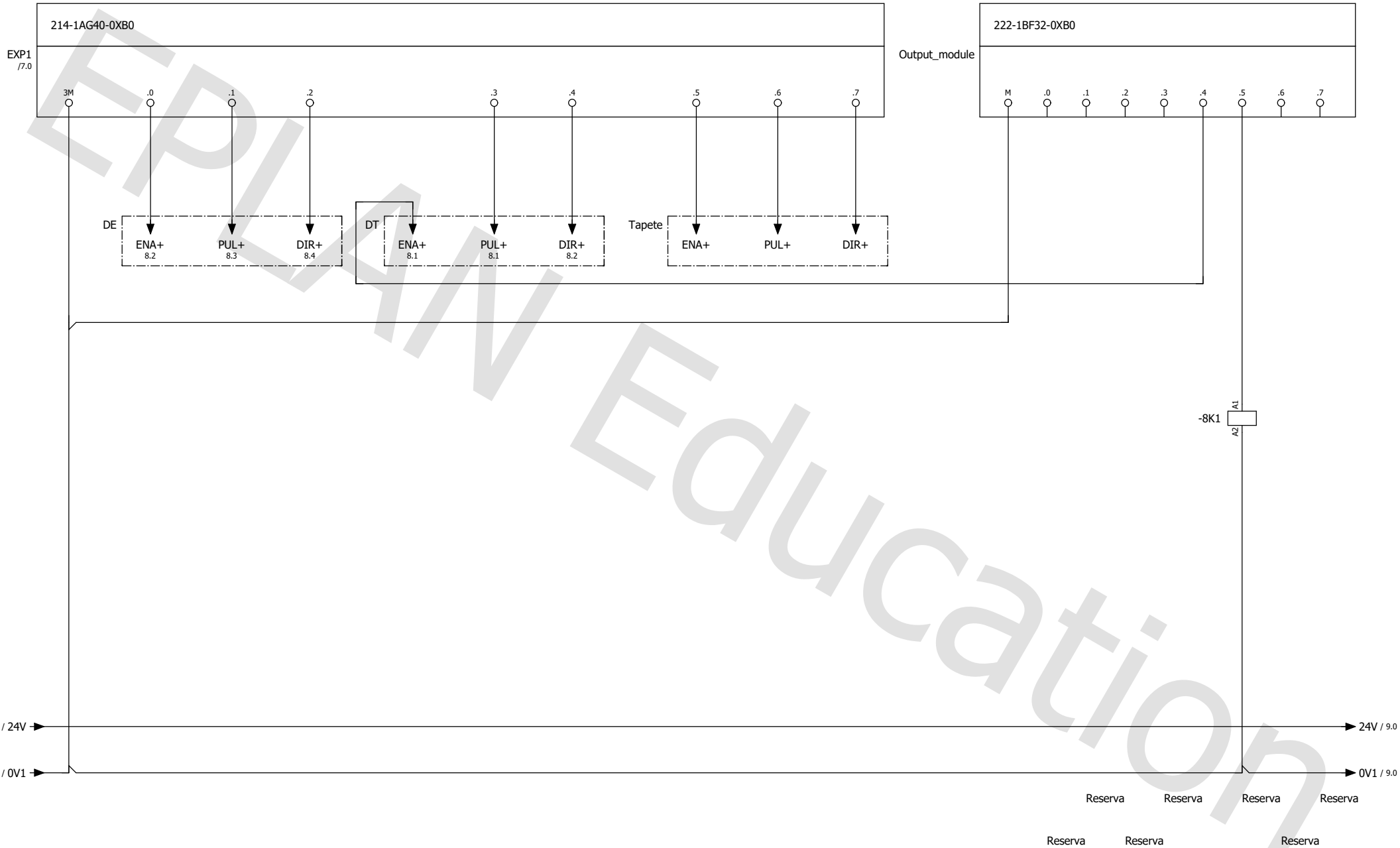
			Project name	Sistema_embalamento	Job number	IEC_bas03_sample_project	EPLAN GmbH & Co. KG	Alimentação		=	&
			Projeto do sistema de embalagem da cozinha Cook4Me		Drawing number					+	Page
Modification	Date	Name	Creator	João Ramos	Approved by			Date	01/09/2023	Ed.	joao.ramos99
										Page	3 from 7



Sensor fotoelétrico dispensador de embalagens Sensor fotoelétrico dispensador de tampas Reserva Reserva Reserva Reserva Reserva Reserva

Protected by copyright. Passing on as well as reproduction of this document, its utilization and communication of its contents are prohibited in as far as not expressly permitted.

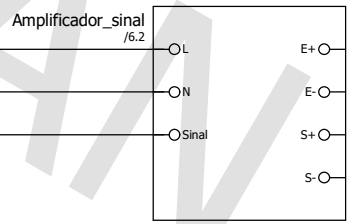
			Project name	Sistema_embalamento	Job number	IEC_bas003_sample_project	EPLAN GmbH & Co. KG		Entradas Digitais	=	&		
			Projeto do sistema de embalagem da cozinha Cook4Me	Drawing number								Page	7
Modification	Date	Name	Creator	João Ramos	Approved by				Date	01/09/2023	Ed.	joao.ramos99	Page



Protected by copyright. Passing on as well as reproduction of this document, its utilization and communication of its contents are prohibited in as far as not expressly permitted.


			Project name	Sistema_embalamento	Job number	IEC_bas003_sample_project	EPLAN GmbH & Co. KG	Saídas digitais		=		&
			Projeto do sistema de embalagem da cozinha Cook4Me		Drawing number							Page
Modification	Date	Name	Creator	João Ramos	Approved by			Date	01/09/2023	Ed.	joao.ramos99	Page
												5 from





EXP1 /7.0	2M	0	1
214-1AG40-0XB0			

Protected by copyright. Passing on as well as reproduction of this document, its utilization and communication of its contents are prohibited in as far as not expressly permitted.

			Project name	Sistema_embalamento	Job number	IEC_bas003_sample_project	EPLAN GmbH & Co. KG		Entradas Analógicas	=	&					
			Projeto do sistema de embalagem da cozinha Cook4Me		Drawing number					+	Page	9				
Modification	Date	Name	Creator	João Ramos	Approved by				Date	01/09/2023	Ed.	joao.ramos99	Page	6	from	