



TÉCNICO
LISBOA

Desenvolvimento de uma máquina automática de extração, refrigeração e disponibilização de bebidas gaseificadas

Frederico António Lopes Policarpo Simões Filipe

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Alexandra Bento Moutinho
Prof. Paulo José da Costa Branco

Júri

Presidente: Prof. Duarte Pedro Mata de Oliveira Valério
Orientador: Prof. Paulo José da Costa Branco
Vogal: Prof. João Carlos Prata dos Reis

Setembro 2021

“There’s a way to do it better – find it”
Thomas A. Edison

Agradecimentos

Começo por agradecer aos meus orientadores, Professor Paulo Branco e Professora Alexandra Moutinho, pela disponibilidade e acompanhamento ao longo desta dissertação e pelas suas valiosas contribuições para o desenvolvimento da mesma.

Um agradecimento especial ao Arquiteto Pedro Vicente pela partilha de conhecimentos, pela disponibilidade demonstrada e pelo empenho no sucesso desta dissertação.

Agradeço também a quem me acompanhou no laboratório de máquinas elétricas, em especial ao Mestre Francisco Silva, por todo o conhecimento partilhado e disponibilidade em ajudar.

Agradeço a todos os meus amigos que me acompanharam neste percurso, especialmente o Manuel Bessa Leite e o João Moura, com quem partilhei muitos bons momentos no IST.

Por último, à minha namorada, Inês, e a toda a minha família, especialmente à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão Gonçalo, a quem agradeço todo o apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim e nos meus objetivos.

Resumo

A cerveja é o segmento de bebidas alcoólicas mais importante a nível mundial. No entanto, esta indústria não tem demonstrado muitos avanços tecnológicos. Nesta dissertação, é desenvolvido um protótipo de uma máquina automática de extração, refrigeração e disponibilização de bebidas gaseificadas. Este protótipo pretende substituir os sistemas normalmente utilizados que contemplam vários procedimentos com baixa precisão realizados pelo ser humano e que podem prejudicar a qualidade da cerveja. Este trabalho começa por identificar as soluções existentes no mercado. São analisados os componentes que normalmente estão presentes num sistema de cerveja à pressão e os fatores que influenciam a sua qualidade. Para o seu desenvolvimento, o protótipo é dividido em dois sistemas, um responsável pela extração e refrigeração da cerveja e outro pela disponibilização de cerveja. Enquanto para o primeiro são adquiridos componentes padrão no mercado, o foco desta dissertação é o segundo sistema e são identificadas as funcionalidades necessárias para a automatização do processo de disponibilização. O projeto eletromecânico de cada foi realizado através da integração dos componentes responsáveis pela execução das mesmas. Foi também realizado o projeto de automação, através da modelação do processo e o seu controlo automatizado. Desta forma, foi utilizado um controlador responsável por comandar os atuadores do sistema e verificar o sucesso do processo através de sensores e interruptores. Através de testes de fiabilidade, é avaliado o desempenho do protótipo e os resultados validam o desenvolvimento de uma máquina automática que permita a correta disponibilização de bebidas gaseificadas, cumprindo o objetivo inicial desta dissertação.

Palavras-chave: Máquina automática; Protótipo; Automação; Projeto; Bebidas gaseificadas; Cerveja.

Abstract

Beer is the most important alcoholic beverage segment in the world. However, this industry has not shown many technological advances. In this thesis, a prototype of an automatic machine for the extraction, refrigeration and availability of carbonated beverages was developed. This prototype intends to replace the systems normally used that contemplate several low precision procedures performed manually which can harm the quality of the beer. This work starts by identifying solutions that exist in the market. The components that are commonly present in a draft beer system and the factors which influence its quality are analyzed. To achieve its development, the prototype was divided into two systems, one responsible for extracting and cooling the beer and another for serving it. While for the first system the standard components were acquired, the focus of this thesis was the second system. Thereby, the necessary functionalities for the automation of the drafting process were identified. The electromechanical design of each one was performed through the integration of components responsible for their execution. The automation design was also carried out, through the modeling of the process and its automated control. To accomplish this, a controller was used, which is responsible for controlling the actuators of the system and verifying the success of the process through sensors and switches. Through reliability tests, the performance of the prototype was evaluated and the results validated the development of an automatic machine that allows the correct availability of carbonated beverages, thereby accomplishing the initial objective of this study.

Keywords: Automatic machine; Prototype; Automation; Project; Carbonated beverages; Beer.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Figuras	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Estado da Arte	2
1.3 Objetivos e Contribuições	9
1.4 Estrutura da Dissertação	9
2 Visão Geral do Projeto	11
2.1 Sistema de Extração e Refrigeração	12
2.2 Sistema de Disponibilização	16
3 Projeto Eletromecânico	17
3.1 Estrutura de Suporte	17
3.2 Disponibilização de Copos	19
3.3 Inclinação do Copo	22
3.4 Saída do Líquido	25
3.5 Deslocação da Válvula	26
3.6 Interação com o Utilizador	28
3.7 Abertura e Fecho da Porta	29
4 Projeto de Automação	31
4.1 Controlador	32
4.2 Cadeias de Atuação e Medida	33
4.3 Modelo do Processo	46
5 Protótipo Desenvolvido e Análise de Resultados	53
5.1 Alimentação	54
5.2 Desempenho do Sistema	58
5.3 Custo	59

6 Conclusões e Trabalho Futuro	63
6.1 Recomendações	63
Referências	65
A Dimensionamento estático do veio	67
B Programação Arduino	71

Lista de Tabelas

3.1	Motor NEMA 17HS4401.	24
3.2	Veio.	24
3.3	Servo-válvula Velleman VMA422.	26
3.4	Conjunto fuso trapezoidal e porca.	27
3.5	Botão basculante com uma posição estável: R13-112.	28
4.1	Arduino Mega 2560 Rev 3.	33
4.2	Fim-de-curso.	34
4.3	Sensor infravermelhos.	35
4.4	Sensor de fluxo.	36
4.5	Diodo SB140.	44
4.6	Fototransístor EL817C.	44
4.7	Componentes utilizados no modelo do processo.	46
4.8	Componentes e respectivos sinais lidos pelo controlador para verificar as decisões representadas em cada diagrama.	51
4.9	Responsáveis pelas ações representadas em cada diagrama.	51
5.1	Valores registados pelos componentes.	54
5.2	Fonte de alimentação Mean Well RS150-24.	54
5.3	Botão basculante com duas posições estáveis.	55
5.4	Isolador DC/DC de 24 V para 12 V - REC6-2412SRW/R10/A.	56
5.5	Desempenho da atividade Posicionamento inicial.	58
5.6	Custo relativo ao sistema de Extração e Refrigeração.	59
5.7	Custo relativo ao sistema de Disponibilização.	60
5.8	Custo dos produtos consumíveis.	60

Lista de Figuras

1.1	The Oracle®Touch.	2
1.2	LEI 700 Touch.	3
1.3	Coca-Cola Freestyle 9100.	4
1.4	RevolMatic.	5
1.5	Beerjet.	5
1.6	PourMyBeer.	6
1.7	EBar.	6
1.8	Máquina de self-service de cervejas na Cervejaria Ramiro.	7
1.9	MB WAY Beer Point.	7
1.10	Máquina de venda automática da Soapstand.	8
1.11	Máquina de venda automática da Drinkfill.	8
2.1	Componentes utilizados no sistema de Extração e Refrigeração.	13
2.2	Conectores de ligação rápida.	16
3.1	Esqueleto da estrutura com Perfil V-Slot 2020.	18
3.2	Método de fixação através de porca T-Nut e parafuso M4 no Perfil V-Slot 2020.	18
3.3	Disposição dos acrílicos no subsistema Estrutura de Suporte.	19
3.4	Dispensador e torre de copos.	20
3.5	Copo de cartão reciclável 20 cL.	20
3.6	Método de fixação do dispensador à estrutura de suporte.	21
3.7	Disposição do dispensador na face superior de acrílico.	22
3.8	Suporte de copos.	23
3.9	Subsistema Inclinação do Copo.	23
3.10	Alinhamento do suporte de copos com o dispensador.	24
3.11	Servo-válvula e solução de direcionar tubo de saída.	25
3.12	Válvula manual de segurança.	26
3.13	Subsistema Deslocação da Válvula.	27
3.14	Subsistema Interação com o Utilizador.	28
3.15	Subsistema Abertura e Fecho da Porta.	29
4.1	Processo automatizado.	32
4.2	Arduino Mega 2560 Rev 3.	33
4.3	Cadeias de atuação e de medida.	34
4.4	Disposição dos fins-de-curso e do sensor infravermelhos no subsistema Inclinação do Copo.	35
4.5	Disposição do sensor de fluxo.	36
4.6	Disposição dos fins-de-curso no subsistema Deslocação da Válvula.	37

4.7	Disposição dos fins-de-curso no subsistema Abertura e Fecho da Porta.	38
4.8	Sensor com entrada e saída normalizadas.	39
4.9	Cabos de ligação Jumper Dupont.	39
4.10	Condicionamento de sinal para os interruptores.	40
4.11	Circuito equivalente de Thévenin.	41
4.12	Circuito equivalente para o filtro RC utilizado.	41
4.13	Circuito equivalente quando o circuito está aberto.	42
4.14	Utilização de díodo e transistor com carga indutiva.	43
4.15	Condicionamento de sinal da válvula.	45
4.16	Condicionamento de sinal dos motores incorporados no dispensador.	45
4.17	Diagrama de atividades do processo.	47
4.18	Diagrama de atividades do Posicionamento inicial.	47
4.19	Diagrama de atividades da Reposição de copos.	48
4.20	Diagrama de atividades da Disponibilização de cerveja.	49
4.21	Diagrama de caso de uso do sistema.	50
5.1	Protótipo desenvolvido.	53
5.2	Ligação Schuko e botão para a fonte de alimentação.	55
5.3	Disposição do equipamento responsável pela alimentação e condicionamento de sinal.	56
5.4	Esquema representativo da alimentação dos componentes.	57
A.1	Diagrama de corpo livre do veio.	67
A.2	Diagrama de esforço transversal (V) e momento fletor (M) com o copo cheio na posição vertical.	68
A.3	Diagrama de esforço transversal (V) e momento fletor (M) com copo a 45° e com metade da capacidade.	69

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A indústria da cerveja é uma das mais antigas do mundo. Segundo Poelmans e Swinnen [1], os primeiros indícios de produção de cerveja remontam a 7000 anos atrás. Uma indústria tão antiga já deveria ter progressos significativos com o avanço da tecnologia, mas isso não se demonstrou até há poucos anos. Esta era uma indústria muito tradicional, as tecnologias utilizadas por muitos dos produtores de cerveja não sofriam alterações há mais de 100 anos. Os novos avanços tecnológicos raramente eram aplicados no seu processo de produção e a maioria dos produtores acreditava que qualquer alteração poderia prejudicar a qualidade ou a imagem da própria cerveja.

Nos últimos anos, tem-se verificado uma mudança de comportamentos, onde fusões e compras entre as diferentes marcas criaram grandes grupos de produtores de cerveja e levaram a um mercado muito concentrado, tendo forçado estes grupos a serem mais eficientes que nunca. As novas tecnologias eram então utilizadas para aumentar a produtividade, poupar energia ou mesmo na criação de novos produtos [2].

Atualmente, o mercado de produção de cerveja permanece muito concentrado, com 60% da produção global a ser realizada pelas cinco maiores empresas do sector, sendo que metade desse valor é detido pelo líder de mercado. A nível mundial, a cerveja é o segmento de bebidas alcoólicas mais importante e em 2019 a sua receita rondou os 524 mil milhões de euros [3].

Em Portugal, segundo o estudo inMarket2020 [4], o tipo de cerveja mais consumida pelos portugueses é a cerveja branca, a ser consumida por 86,6% dos inquiridos, seguindo-se as sidras (60,1%), cerveja preta (49,8%), cervejas artesanais (44,4%), cerveja com sabores (38,3%) e cerveja sem álcool (22,4%). Através do mesmo estudo pode-se concluir que as marcas de cerveja preferidas pelos portugueses são a Super Bock e a Sagres.

Para além da forma como é produzida, a cerveja também pode variar na forma como é distribuída ao cliente, podendo ser embalada de três formas: em lata, garrafa ou barril. A cerveja em lata ou em garrafa está pronta para ser vendida e consumida pelo cliente final. No entanto, a cerveja armazenada em barril necessita de um sistema de extração para que a mesma seja retirada à pressão, sendo esta forma de consumo o foco desta dissertação.

A falta de inovação deste setor foi um fator decisivo para a realização desta dissertação. Existe um grande problema com o serviço de uma cerveja retirada à pressão. Mesmo sendo a mesma pessoa a servir e a mesma máquina utilizada, esta pode chegar ao cliente de diferentes formas. Há muitas variáveis envolvidas que podem alterar o resultado final, desde a pressão a que é extraída a cerveja do barril até à inclinação do copo. De forma a otimizar este processo, é necessário estudar as variáveis

que devem ser controladas e que processos podem ser automatizados, permitindo que a cerveja seja servida do mesmo modo repetidamente.

1.2 Estado da Arte

No início do desenvolvimento de um produto inovador, é fundamental a realização de investigação sobre o que existe na atualidade e que fatores diferenciadores ditam o sucesso dos mesmos. Nesta secção são apresentados alguns exemplos de diferentes tipos de máquinas de distribuição de líquidos.

1.2.1 Máquinas de café

Máquinas automáticas de café para uso pessoal

Acompanhando o rápido avanço da tecnologia, os fabricantes de máquinas de café estão empenhados em desenvolver equipamento inovador e amigo do ambiente. Os fabricantes estão também focados em integrar soluções *touchscreen* nas suas máquinas automáticas. As máquinas começam a ser vendidas com estas soluções e com tecnologia inteligente que permitem ao utilizador conectar-se e controlar a preparação do café em tempo real, assim como agendar uma preparação futura. A incorporação de soluções avançadas de tecnologia vai continuar a ter um impacto positivo no crescimento do mercado global de máquinas de café automáticas [5].

Um exemplo de uma máquina automática de café de topo é the Oracle®Touch (Figura 1.1). A máquina apresenta um ecrã táctil que facilita bastante o processo de preparar o café, tendo três passos principais: moer os grãos de café, preparar o café e preparar o leite a adicionar. Além disso, funcionalidades como um moedor automático e um controlador digital de temperatura (PID) que permite obter temperatura de água com precisão permitem destacar-se da concorrência.



Figura 1.1: The Oracle®Touch.¹

¹Retirada de <https://www.breville.com/us/en/products/espresso/bes990.html>.

Máquinas de venda automática de café

Existe uma grande variedade de máquinas de venda automática de café, inclusivamente podem-se encontrar várias máquinas diferentes no mesmo local. Nas máquinas mais tradicionais, as opções estão pré-definidas e pode-se escolher desde um café curto até um *cappuccino*, escolhendo a bebida e a quantidade de açúcar através de botões incorporados na máquina. As máquinas mais recentes são equipadas com tecnologias mais avançadas como ecrãs tácteis que permitem mais opções de escolha e personalização.

Entre as máquinas mais recentes e tecnologicamente evoluídas está a LEI 700 Touch (Figura 1.2), comercializada pela Bianchi Vending. Esta é uma versão equipada com a preparação tradicional de um expresso italiano, podendo variar entre doses de 7 a 14 g, assegurando condições ótimas para a preparação do café. Para além do café, tem uma unidade de arrefecimento incorporada que permite a preparação de bebidas instantâneas frias. Os compartimentos dos produtos, os agitadores, o dispensador de copos e o compartimento de disponibilização da bebida encontram-se num braço extraível para facilitar o acesso aos mesmos e a manutenção da própria máquina. Entre as funcionalidades a destacar encontram-se a possibilidade de telemetria, possibilidade de integrar qualquer método de pagamento e um ecrã táctil capaz de reproduzir conteúdos multimédia como fotografias dos produtos, a sua descrição, composição a nível de ingredientes e nutricional. Pode também ser associada a máquinas de venda automática de outros produtos como águas, sumos e outros alimentos permitindo a criação de menus e promoções de forma a facilitar o processo de venda e a tornar mais atrativa.

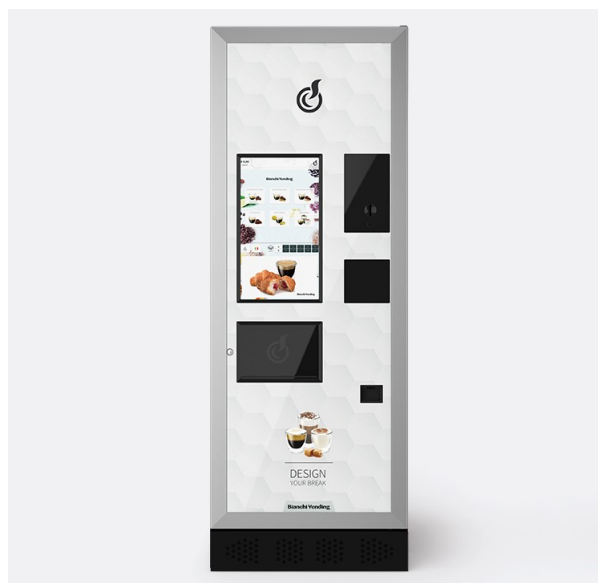


Figura 1.2: LEI 700 Touch.²

1.2.2 Máquinas dispensadoras de refrigerantes

Segundo Mary Bellis [6], o início das máquinas dispensadoras de refrigerantes, também conhecidas por *soda fountain*, acompanhado com o aparecimento da *soda water*, datam ao início do século XIX. O seu desenvolvimento inicial continuou até à criação de um monopólio liderado por James W. Tufts com os restantes três maiores fabricantes das mesmas em 1891, a que chamaram American Soda Fountain Company. No início do século XX, deu-se uma revolução na indústria com o redesenhar da máquina por Edwin Haeusser Heisenger e, até à década de 60, era habitual as pessoas juntarem-se à volta de

²Retirada de <https://www.bianchivending.com/en/machine/lei700-touch/>.

uma *soda fountain*, habitualmente encontradas em boticários ou gelatarias. A sua popularidade atinge o auge com o aparecimento das cadeias de *fast food* e têm vindo a desenvolver-se e a acompanhar a tecnologia até aos dias de hoje.

Uma das mais atuais e inovadoras é a Coca-Cola Freestyle 9100 (ver Figura 1.3) existindo mais de 50 mil unidades de Coca-Cola Freestyle que servem 14 milhões de bebidas por dia nas mais variadas áreas do sector de restauração e noutros locais como parques de diversão tanto nos Estados Unidos da América como noutros países. A nova atração da Coca-Cola foi apresentada em 2018 na exposição da National Restaurant Association em Chicago e conta com um ecrã tátil de alta definição e com conectividade através de Bluetooth. A segunda funcionalidade permite ao utilizador conectar-se através da aplicação de telemóvel quando entra num centro comercial onde exista uma máquina destas e selecionar as suas bebidas preferidas ou fazer misturas entre as mesmas. A máquina foi preparada para serem adicionadas futuras opções que ainda não estão ativadas como capacidade de áudio, sensores óticos e equipamento novo que suporte a adição de novas categorias de bebidas como chás, café frio e novas variedades de sumos [7].



Figura 1.3: Coca-Cola Freestyle 9100.³

1.2.3 Máquinas de cerveja automáticas

Nesta secção, são apresentadas várias máquinas de apoio a pontos de venda de cerveja à pressão com alguns processos automatizados, assim como soluções de venda automática de cerveja tanto no estrangeiro como em Portugal.

RevolMatic

A máquina desenvolvida pela RevolMatic (ver Figura 1.4) serve de apoio a um ponto de venda. A partir do seu mecanismo automático de dispensar copos e da sua plataforma giratória, tem capacidade de servir cerveja ou outra bebida gaseificada interruptamente. Deste modo, é necessário que o funcionário retire as bebidas já servidas permitindo a disponibilização de novo copo pela máquina. A máquina permite o controlo da velocidade e do volume de bebida por copo através de um ecrã tátil e pode ser controlada através de uma aplicação para dispositivo móvel.

³Retirada de <https://www.coca-colafreestyle.com/find-freestyle-locations/>.



Figura 1.4: RevolMatic.⁴

Beerjet

À semelhança do produto anterior, a Beerjet (ver Figura 1.5) também serve de apoio a um ponto de venda. Neste caso, os copos são dispostos num suporte que é colocado na máquina por um funcionário. Podendo variar entre 4 a 6 torneiras e entre unidade fixa ou móvel, é também possível controlar a altura de serviço dos copos manualmente. Através de um ecrã táctil, é possível escolher o volume do copo, controlar a espuma, além de visualizar o nível de enchimento, temperatura e pressão. A incorporação de um tanque arrefecido por um sistema externo permite servir ininterruptamente durante a mudança de barris.



Figura 1.5: Beerjet.⁵

PourMyBeer

A solução desenvolvida pela PourMyBeer (ver Figura 1.6) consiste na instalação de todo o sistema de extração, refrigeração e disponibilização que permite o consumo *self-service* de cerveja. O sistema de disponibilização permite controlar a quantidade de bebida servida em tempo real. Para utilizar este serviço, o cliente recebe um cartão magnético que permite servir uma cerveja a partir de qualquer torneira. A cada torneira está associado um leitor magnético e um ecrã com a informação da respetiva cerveja.

⁴Retirada de <https://revolmatic.com/en/>.

⁵Retirada de <https://www.beerjet.com/en>.



Figura 1.6: PourMyBeer.⁶

Esta solução também se encontra disponível em Portugal, no estabelecimento Na Medida Beer Tap House, em Cascais.

EBar

EBar é uma empresa do Reino Unido que está a desenvolver uma máquina de venda automática de cerveja (ver Figura 1.7). O processo de venda automática consiste num terminal de pré-pagamento onde o cliente, após seleccionar a quantidade desejada, pode utilizar um dos meios de pagamento disponível para o realizar. De seguida, o cliente tem de retirar os copos do suporte respetivo e colocá-los no compartimento para servir a bebida. Depois de o copo estar colocado, através do seu sistema de dispensar cerveja com patente pendente, conseguem servir duas cervejas em aproximadamente trinta segundos [8].



Figura 1.7: EBar.⁷

Cervejaria Ramiro

Desde 2016, a Cervejaria Ramiro, um restaurante em Lisboa, disponibiliza um sistema de *self-service* de cerveja à pressão (ver Figura 1.8) na entrada do seu estabelecimento [9]. Este serviço foi implementado para as pessoas que se encontram em fila de espera para entrar no restaurante. O processo inicia-se com o utilizador a retirar um copo de plástico de um suporte próprio ao lado da máquina para o colocar no espaço por baixo da torneira. Assim que inserir uma moeda correspondente

⁶Retirada de <https://pourmybeer.com/commercial-tap-solutions/>.

⁷Retirada de <http://www.ebar.online/>.

ao preço pedido, a torneira começa a dispensar cerveja durante um período pré-definido. No fim deste período, o cliente deve retirar o seu copo.



Figura 1.8: Máquina de self-service de cervejas na Cervejaria Ramiro. Retirada de [9].

MB WAY Beer Point

A MB WAY é uma solução que permite fazer compras online ou em lojas físicas, enviar e receber dinheiro entre utilizadores e levantar dinheiro sem necessitar de cartão, através de aplicação própria ou de outras instituições bancárias. A partir de 2017, começou a disponibilizar um serviço de *self-service* de cerveja (ver Figura 1.9) na Altice Arena, uma sala de espetáculos em Lisboa, onde um espectador pode retirar uma cerveja antes ou durante o espetáculo. A utilização deste serviço é bastante simples e citando MB WAY [10]:

“Basta dirigir-se ao Beer Point e selecionar a sua bebida. Selecione na app a opção “O meu número”, apresente o código e confirme o pagamento nas notificações. Depois é só tirar o copo e servir-se!”



Figura 1.9: MB WAY Beer Point. Retirada de [11].

Em Abril de 2018, a MB WAY foi distinguida pelo projeto Beer Point com uma Menção Honrosa na categoria de Espaços Comerciais e Lojas *Pop Up* na cerimónia de prémios de design da Meios & Publicidade [11].

1.2.4 Máquinas de venda automática de líquidos

Soapstand

A Soapstand é uma *startup* presente no Canadá desde 2017 e detém várias máquinas de venda automática de produtos relacionados com a higiene pessoal e limpeza (ver Figura 1.10), entre eles, sabão líquido, champô e detergente. Na própria máquina é possível comprar um recipiente de alumínio para encher com os seus produtos. Esta é uma solução amiga do ambiente que vem de encontro à crescente procura destes produtos obtidos de forma natural e em evitar o desperdício de plásticos [12].



Figura 1.10: Máquina de venda automática da Soapstand. Retirada de [12].

Drinkfill

O mesmo empreendedor que criou a Soapstand, Andy Chou, voltou a apostar no mercado de máquinas de venda automática amigas do ambiente [13]. Neste caso, a Drinkfill é uma startup que desenvolveu uma máquina de reabastecer bebidas, idêntica às *soda fountains* mas associada a bebidas mais saudáveis e com o conceito de reutilizar o recipiente utilizado para armazenar as bebidas. Esta empresa ainda está numa fase inicial não existindo nenhuma máquina no ativo.



Figura 1.11: Máquina de venda automática da Drinkfill.⁸

⁸Retirada de <https://www.drinkfill.com/>.

1.3 Objetivos e Contribuições

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma máquina automática de extração, refrigeração e disponibilização de bebidas gaseificadas, nomeadamente cerveja. Este objetivo pode ser dividido em três objetivos secundários: perceber quais as principais funcionalidades a desenvolver no protótipo e que componentes já existentes no mercado podem ser integrados; automatizar os processos envolvidos na disponibilização da bebida; integração das diferentes funcionalidades num protótipo.

A principal contribuição desta dissertação é o avanço tecnológico na indústria de bebidas alcoólicas gaseificadas através do desenvolvimento de um protótipo funcional integrando a extração, refrigeração e disponibilização de uma bebida autonomamente, com a interação do utilizador bastante reduzida. A dissertação também é especialmente relevante no atual contexto com a pandemia de Covid-19, visto proporcionar a disponibilização de cerveja à pressão sem interação humana.

1.4 Estrutura da Dissertação

Neste capítulo introdutório está apresentada a motivação, uma breve revisão sobre o estado da arte das máquinas de distribuição de líquidos e os objetivos, as contribuições e a estrutura desta dissertação. Depois da Introdução, esta dissertação está dividida em 5 capítulos:

- O capítulo 2 introduz os fatores de qualidade e os componentes normalmente associados a um sistema de cerveja à pressão, divide o protótipo em dois sistemas, sistema de Extração e Refrigeração e sistema de Disponibilização, e explica a abordagem de desenvolvimento aplicada em cada caso;
- No capítulo 3 é descrito o projeto eletromecânico realizado para cada subsistema do sistema de Disponibilização e quais os componentes adquiridos no desenvolvimento dos mesmos;
- O capítulo 4 descreve o projeto de automação realizado, onde são analisadas as cadeias de medida e de atuação e é explicado o modelo do processo automatizado;
- O capítulo 5 apresenta uma análise da alimentação, desempenho e custo de desenvolvimento do protótipo;
- O capítulo 6 apresenta as conclusões e as recomendações para o trabalho futuro.

Capítulo 2

Visão Geral do Projeto

Os fundamentos para preservar a qualidade da cerveja são determinados pelo desenho do sistema de cerveja à pressão [14]. Neste capítulo são abordados os diferentes fatores que influenciam a qualidade de uma cerveja servida à pressão, os componentes normalmente encontrados nestes sistemas e são delineados os sistemas necessários para o desenvolvimento de um protótipo funcional.

Fatores de qualidade

Segundo Reinhold Mertens [14], existem vários fatores que alteram a qualidade de uma cerveja servida à pressão, nomeadamente:

- Temperatura

A temperatura recomendada para consumo está entre os 5 e os 8 °C que varia consoante os hábitos de cada região.

- Tempo fora do barril

Depois de extraída, a cerveja deve estar o mínimo de tempo possível no sistema sendo que se ultrapassar os três dias pode ter influência negativa na qualidade.

- Quantidade de dióxido de carbono

O dióxido de carbono é um componente natural da cerveja resultante do processo de fermentação. Idealmente, a sua quantidade não deve ser alterada enquanto é servida e um fator influenciador é a pressão aplicada no barril para extrair a cerveja.

- Camada de espuma

A camada de espuma revela o sabor e o aroma da cerveja. Fatores importantes para a criação desta camada de espuma são a pressão aplicada no barril, estado técnico e higiénico do dispensador de cerveja e o estado do copo.

- Servir a cerveja

Para servir uma cerveja é necessário verificar alguns parâmetros como a temperatura, pressão, linhas de cerveja limpas, copos lavados, caudal e técnica de servir.

Servir cerveja à pressão com a técnica correta permite uma libertação de dióxido de carbono adequada e a criação da camada de espuma desejada. Esta técnica consiste em quatro passos [15]:

1. Inclinando o copo a 45° e abrindo a torneira completamente;
2. Endireitando gradualmente o copo assim que a cerveja atingir metade da capacidade do copo;
3. Continuando a servir com o copo direito de forma a libertar dióxido de carbono e formar a camada de espuma;
4. Fechando a torneira rapidamente para evitar desperdícios.

Componentes presentes no sistema

Normalmente, um sistema de cerveja à pressão é constituído por nove elementos [15]:

- Barril
- Fonte de gás
- Reguladores de pressão
- Engate
- Linhas de cerveja
- Linhas de gás
- Refrigeração
- Conectores
- Torneira

Tendo em conta os elementos necessários para um sistema de cerveja à pressão, o protótipo foi dividido em dois sistemas. O sistema de Extração e Refrigeração é responsável por extrair a cerveja do barril e arrefecê-la até à sua temperatura ideal de consumo, englobando os oito primeiros elementos da lista anterior. O sistema de Disponibilização substitui a torneira e é responsável por servir e disponibilizar a cerveja à pressão de forma autónoma.

Em relação aos fatores que afetam a qualidade de uma cerveja servida à pressão, o sistema de Extração e Refrigeração garante que a cerveja é servida à temperatura certa e com a pressão adequada e o sistema de Disponibilização assegura que a cerveja é servida com a técnica correta. A camada de espuma é resultado de um bom desempenho dos dois sistemas, aliando pressão correta à qualidade do serviço. O tempo que a cerveja se encontra fora do barril depende da utilização e manutenção do protótipo.

2.1 Sistema de Extração e Refrigeração

Nesta secção são analisados os oito elementos pertencentes ao sistema de Extração e Refrigeração. Para além de mencionar as opções escolhidas para o sistema, são apresentadas outras soluções presentes no mercado. O sistema de Extração e Refrigeração utilizado pode ser observado na Figura 2.1.

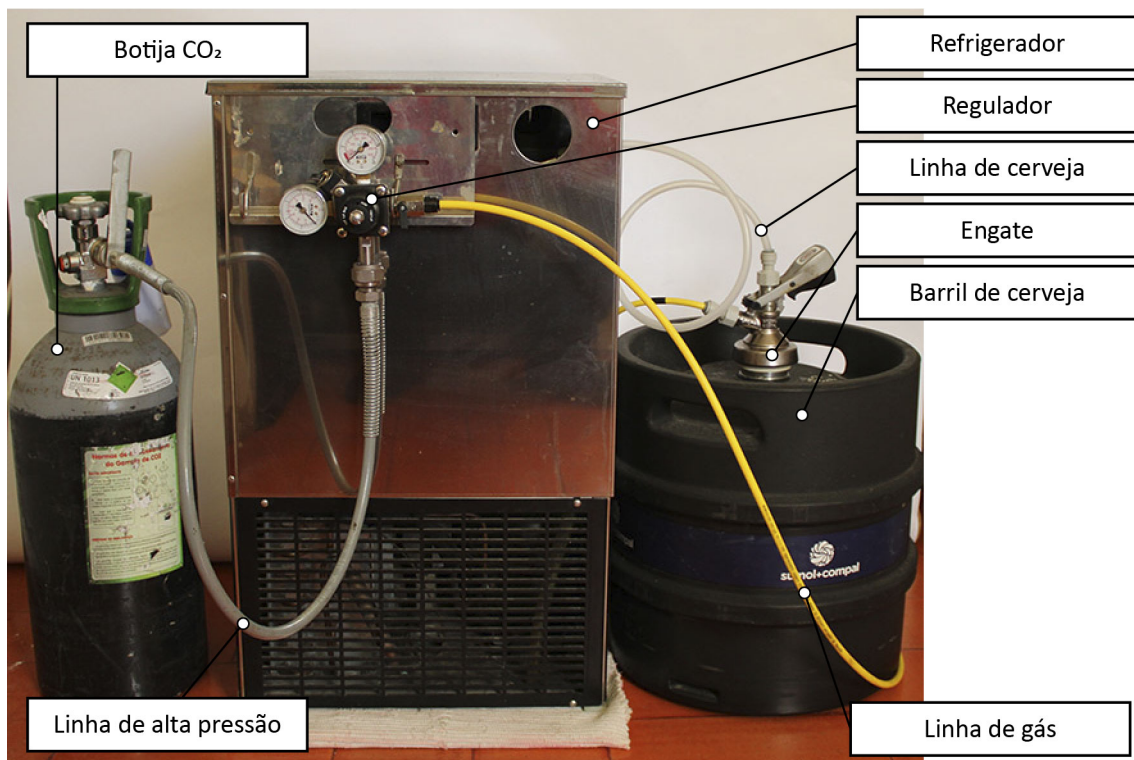


Figura 2.1: Componentes utilizados no sistema de Extração e Refrigeração.

Barril

Os barris permitem que a cerveja seja transportada a granel e servida no copo mantendo a sua qualidade e integridade. A sua constituição protege a cerveja do contacto com o ar e da luz enquanto permite que seja fácil e rapidamente servida. Os barris podem ser feitos de aço inoxidável, com cobertura de borracha, de alumínio ou aço ou barris de utilização única de vários materiais e utilizando diferentes tecnologias [15].

O tipo de barril e as dimensões disponíveis dependem do fornecedor escolhido, sendo que neste projeto foram utilizados barris de 30 L com cobertura de borracha. O tipo de cerveja presente nos barris é cerveja branca, a mais consumida pelos portugueses [4].

Fonte de gás

Sistemas de cerveja à pressão dependem de gás comprimido para extrair a cerveja do barril. Para este fim, deve ser utilizado dióxido de carbono ou uma mistura entre dióxido de carbono com azoto. Dióxido de carbono é a fonte de gás de eleição para sistemas de cerveja à pressão. Injetar este gás no barril permite manter o nível de carbonatação ideal da cerveja e a pressão permite a cerveja percorrer as linhas de cerveja até à torneira [15].

Quando é injetado azoto no barril, este não é absorvido pela cerveja e, por ser um gás inerte, não altera o seu sabor. Assim, a mistura de dióxido de carbono com azoto pode ser utilizada por dois motivos. Segundo R. Mertens [14], é a fonte de gás apropriada para cervejas do tipo Stout, mas quando aplicada a outros tipos de cerveja, esta pode ficar imprópria por a pressão parcial de dióxido de carbono ser demasiado baixa. Segundo a Brewers Association [15], esta mistura de gás também pode ser utilizada para sistemas em que a pressão necessária para manter o nível de carbonatação da cerveja apenas com dióxido de carbono não é suficiente para percorrer a distância entre o barril e o local de disponibilização. Uma mistura entre azoto e dióxido de carbono permite aumentar a pressão introduzida

no barril com dois objetivos: manter o nível de carbonatação da cerveja apropriado e ultrapassar as dificuldades do sistema em termos de distância.

Sistemas que usam ar comprimido como fonte de gás expõem a cerveja ao oxigênio, que produz cheiro e sabor a cartão na cerveja. Os compressores podem contaminar a cerveja, injetando contaminações presentes no ar atmosférico para dentro do barril. Por estas razões, ar comprimido não deve ser utilizado em contacto direto com a cerveja [15].

A disposição dos elementos deste protótipo não implica longas distâncias e como a cerveja utilizada é a cerveja branca, a fonte de gás utilizada é dióxido de carbono.

Reguladores de pressão

Um regulador de pressão ajusta e controla o fluxo de gás de qualquer fonte. Os sistemas de gás têm um regulador associado, constituído normalmente por dois manómetros, um de alta pressão, mostrando a pressão total da fonte e outro mostrando a pressão regulada. As válvulas e um parafuso de ajuste controlam o fluxo de gás que é injetado no barril [15].

Caso o regulador não seja diretamente ligado à fonte, é necessária a instalação de uma linha de alta pressão que suporte pressões até 200 bar [14].

Por questões logísticas e de facilidade de manuseamento, o regulador de pressão não foi montado diretamente na fonte de dióxido de carbono e por isso foi utilizada uma linha de alta pressão. Esta ligação é observável na Figura 2.1.

Engate

O engate é a ligação ao barril responsável pela injeção de gás e extração de cerveja. Quando o engate é acoplado ao barril, este pressiona a válvula permitindo a entrada de dióxido de carbono, isto permite extrair a cerveja do barril e que esta percorra o caminho até à torneira [15]. O barril de cerveja pode ter entradas diferentes sendo que foi utilizado o engate de tipo *Grundy*.

Linhas de cerveja

Entre o engate e a torneira, a cerveja percorre linhas de cerveja escolhidas consoante as necessidades do sistema. Existem várias opções disponíveis no mercado, sendo as linhas de vinil as mais utilizadas para toda ou parte da tubagem de cerveja. As linhas de vinil são altamente flexíveis e a sua utilização é preferível quando as mesmas não estão fixas e podem ser facilmente substituídas [15].

De acordo com fornecedores locais, o diâmetro interno para as linhas de cerveja deve ser de 9.5 mm e por isso foram escolhidas para este projeto linhas de vinil com 9.5 mm de diâmetro interno.

Linhas de gás

As linhas de gás devem aguentar as pressões no sistema de extração. As linhas de vinil com o intuito de serem utilizadas como linhas de gás, normalmente têm uma maior espessura na parede que as linhas de vinil para cerveja. Para ajudar a distinguir entre linhas de gás com linhas de cerveja, são utilizadas linhas de vinil coloridas. Estas linhas coloridas não devem ser utilizadas para cerveja porque impedem uma inspeção visual às mesmas [15].

Tal como as linhas de cerveja, a dimensão do diâmetro interno das linhas de gás foi escolhida consoante com a ajuda de um fornecedor local. Foram utilizadas linhas de vinil com diâmetro interno de 8 mm.

Refrigeração

No que diz respeito à refrigeração, foram comparados sistemas de dois fabricantes, uma empresa com grande presença no mercado europeu, LINDR, e um fabricante português destes sistemas com mais de 70 anos, Frigoríficos Imperial.

Segundo o distribuidor oficial da LINDR [16], existem três tipos de refrigeradores:

- Banho de gelo
- Frio seco
- Híbrido

Os refrigeradores de banho de gelo, como o nome indica, utilizam um tanque de água para arrefecer a cerveja e são adequados para serem incorporados num bar. A água tem de ser colocada no tanque e demora cerca de uma hora e meia a duas horas a arrefecer. Uma vantagem é a possibilidade de arrefecer diferentes tipos de cervejas ao mesmo tempo. Os refrigeradores a frio seco utilizam ar para o arrefecimento da cerveja. Têm um tempo de arrefecimento de 10 minutos que permite serem utilizados como dispensadores móveis. Dentro deste tipo existem modelos com compressor de ar embutido que permitem a extração de cerveja sem injeção de dióxido de carbono. Os refrigeradores híbridos são uma combinação dos dois refrigeradores anteriores, utilizando banho de gelo e ar frio para arrefecimento da cerveja. O recipiente de água é de menor dimensões e o seu tempo de arrefecimento é de quinze minutos pelo que permite ter as vantagens dos outros tipos de refrigeradores, um tempo de arrefecimento reduzido e a opção de arrefecer diferentes bebidas em simultâneo.

A empresa Frigoríficos Imperial fabrica essencialmente refrigeradores de banho de gelo, tendo disponíveis modelos com diferentes capacidades. Também tem disponível um modelo com tecnologia de frio seco e com um compressor de ar incorporado.

Por questões de acessibilidade, foi utilizado um refrigerador de banho de gelo com capacidade para 100 litros por hora, semelhante ao modelo V100 fabricado por Frigoríficos Imperial.

Conectores

Os conectores são utilizados para ligar diferentes componentes com as linhas de cerveja e de gás, variando o tamanho conforme a sua finalidade. Existem diferentes tipos de conectores para esta finalidade. Entre eles, destacam-se as ligações rápidas que facilitam a limpeza e substituição de linhas quando necessário. Os conectores utilizados neste projeto são de ligação rápida e estão representados na Figura 2.2.



Figura 2.2: Conectores de ligação rápida.

2.2 Sistema de Disponibilização

Para o desenvolvimento do sistema de Disponibilização, foi necessário dividir o mesmo em diferentes subsistemas. Cada subsistema tem por base uma funcionalidade e estão agrupados consoante a sua relevância.

Os subsistemas principais correspondem às funcionalidades diretamente envolvidas nos processos de servir e disponibilizar um copo de cerveja. Os subsistemas deste grupo são:

- Disponibilização de Copos
- Inclinação do Copo
- Saída do Líquido

Os subsistemas complementares, apesar de não serem vitais para o funcionamento do sistema, são responsáveis por garantir a segurança do sistema, possibilitar a interação com o utilizador e ultrapassar constrangimentos entre subsistemas principais. Nesta categoria, estão os subsistemas seguintes:

- Estrutura de Suporte
- Deslocação da Válvula
- Interação com o Utilizador
- Abertura e Fecho da Porta

O projeto eletromecânico dos subsistemas principais e complementares encontra-se no capítulo 3. O projeto de automação do sistema, onde é descrito o controlo automatizado do processo realizado, está descrito no capítulo 4.

Capítulo 3

Projeto Eletromecânico

Neste capítulo, é explicado o processo de desenvolvimento dos subsistemas que necessitam de projeto eletromecânico. Depois de delineado o objetivo de cada um, são descritas as soluções encontradas para os alcançar. Consoante a necessidade de cada subsistema, foi necessário adquirir componentes, desenhar peças para impressão 3D ou maquinar componentes.

Relativamente à aquisição de componentes, foram seguidos os seguintes critérios:

1. Desempenho mecânico suficiente em termos de resolução, precisão e repetibilidade;
2. Facilidade de integração com outros dispositivos e estrutura do sistema;
3. Disponibilidade de fornecedores e custo associado.

3.1 Estrutura de Suporte

A escolha de uma estrutura de suporte que permita uma fácil integração dos subsistemas foi um dos primeiros passos para o desenvolvimento do sistema de Disponibilização. Para além da durabilidade e rigidez dos materiais escolhidos, o principal requisito é possibilitar uma fácil interligação, sobreposição e alteração dos componentes e da disposição geral dos subsistemas. Como componente base deste subsistema foi escolhido o Perfil V-Slot 2020 de alumínio, normalmente utilizado nas impressoras 3D. O esqueleto da estrutura é composto por 7 perfis, cuja disposição está representada na Figura 3.1 e a sua dimensão total é de 240 mm x 250 mm x 290 mm.

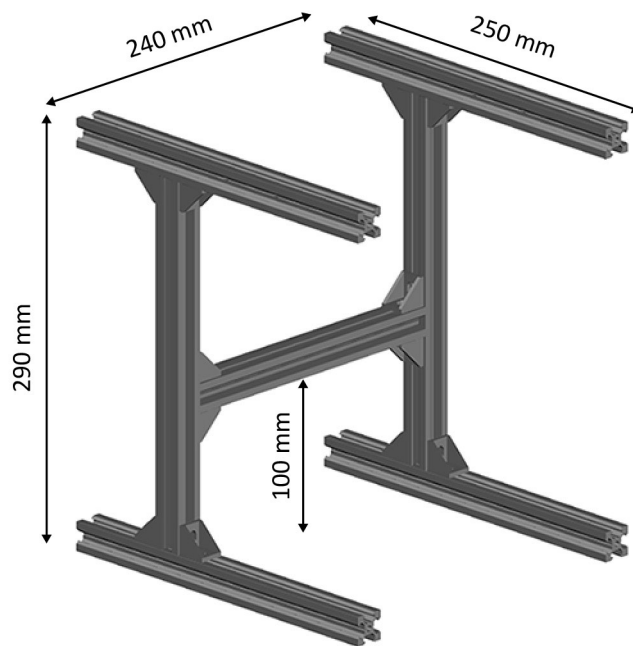


Figura 3.1: Esqueleto da estrutura com Perfil V-Slot 2020.

As ligações entre os perfis são realizadas por cantos em L próprios para o Perfil V-Slot 2020. Para fixar estes cantos, assim como as restantes peças apoiadas na estrutura é necessária uma porca em T com rosca M4, denominada de T-Nut, e parafusos M4 com o seu comprimento a depender da peça de ligação. O método de fixação realizado através da T-Nut está representado na Figura 3.2.

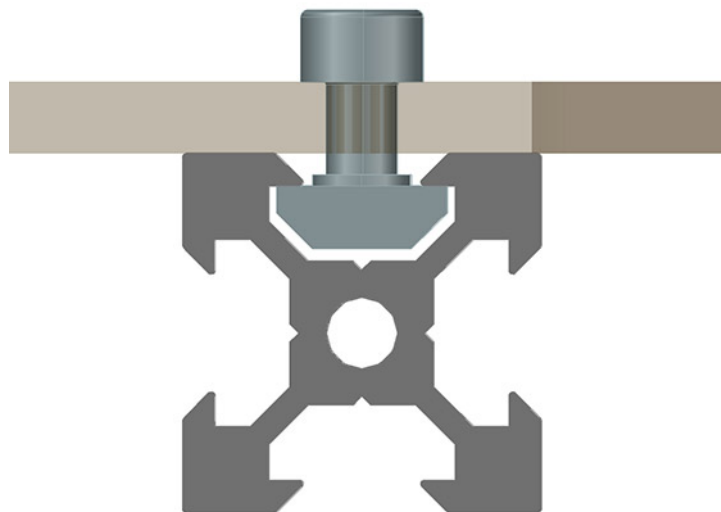


Figura 3.2: Método de fixação através de porca T-Nut e parafuso M4 no Perfil V-Slot 2020.

De modo a reforçar a robustez e a segurança da máquina, foi adicionada uma estrutura externa de acrílico com uma espessura de 4 mm que permite proteger os componentes de agentes externos. As dimensões externas deste sistema com os acrílicos são de 370 mm x 270 mm x 300 mm como

é observável na Figura 3.3. Com o objetivo de minimizar as vibrações resultantes do sistema e de garantir maior estabilidade à estrutura, foi impresso em 3D um conjunto de 4 apoios com o filamento TPU e foram colocados dois ao longo de cada perfil da base. Como medida de segurança adicional foi adicionado um tabuleiro de acrílico apoiado no acrílico da base para armazenar os desperdícios. O acrílico da face de trás do protótipo foi recortado de forma a facilitar a remoção do tabuleiro para se efetuar a limpeza do mesmo.

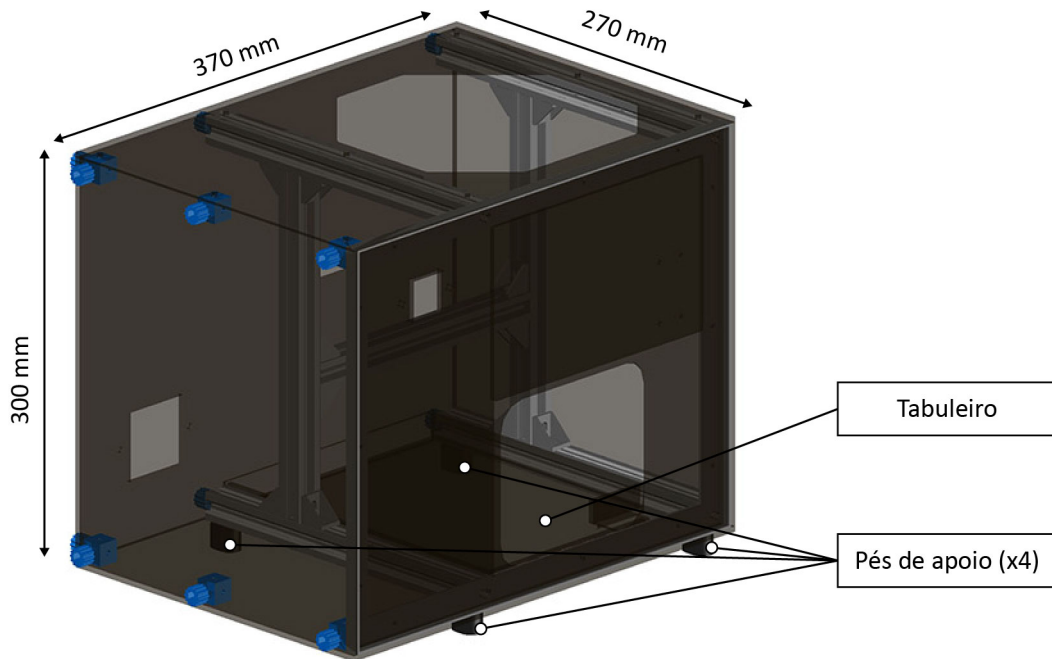


Figura 3.3: Disposição dos acrílicos no subsistema Estrutura de Suporte.

3.2 Disponibilização de Copos

Uma das funcionalidades essenciais deste projeto é a disponibilização automática de copos. Esta é uma característica normalmente encontrada em máquinas de venda automática de café como as que foram analisadas na secção 1.2.1. O sistema de disponibilização adquirido permite a disponibilização automática dos copos assim como o armazenamento dos mesmos. Este sistema divide-se em dois componentes, o dispensador e a torre de copos, que se encontram na Figura 3.4.

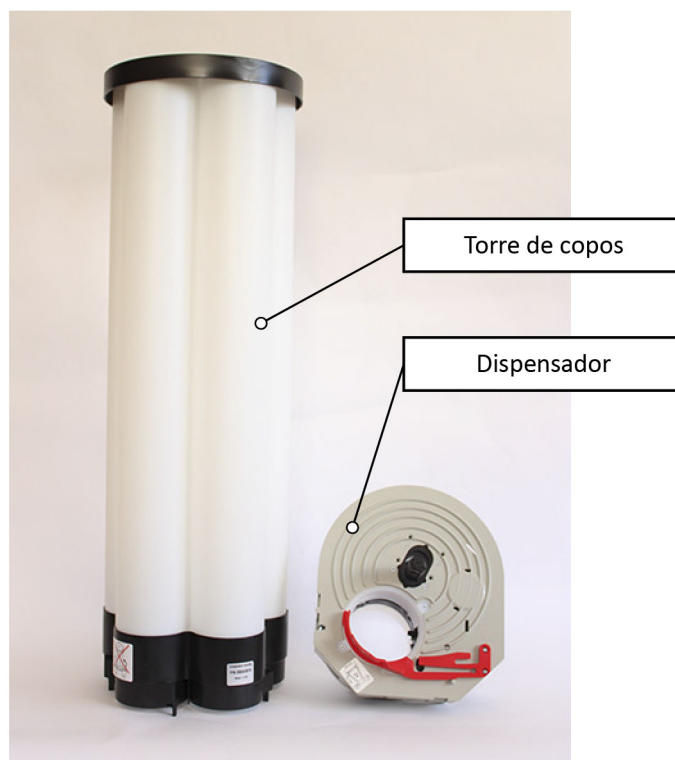


Figura 3.4: Dispensador e torre de copos.

Segundo a Lei n.º 76/2019, de 2 de setembro, não será possível a disponibilização de loiça de plástico de utilização única por parte do setor de restauração e de bebidas (Diário da República n.º 167/2019). Tendo em conta que o dispensador está dimensionado para copos com diâmetro e bordo específicos e cumprindo com este normativo legal, foi escolhido um copo de cartão reciclável com capacidade de 20 cL (Figura 3.5).

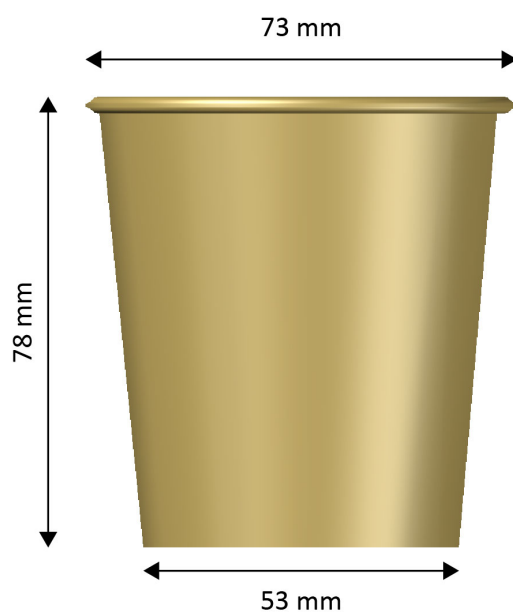


Figura 3.5: Copo de cartão reciclável 20 cL.

O dispensador tem dois motores incorporados com tensão operacional de 24 VDC. O primeiro, Motor Cup Splitter, é responsável por permitir a saída de um copo de cada vez. O segundo, Motor Cup Turret, é responsável pela rotação da torre de copos. Além dos motores, o dispensador tem 3 fins-de-curso incorporados que permitem detetar três estados: fim de ciclo na disponibilização do copo; presença de copo no dispensador; fim de ciclo da rotação da torre de copos. A torre de copos é composta por cinco tubos de armazenamento, sendo possível armazenar até 445 copos.

Existem vários pontos de fixação de altura ajustável no dispensador pelo que foram utilizados os 4 presentes nas laterais, fixando-o à estrutura de suporte. Neste caso, não são necessárias peças de ligação, tendo sido feitos 4 furos nos perfis respetivos e o dispensador é fixo através de parafusos, permitindo uma maior precisão no seu alinhamento. Este método é observável na Figura 3.6. O acrílico da face superior foi recortado de forma a que parte do dispensador fique em contacto com o acrílico e outra parte entre dentro da máquina, visível na Figura 3.7.

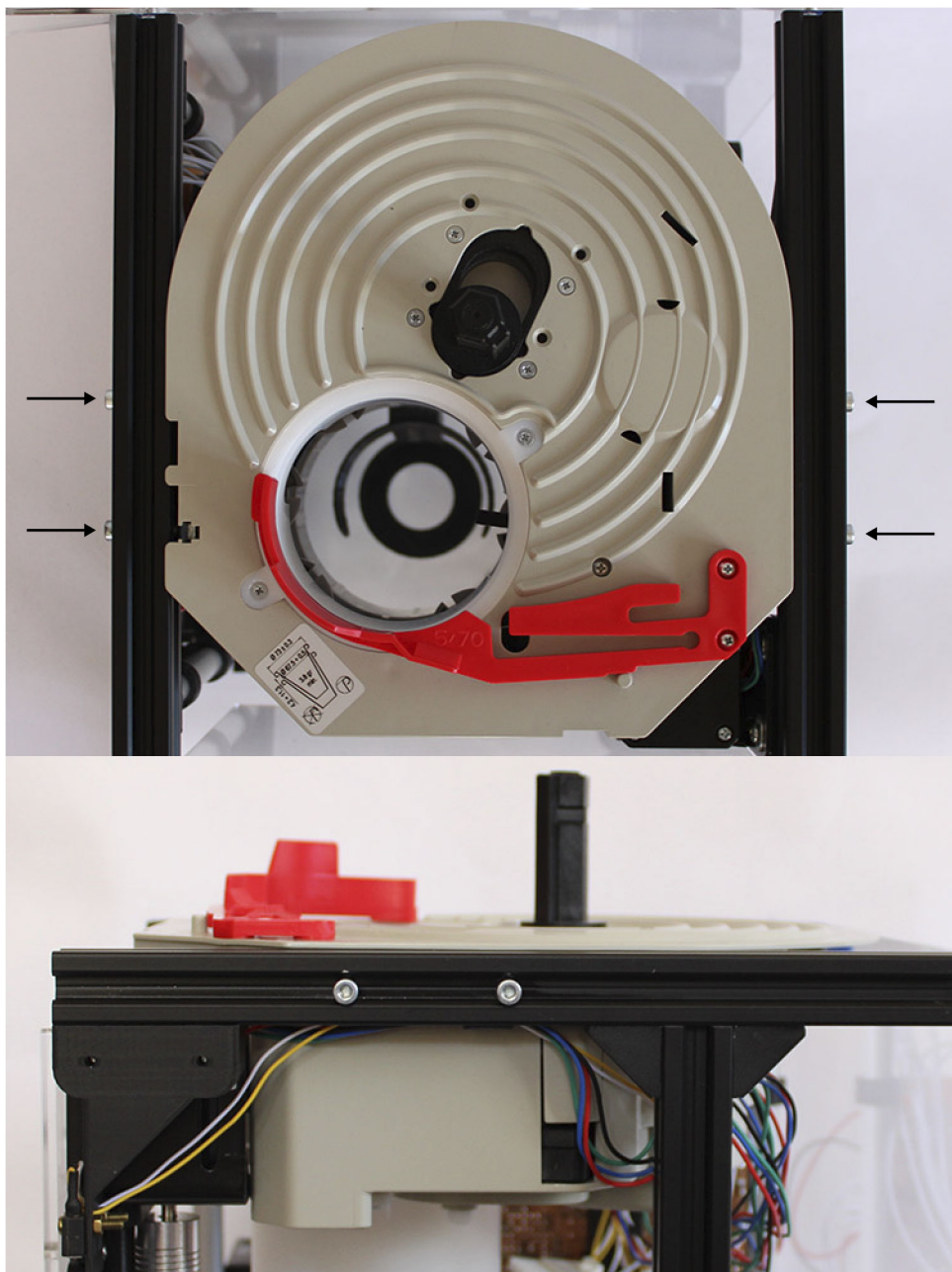


Figura 3.6: Método de fixação do dispensador à estrutura de suporte.

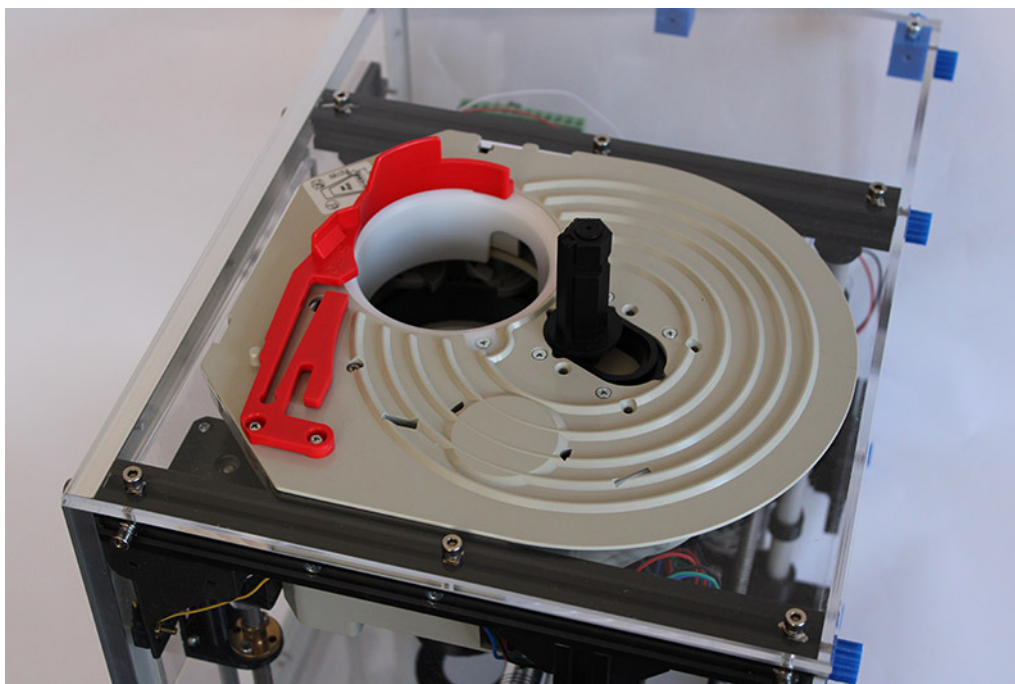


Figura 3.7: Disposição do dispensador na face superior de acrílico.

3.3 Inclinação do Copo

Como referido na secção 2, servir uma cerveja com a técnica correta implica a inclinação do copo. Deste modo, foi necessário projetar um subsistema com o objetivo de controlar essa inclinação durante a saída de cerveja. Para isso é necessário um suporte para o copo com a possibilidade de inclinação e um dispositivo responsável pela inclinação do mesmo.

De forma a desenvolver uma solução para este subsistema, foi necessário analisar o subsistema Disponibilização de Copos. Quando um copo é libertado pelo dispensador, é necessário que seja recebido pelo suporte sem que existam ressaltos ou falhas na receção do mesmo. Além disso, também é necessário assegurar que o copo se mantém no suporte de copos durante a inclinação e o enchimento do mesmo. Por outro lado, é fundamental que o utilizador consiga retirar o copo cheio do suporte sem contratempos. Tendo em conta estes constrangimentos, o suporte de copos foi desenhado de acordo com as dimensões do copo representado na Figura 3.5 e impresso em PLA. Este foi um processo iterativo, onde foram testadas várias soluções para o suporte de copos, sendo que a solução utilizada no protótipo é observável na Figura 3.8.

A solução encontrada para inclinar o suporte de copos está representada na Figura 3.9 e consiste num motor passo-a-passo conectado a um veio de alumínio através de uma união elástica. A extremidade do veio oposta ao motor entra num rolamento fixo à estrutura de suporte que assegura o alinhamento do veio com o motor. O suporte de copos foi desenhado de modo a encaixar no veio e a sua localização é alinhada com a saída do dispensador para que o copo entre diretamente no suporte de copos (ver Figura 3.10). O veio foi maquinado nas duas extremidades de forma a ter 5 mm de diâmetro, assegurando compatibilidade com o rolamento e a união elástica. As características do motor passo-a-passo e do veio de alumínio encontram-se nas Tabelas 3.1 e 3.2, respetivamente. Em relação à ligação com a estrutura, o rolamento é fixo à estrutura através de um apoio impresso em 3D e o motor é fixo através de um apoio adquirido com o mesmo.



Figura 3.8: Suporte de copos.

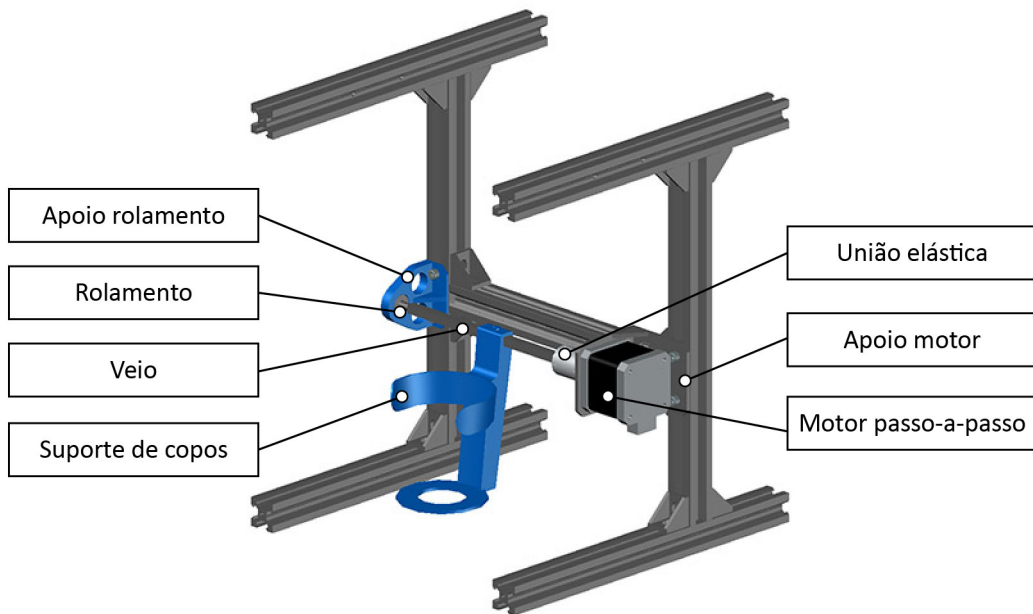


Figura 3.9: Subsistema Inclinação do Copo.

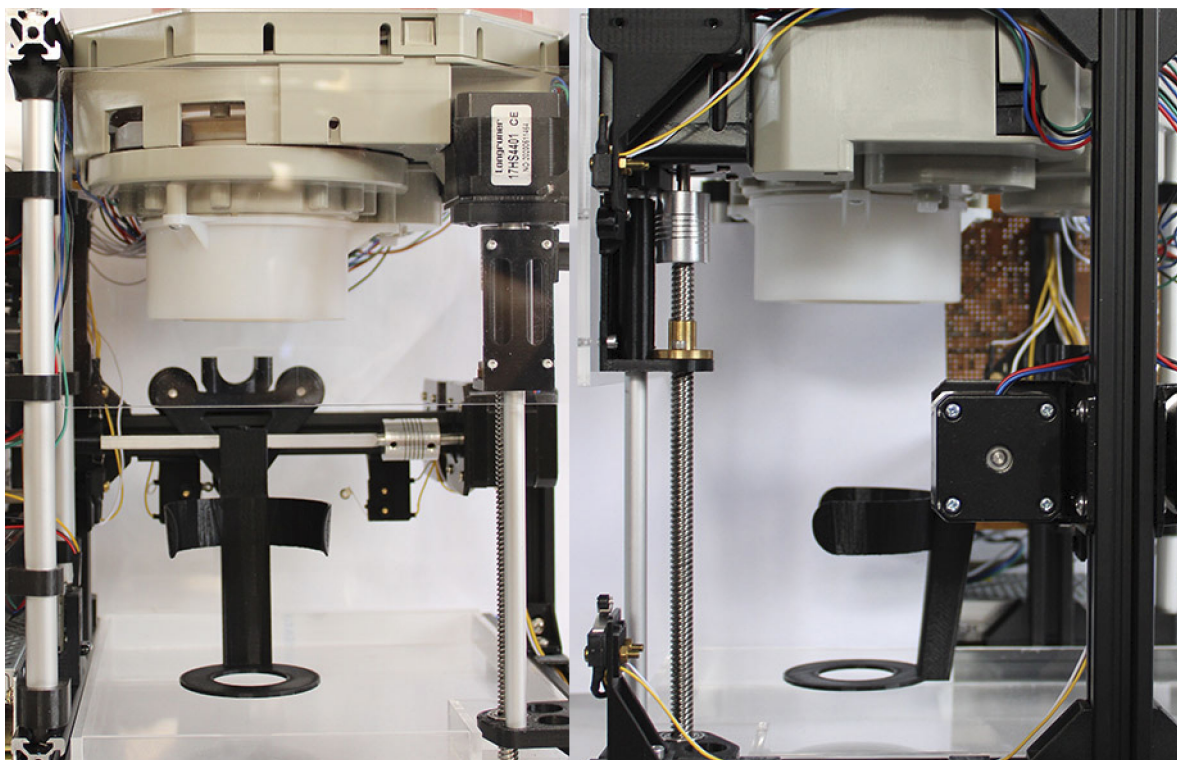


Figura 3.10: Alinhamento do suporte de copos com o dispensador.

Tabela 3.1: Motor NEMA 17HS4401.

Tensão operacional	12 VDC
Corrente máxima	1.7 A
Torque de retenção	0.4 Nm
Angulo por passo	1.8°

Tabela 3.2: Veio.

Secção	6 mm x 6 mm
Comprimento	150 mm
Material	Alumínio 1100-H14

Para garantir que o veio aguenta com os esforços associados ao suporte de copos foi realizado o dimensionamento estático do mesmo. O método utilizado consiste no cálculo do carregamento estático do veio em dois momentos diferentes e aplicação do critério de von Mises, referido em [17].

O dimensionamento estático do veio pode ser consultado no Anexo A, pelo que o fator de segurança calculado segundo o critério de von Mises é de $n = 29$.

De acordo com [18], um método clássico do fator de segurança (FS) de um projeto é calculado a partir da expressão (3.1) e, assumindo o pior cenário para cada um dos critérios, o resultado obtido é $FS = 6.85$.

$$FS = (FS_{material})(FS_{esforços})(FS_{geometria})(FS_{análise})(FS_{confiança}) \quad (3.1)$$

Tendo em conta que o fator de segurança do veio, $n = 29$, é muito superior ao calculado através da expressão (3.1), $FS = 6.85$, conclui-se que o veio escolhido cumpre com os requisitos para os esforços

aplicados ao mesmo.

Segundo a norma NEMA ICS 16:2001 [19], torque de retenção é a resistência máxima à rotação de um eixo gradualmente rodado de um motor energizado para um modo específico de excitação de enrolamento e corrente aplicada. Para garantir que o motor adquirido é suficiente, comparou-se o torque de retenção do motor com o binário máximo provocado pelo copo e pelo suporte. O binário máximo ocorre com o copo cheio na posição vertical, com $T = 0.098$ Nm, sendo consideravelmente inferior ao torque de retenção do motor, com $T = 0.4$ Nm, assegurando que o motor passo-a-passo escolhido cumpre os requisitos.

3.4 Saída do Líquido

Como referido no capítulo 2, o sistema de Disponibilização é responsável por servir e disponibilizar a cerveja à pressão de forma autónoma. O objetivo deste subsistema consiste na substituição da torneira de abertura manual por uma acionada eletricamente, possibilitando o controlo da saída de líquido através de um controlador.

A solução encontrada para o controlo da saída do líquido foi uma servo-válvula normalmente fechada. A válvula é composta por uma bobine magnetizada e uma armadura móvel. Quando a bobine é energizada, a armadura sobe e o caminho para o líquido passar é aberto. Quando a bobine deixa de ser energizada, a tensão exercida por uma mola força a armadura para baixo e a válvula permanece fechada. As características da válvula estão representadas na Tabela 3.3 e são cumpridos os requisitos de pressão e temperatura. De forma a direcionar o fluxo de cerveja que passa na válvula, foi impresso em 3D um tubo que permite mudar a direção do fluxo em 90° . Através deste tubo é colocada uma linha de cerveja e é ligada à saída da válvula através de uma rosca também impressa em 3D. Esta solução é observável na Figura 3.11.

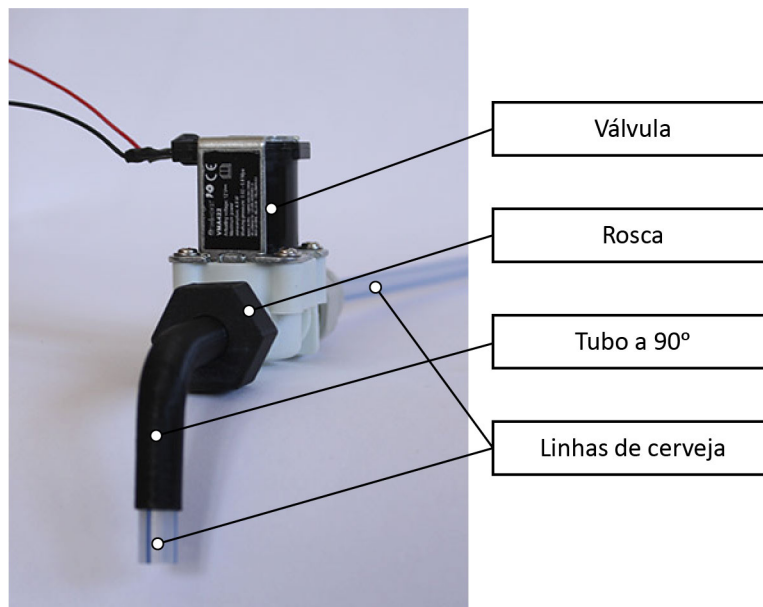


Figura 3.11: Servo-válvula e solução de direcionar tubo de saída.

Tabela 3.3: Servo-válvula Velleman VMA422.

Tensão operacional	12 VDC
Diâmetro de entrada e saída	8 mm
Pressão admitida	0.02 MPa – 0.8MPa
Temperatura admitida	1°C – 60°C
Tempo de resposta (Abrir)	0.15 s
Tempo de resposta (Fechar)	0.3 s

Este subsistema é o ponto de ligação com o sistema de Extração e Refrigeração. Para possibilitar a limpeza de cada sistema separadamente e como mecanismo de segurança, adquiriu-se uma válvula manual, a qual é ligada à saída do refrigerador (ver Figura 3.12). As linhas de cerveja utilizadas desde o refrigerador até à servo-válvula são de vinil com 9.5 mm de diâmetro interno. As ligações entre as linhas e os componentes deste subsistema são feitas através das ligações rápidas representadas na Figura 2.2.

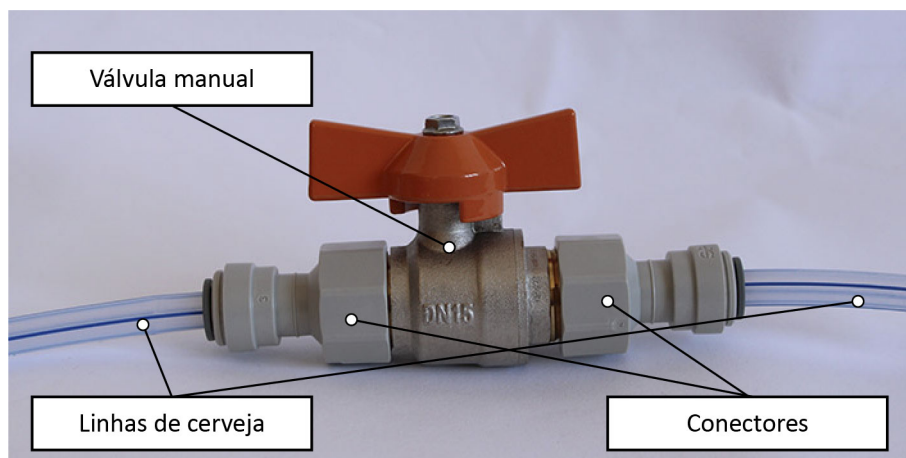


Figura 3.12: Válvula manual de segurança.

3.5 Deslocação da Válvula

A sobreposição dos subsistemas Disponibilização de Copos, Inclinação do Copo e Saída do Líquido resulta na localização da válvula entre o dispensador e o suporte de copos, impossibilitando que o copo libertado pelo dispensador entre no suporte do copo. Tendo em conta que a receção do copo e a saída do líquido ocorrem em momentos diferentes, o objetivo deste subsistema é então permitir a deslocação horizontal da válvula entre duas posições. Quando o copo é libertado, a válvula encontra-se recolhida, permitindo a receção do copo por parte do suporte de copos. Para a saída do líquido, a válvula é posicionada diretamente em cima do copo.

Este movimento lateral da válvula é feito apoiado no perfil horizontal da estrutura de suporte, através de três rolamentos revestidos, próprios para este perfil. Foram também impressas peças em 3D, desenhadas à medida, que permitem a fixação da válvula aos rolamentos e apoio no perfil da estrutura. O movimento lateral é realizado através de um motor passo-a-passo com as características da Tabela 3.1 e de um fuso trapezoidal com porca compatível, com as características representadas na Tabela 3.4. A ligação entre o fuso e o motor é feita através de uma união elástica e, em relação à ligação com a estrutura, o fuso está apoiado num rolamento fixo na estrutura através de uma peça impressa em 3D,

estando o motor fixo através de um apoio adquirido com o mesmo. O subsistema está representado na Figura 3.13.

Tabela 3.4: Conjunto fuso trapezoidal e porca.

Diâmetro externo (Fuso)	8 mm
Passo	4 mm
Material (Fuso)	Aço Inoxidável
Material (Porca)	Bronze

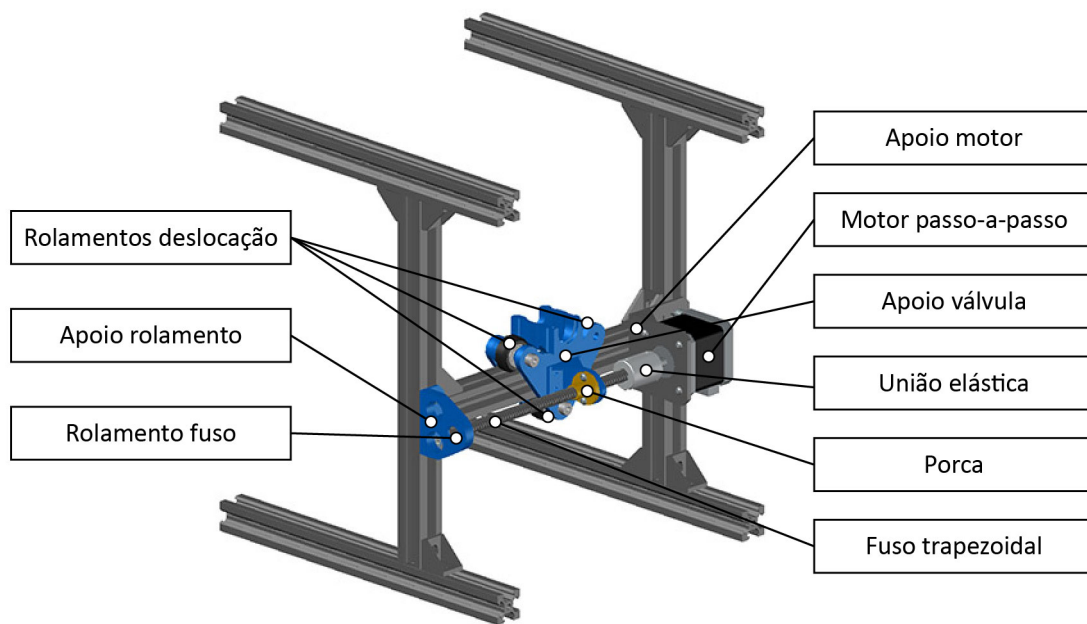


Figura 3.13: Subsistema Deslocação da Válvula.

De forma a garantir que o motor passo-a-passo tem capacidade suficiente é preciso calcular o torque necessário para deslocar a válvula. O torque necessário para elevar uma carga através de um fuso (T_R) é calculado pela expressão (3.2) [17].

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m - l}{\pi d_m + f l} \right) \quad (3.2)$$

$$d_m = d_e - \frac{l}{2} \quad (3.3)$$

Na expressão (3.2), F representa a carga a elevar, l corresponde ao passo do fuso, d_m é o diâmetro médio do fuso que, neste caso, é calculado através da expressão (3.3), onde d_e corresponde ao diâmetro exterior do fuso, e f é o coeficiente de atrito entre o fuso e a porca. Segundo [17], o coeficiente de atrito entre um fuso de aço sem lubrificação e uma porca de bronze varia entre 0.15 a 0.23, sendo que, para este caso, foi utilizado o coeficiente mais alto de forma a garantir o desempenho adequado.

Para calcular o torque numa deslocação horizontal, F é assumido como a força de atrito (F_a) entre os rolamentos e o perfil da estrutura de suporte. A partir da expressão (3.4), referida em [20], onde μ_s

é o coeficiente de atrito estático e N a força resultante.

$$F_a = \mu_s N \quad (3.4)$$

Neste caso, a força resultante (N) tem o mesmo valor que o peso resultante da válvula e a estrutura de apoio no perfil, com $N = 2$ N. Segundo [20], a utilização de rodas elimina grande parte da fricção resultante se a carga estivesse em contacto com o chão. Por outro lado, para assegurar o desempenho adequado, o cálculo foi realizado assumindo $\mu_s = 1$, sendo que o torque necessário para deslocar a válvula é determinado a partir da expressão (3.2), com $F = N = 2$ N, resultando em $T_R = 0.0055$ Nm. Comparando com o torque de retenção do motor escolhido, $T = 0.4$ Nm, conclui-se que o motor escolhido cumpre com os requisitos.

3.6 Interação com o Utilizador

O sistema de Disponibilização foi desenvolvido de forma a que o protótipo realize os seus processos de forma automática. No entanto, é necessário que seja dado o comando ao protótipo para iniciar o processo de servir uma cerveja. Este subsistema é responsável por essa interação com o utilizador.

Para este subsistema, foi adquirido um botão basculante com uma posição estável. O botão permite que o utilizador interaja com a máquina de forma simplificada, estando as suas características mais relevantes presentes na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Botão basculante com uma posição estável: R13-112.

Tensão operacional máxima	12 VDC
Corrente máxima	20 A
Tempo estimado de vida	6000 ciclos

O acrílico da face da frente do protótipo está recortado e é aparafusada uma peça impressa em 3D onde o botão encaixa, permitindo um fácil acesso ao mesmo por parte do utilizador (ver Figura 3.14).

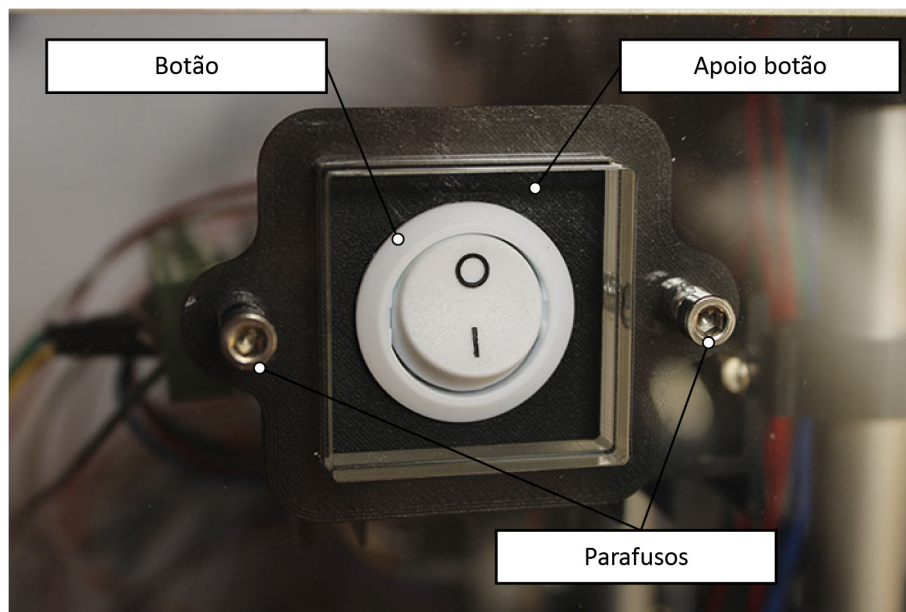


Figura 3.14: Subsistema Interação com o Utilizador.

3.7 Abertura e Fecho da Porta

Para o subsistema Estrutura de Suporte, foi adicionada uma estrutura externa de acrílicos que protege os componentes de agentes externos. De forma a permitir que o utilizador retire o copo depois deste ser servido, o acrílico da face da frente tem um recorte com 140 mm x 120 mm. Por outro lado, de forma a não permitir o acesso ao interior do protótipo quando o processo de servir uma cerveja está a decorrer, foi desenvolvida uma solução para subir e descer uma porta de acrílico.

Para o movimento automático de subida e descida da porta, foi adquirido um motor passo-a-passo com as características da Tabela 3.1. A porta consiste numa face rectangular de acrílico de 200 mm x 125 mm com 4 mm de espessura, cobrindo a área recortada do acrílico da estrutura de suporte. À semelhança do subsistema Deslocação da Válvula, foi adquirido um fuso trapezoidal e a respetiva porca com as características da Tabela 3.4. Este fuso encontra-se ligado ao motor através de uma união elástica e a outra extremidade está apoiada num rolamento fixo à estrutura por uma peça impressa em 3D. O motor é fixado à estrutura através de um apoio adquirido com o mesmo. A porta é fixada à porca através de uma peça impressa em 3D que impossibilita o movimento de rotação da porta através do apoio numa guia paralela ao fuso. A configuração deste subsistema é visível na Figura 3.15.

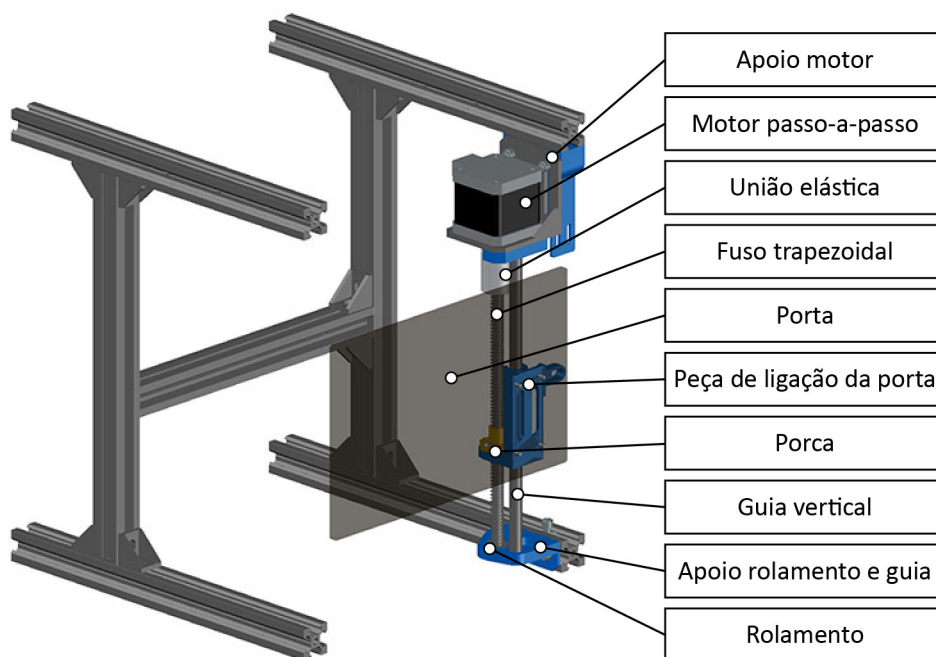


Figura 3.15: Subsistema Abertura e Fecho da Porta.

De forma a validar a capacidade do motor passo-a-passo adquirido para este subsistema, foi calculado o torque necessário para elevar a porta. O torque de subida é calculado a partir da expressão (3.2), onde a carga a elevar corresponde ao peso da porta, resultando em $F = 2.5 \text{ N}$ e são utilizadas as mesmas constantes do que na secção 3.5. O resultado obtido é $T_R = 0.0068 \text{ Nm}$, consideravelmente inferior ao torque de retenção do motor, $T = 0.4 \text{ Nm}$. Deste modo, o motor passo-a-passo adquirido cumpre com os requisitos.

Capítulo 4

Projeto de Automação

Depois da realização do projeto eletromecânico explicado no capítulo 3, onde são analisadas as diferentes funcionalidades essenciais para o desenvolvimento do sistema de Disponibilização e são escolhidos os componentes que permitem satisfazer essas necessidades, é necessário descrever como é feita a automação do mesmo.

Para a realização da automação foram consideradas duas abordagens holísticas:

- Uma abordagem baseada no tempo, em que a realização dos vários procedimentos não é verificada antes de avançar para o seguinte. Com esta abordagem, estes são controlados com base no tempo decorrido, ou no número de passos no caso dos motores passo-a-passo. Um exemplo de aplicação desta abordagem neste protótipo seria a abertura da válvula durante um período de tempo previamente estimado, com o intuito de sair a quantidade de líquido correspondente ao volume no copo.
- Uma abordagem baseada em eventos, na qual o sucesso dos procedimentos é verificado através de sinais medidos por sensores ou em interruptores. Por exemplo, a colocação de fins-de-curso nas posições iniciais e finais dos diferentes subsistemas com motores passo-a-passo de forma a validar a chegada dos mesmos à posição correta. Além destes procedimentos serem verificados no final dos mesmos, também podem ser monitorizados durante a sua execução.

De forma a aumentar a precisão e a repetibilidade de todos os procedimentos, optou-se pela abordagem baseada em eventos. A utilização desta abordagem permite a deteção de eventuais erros durante a execução dos mesmos, como a não disponibilização do copo por parte do dispensador ou uma falha na deslocação até à posição final da válvula que resultaria na saída de cerveja para fora do copo.

Com base na abordagem escolhida, a automação deste sistema foi projetada tendo em conta os diferentes constituintes de um processo automatizado, representado na Figura 4.1. O controlador é responsável pelo controlo automatizado do processo que, segundo [21], consiste em relacionar a atuação e medição, estabelecendo regras automáticas para a gestão da atuação em função das medidas efetuadas.

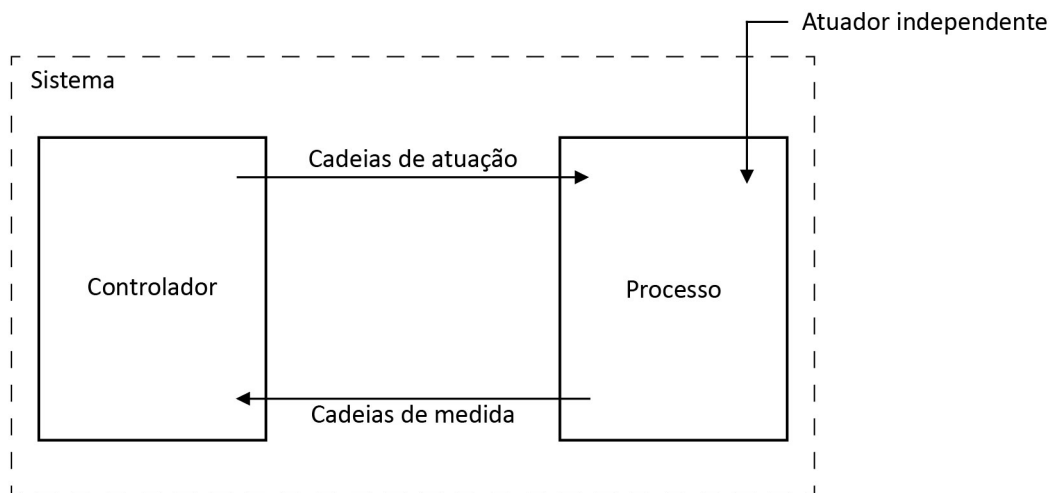


Figura 4.1: Processo automatizado. Adaptado de [21].

O processo consiste no desenrolar das atividades necessárias para o funcionamento do sistema de Disponibilização. Estas atividades podem ser desempenhadas por atuadores do sistema, que são comandados pelo controlador através das cadeias de atuação, ou por atuadores independentes. Segundo [21], a cadeia de medida é responsável por informar o controlador e tem dois objetivos principais: visualização, registo e análise de alguns parâmetros do processo e a obtenção de dados para a cadeia de atuação.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma:

- Na secção 4.1 é apresentado o controlador utilizado;
- Na secção 4.2 são descritos os sensores e interruptores adquiridos e são analisadas as cadeias de atuação e medida para cada componente;
- Na secção 4.3 é realizada a modelação do processo automatizado;

4.1 Controlador

De forma a realizar o controlo automatizado do processo, foi necessário adquirir um controlador com as características adequadas para este sistema. Tendo em conta a facilidade de integração com outros componentes e de programação, o controlador utilizado foi um Arduino.

Para além de ser a denominação utilizada para os seus controladores, Arduino é uma plataforma que desenvolve séries de placas de prototipagem programáveis com uma linguagem de programação própria e um ambiente de desenvolvimento integrado que permite a escrita do código e o envio do mesmo para a placa através de um cabo USB. Estas placas de prototipagem programáveis são desenhadas para simplificar a ligação dos componentes do protótipo com o próprio microcontrolador. Como é uma plataforma de código aberto, vários componentes são desenvolvidos de modo a serem compatíveis com a placa e facilmente programáveis na linguagem do Arduino.

O modelo utilizado foi o Arduino Mega 2560 Rev 3 (ver Figura 4.2), com as suas principais características descritas na Tabela 4.1. Esta placa permite a ligação de vários componentes em simultâneo através de 54 pinos digitais e 16 analógicos, particularmente relevante devido ao elevado número de componentes deste protótipo. Além disso, também existe a possibilidade de alimentação de outros componentes através de 4 pinos com 5 VDC de tensão, até ao limite de 0.2 A de corrente por pino.

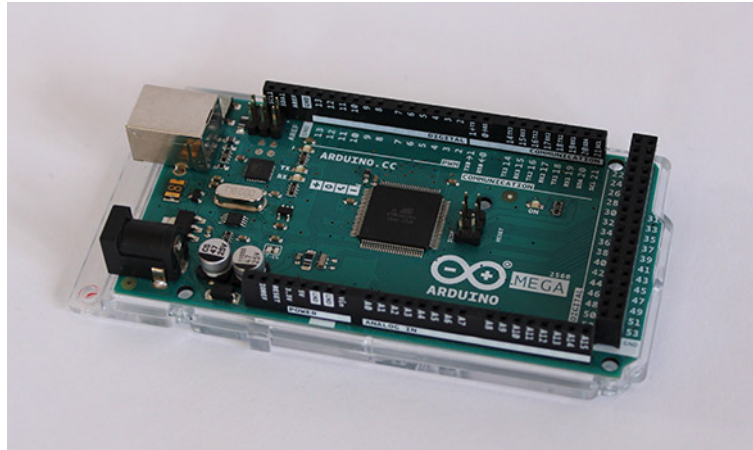


Figura 4.2: Arduino Mega 2560 Rev 3.

Tabela 4.1: Arduino Mega 2560 Rev 3.

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão operacional	5 VDC
Tensão de alimentação (recomendada)	7-12 VDC
Tensão de alimentação (limite)	6-20 VDC
Pinos digitais	54
Pinos analógicos	16
Armazenamento	256 kB

4.2 Cadeias de Atuação e Medida

Como está representado na Figura 4.1, as cadeias de atuação e de medida são utilizadas como meio de comunicação entre o controlador e o processo. Estas cadeias estão detalhadas na Figura 4.3. Na cadeia de atuação, o condicionamento de sinal (CS) permite o envio de comandos do controlador para os atuadores. Segundo [21], o principal objetivo do condicionamento de sinal na cadeia de medida é levar o sinal numa forma adequada e limpa até ao controlador.

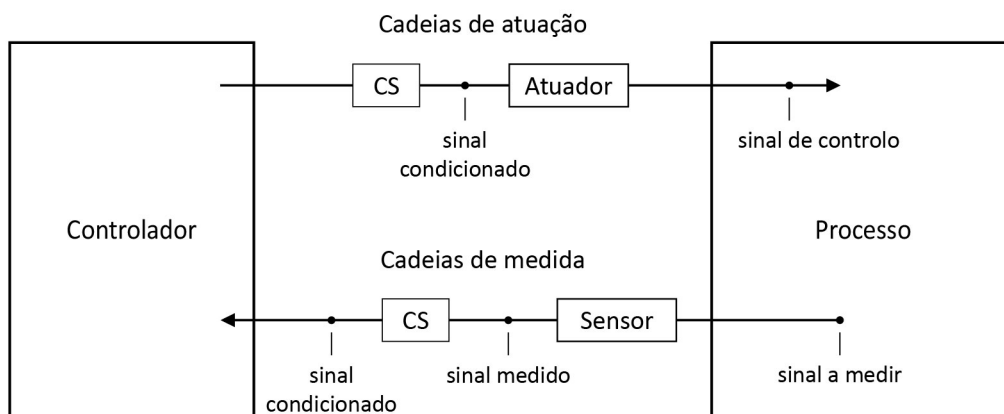


Figura 4.3: Cadeias de atuação e de medida. Adaptado de [21].

De forma a garantir a verificação de diferentes eventos ao longo do processo, foram adquiridos diversos componentes. De seguida, estes componentes são analisados de acordo com o seu objetivo e incorporados no subsistema correspondente. Um dos critérios utilizados na aquisição de componentes, como referido no capítulo 3, corresponde à facilidade de integração com outros equipamentos e estrutura do sistema. Deste modo, e aproveitando o Arduino ser uma plataforma de código aberto, sempre que possível, foram escolhidos componentes compatíveis com o mesmo e facilmente programáveis na sua linguagem.

Disponibilização de Copos

Relativamente a este subsistema, não foi necessário adquirir mais componentes. Como referido na secção 3.2, o dispensador tem incorporados três fins-de-curso. O primeiro, Switch Cup Empty, verifica se existem copos no dispensador. O Switch Cup Turret verifica se o tubo da torre de copos encontra-se por cima da saída do dispensador. Por último, o Switch Cup Splitter verifica se o copo foi disponibilizado.

Inclinação do Copo

Neste caso, foram adquiridos três componentes que asseguram diferentes verificações do processo. Com o objetivo de verificar o posicionamento inicial e final do suporte de copos foram adquiridos dois fins-de-curso com as características representadas na Tabela 4.2. O primeiro garante o posicionamento do suporte de copos na vertical e o segundo verifica o posicionamento do copo a 45°. Estes fins-de-curso foram fixos à estrutura de suporte através de peças impressas em 3D e são pressionados através de uma peça impressa em 3D que foi fixada no veio.

Tabela 4.2: Fim-de-curso.

Tensão máxima	250 V
Corrente máxima	5 A

Por último, de forma a verificar que o copo está no suporte de copos, foi adquirido um sensor com emissor e receptor de infravermelhos que permite a deteção de superfícies refletoras a uma distância regulável. As características deste sensor estão representadas na Tabela 4.3. Neste caso, quando o copo está no suporte de copos, o sinal emitido pelo sensor é refletido de volta para o sensor sinalizando a sua presença. Este sensor está fixo à estrutura de suporte através de uma peça impressa em 3D.

Tabela 4.3: Sensor infravermelhos.

Tensão operacional	3.3-5 VDC
Distância de deteção	2-75 cm

A disposição dos dois fins-de-curso e do sensor infravermelhos no subsistema Inclinação do Copo está representada na Figura 4.4.

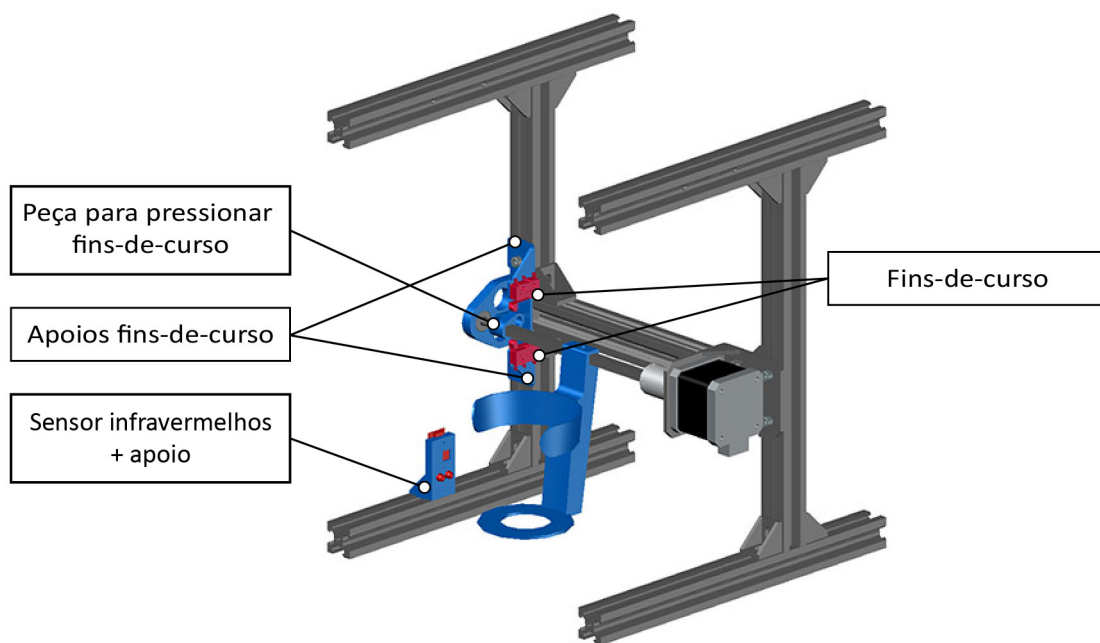


Figura 4.4: Disposição dos fins-de-curso e do sensor infravermelhos no subsistema Inclinação do Copo.

Saída do Líquido

De forma a verificar a quantidade de cerveja servida nos copos, é necessário controlar a quantidade de cerveja que é extraída pela válvula quando esta está aberta. Para esse efeito, foi adquirido um sensor de fluxo que é colocado entre o refrigerador e a válvula e ligado às linhas de cerveja através das ligações rápidas referidas na secção 2.1. O fluxo é calculado a partir da equação (4.1), onde F significa a frequência de pulsos emitidos pelo sensor e Q o fluxo em litros por minuto.

$$F = 7.5Q \quad (4.1)$$

A partir da equação é possível determinar o número de pulsos por litro, o que permite verificar quando o copo está parcialmente e totalmente cheio. As características do sensor de fluxo estão representadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Sensor de fluxo.

Tensão operacional	5-18 VDC
Corrente máxima (5 VDC)	15 mA
Fluxo	1-30 l/min
Temperatura	-25-80 °C
Pulsos por litro	450
Tempo estimado de vida	300,000 ciclos

O acrílico da parte de trás da estrutura de suporte foi recortado de forma a permitir a deslocação da válvula com o sensor de fluxo ligado. A disposição deste subsistema com a integração do sensor de fluxo é observável na Figura 4.5.

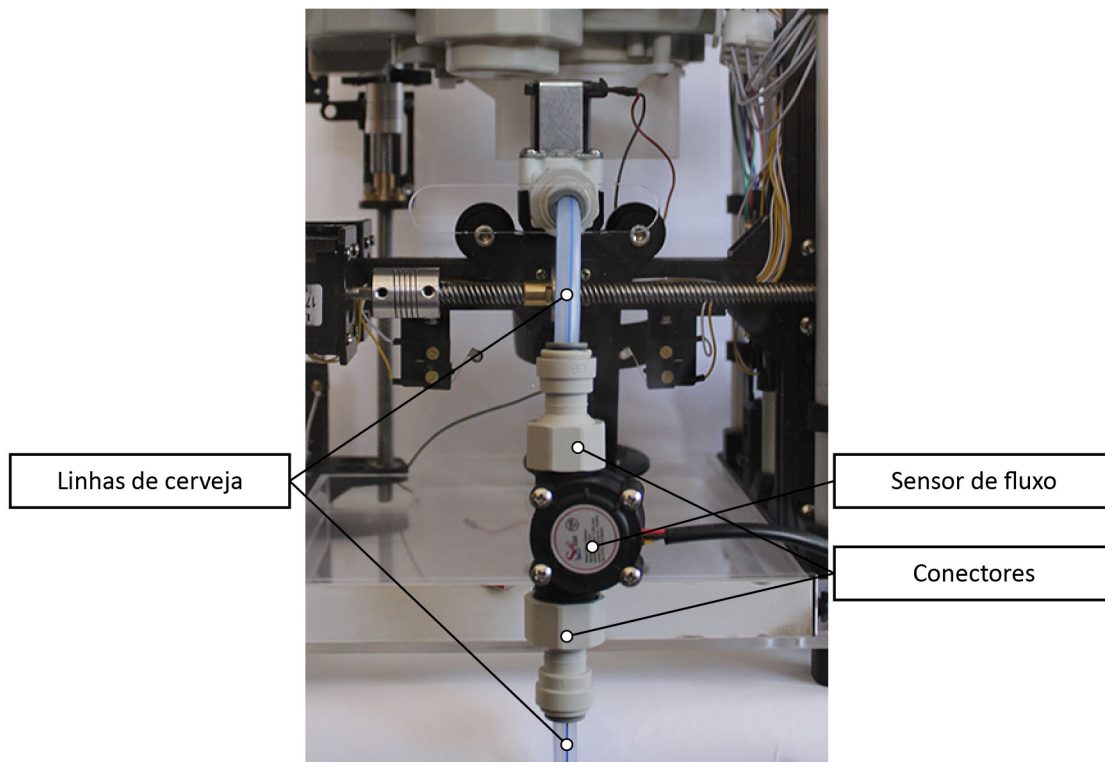


Figura 4.5: Disposição do sensor de fluxo.

Deslocação da Válvula

Para este subsistema foram adquiridos dois fins-de-curso com as características da Tabela 4.2 que asseguram a verificação da válvula no posicionamento inicial e final. Estes fins-de-curso foram colocados de forma a verificarem quando a válvula está recolhida e quando está por cima do copo e foram posicionados de forma a serem pressionados por um dos rolamentos que permite o deslocamento da válvula através do perfil. Os fins-de-curso são fixos ao perfil através de peças impressas em 3D e a sua disposição está representada na Figura 4.6.

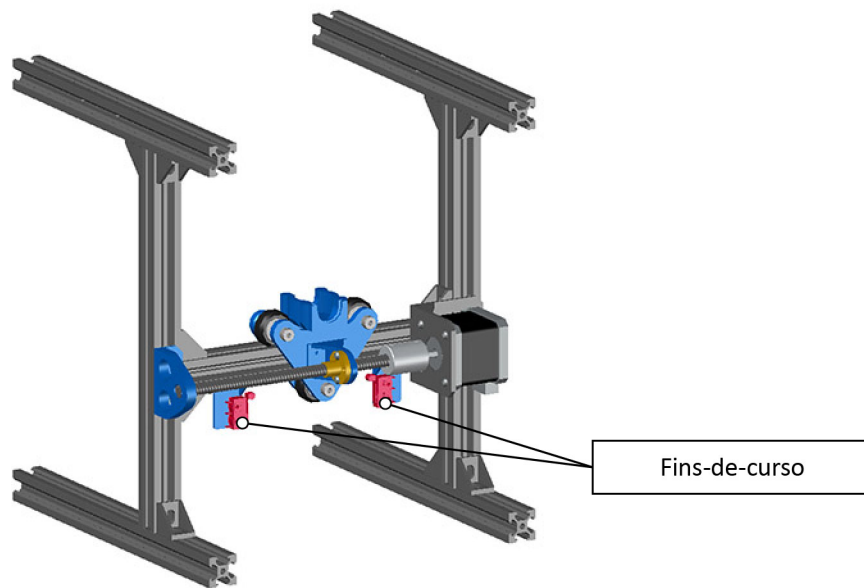


Figura 4.6: Disposição dos fins-de-curso no subsistema Deslocação da Válvula.

Interação com o Utilizador

A aquisição de um interruptor para o subsistema Interação com o Utilizador foi planeada *a priori* e permite ao cliente interagir com o sistema. O botão basculante pode ser utilizado para qualquer interação entre o utilizador e o sistema.

Abertura e Fecho da Porta

Assim como para os subsistemas de Inclinação do Copo e Deslocação da Válvula, para este subsistema foram adquiridos dois fins-de-curso com as características da Tabela 4.2. Um é utilizado para verificar se a porta está fechada e o outro é responsável por verificar se a porta está aberta. A peça de fixação da porta de acrílico foi desenhada com uma saliência de forma a acionar os fins-de-curso que são fixos ao perfil através de peças impressas em 3D. A disposição do subsistema com os mesmos está representada na Figura 4.7.

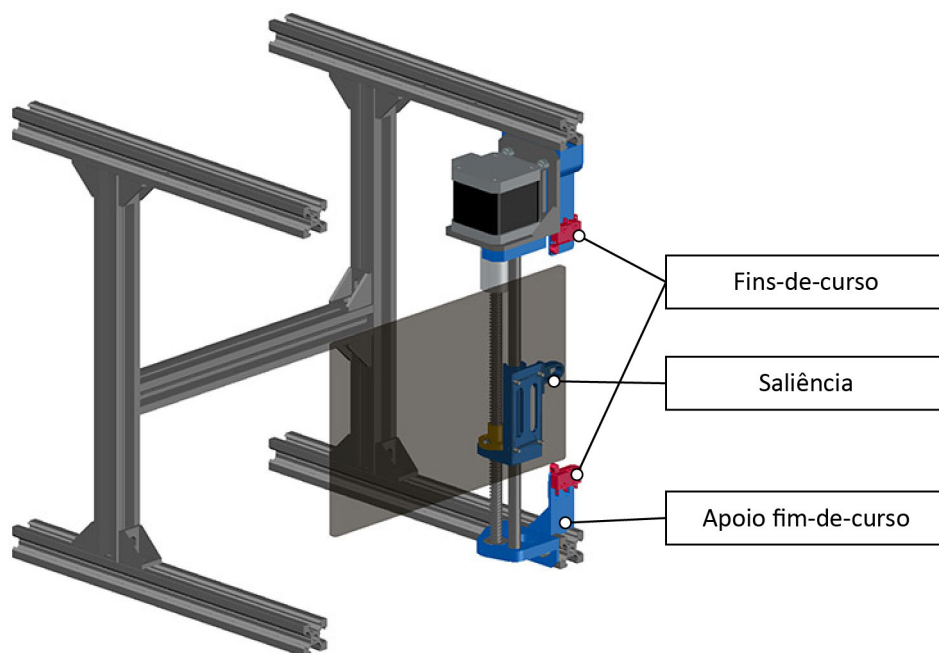


Figura 4.7: Disposição dos fins-de-curso no subsistema Abertura e Fechamento da Porta.

4.2.1 Condicionamento de Sinal

De forma a perceber como é que o controlador utilizado envia e interpreta os sinais dos diferentes componentes, é necessário descrever o condicionamento de sinal utilizado para cada componente das cadeias de medida e de atuação. Estes podem ser divididos em três grupos: sensores, interruptores e atuadores.

Segundo [21], os interruptores são um tipo de sensores de saída discreta do tipo liga/desliga que pode servir em conjunto com o atuador, como os fins-de-curso, para assegurar que uma posição permanece no domínio pretendido.

Tanto nos sensores como nos interruptores, os sinais são lidos através dos pinos digitais do controlador. Estes sinais podem ser interpretados como dois estados diferentes, *HIGH* ou *LOW*. Num primeiro momento, os respetivos pinos digitais são registados como pinos de entrada e com um estado inicial. Para que o Arduino interprete um novo estado é necessário que a tensão verificada nos pinos esteja de acordo com os intervalos respetivos de cada estado. Para verificar o estado *HIGH*, a tensão verificada tem de ser igual ou superior a 3 VDC. Para que o Arduino interprete um sinal como *LOW*, a tensão verificada tem de ser igual ou inferior a 1.5 VDC.

Para além de verificar o estado destes componentes, também é possível detetar alterações de estado. A mudança de *LOW* para *HIGH* corresponde a um *RISING*. A alteração de estado *HIGH* para *LOW* é interpretada como *FALLING*.

Sensores

Segundo [21], de modo a facilitar a sua integração no meio industrial, muitos sensores são vendidos com um módulo de alimentação e um módulo de pré-condicionamento de sinal standard. Na Figura 4.8, está representado um sensor com entrada e saída normalizadas. A entrada é normalizada através de um conversor de alimentação normalizada para a alimentação específica de funcionamento do sensor. A saída é normalizada através de um pré-condicionamento de sinal feito ao sinal medido pelo sensor.

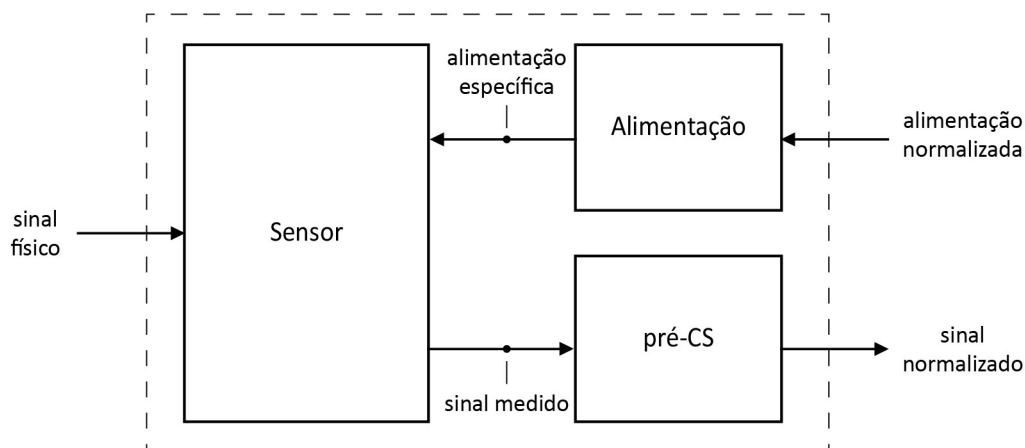


Figura 4.8: Sensor com entrada e saída normalizadas. Retirado de [21].

Para este sistema foram adquiridos dois sensores, o sensor infravermelhos e o sensor de fluxo. Estes são compatíveis com o Arduino, pelo que têm entradas e saídas normalizadas como está representado na Figura 4.8. Neste caso, não foi necessário nenhum condicionamento de sinal extra. Os dois sensores possuem dois pontos de ligação externa para a sua alimentação e um ponto de ligação destinado ao envio de sinais para o controlador. Este último é ligado aos pinos digitais do Arduino através de cabos próprios, designados por cabos de ligação Jumper Dupont (ver Figura 4.9).

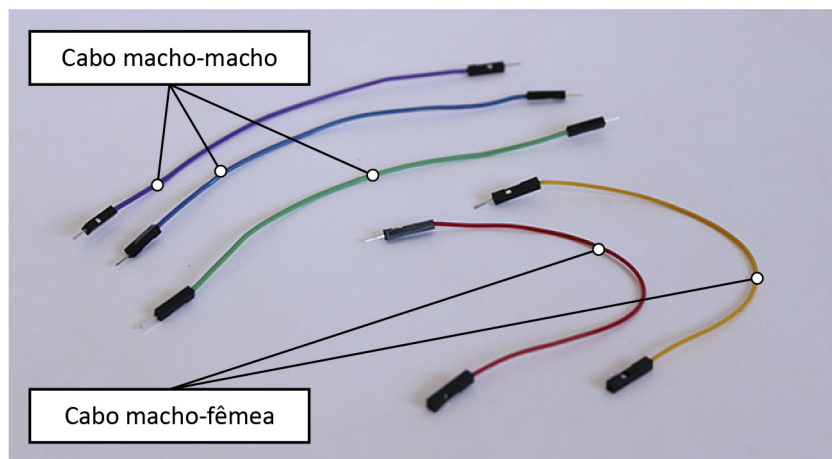


Figura 4.9: Cabos de ligação Jumper Dupont.

Interruptores

Em relação aos interruptores, existem dez componentes que se enquadram nesta categoria: o botão basculante com uma posição estável, três fins-de-curso incorporados no dispensador e os seis fins-de-curso que estão fixos à estrutura de suporte.

Um interruptor tem a finalidade de abrir e fechar um circuito elétrico através do contacto entre duas peças de metal. A passagem de corrente através do interruptor só é feita quando as duas peças estão em contacto. Este contacto não é perfeito e resulta em múltiplos ressaltos entre as duas peças de metal sempre que o interruptor é pressionado ou libertado. Estes ressaltos podem ser interpretados pelo controlador como se o interruptor fosse pressionado múltiplas vezes num curto espaço de tempo.

Segundo [21], um filtro é um elemento de condicionamento de sinal utilizado para limpar o sinal. Deste modo, para desfazer este ressalto e possibilitar a leitura correta dos momentos de pressionar e libertar o interruptor, foi adicionado um filtro RC entre o interruptor e o controlador, constituído por duas resistências e um condensador (ver Figura 4.10).

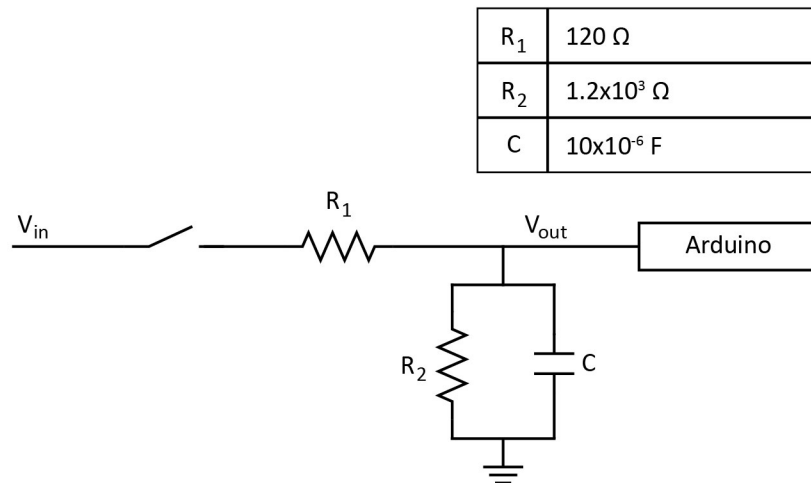


Figura 4.10: Condicionamento de sinal para os interruptores.

O objetivo é utilizar o condensador como filtro das rápidas mudanças de tensão ao longo do tempo. Este carrega quando o interruptor fecha o circuito elétrico e descarrega quando o circuito é aberto. De forma a regular o tempo que o condensador demora a carregar e descarregar, é necessário escolher os valores tanto do condensador como das resistências.

Para analisar o carregamento do condensador foi utilizado o circuito equivalente de Thévenin [22], representado na Figura 4.11. Esta equivalência continua a ser válida substituindo R_{load} por um condensador, como neste caso, onde R_{load} representa C . A tensão equivalente de Thévenin (V_{Th}) e a resistência equivalente de Thévenin (R_{Th}) são calculadas a partir das expressões (4.2) e (4.3) [22]. V_{in} corresponde à tensão de entrada e R_1 e R_2 às resistências utilizadas no circuito, representado na Figura 4.10.

$$V_{Th} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.2)$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.3)$$

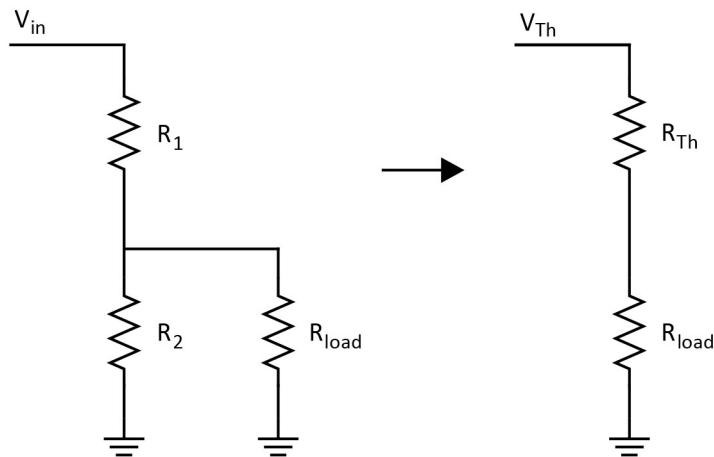


Figura 4.11: Circuito equivalente de Thévenin. Adpatado de [22].

Com a utilização do circuito equivalente de Thévenin, o circuito RC representado na Figura 4.10 pode ser simplificado ao circuito representado na Figura 4.12 em que o tempo de carregamento do condensador é calculado a partir da expressão (4.4) [22]. Nesta expressão, é calculado o tempo decorrido t até à tensão V registada, R corresponde à resistência equivalente de Thévenin (R_{Th}), calculada a partir da expressão (4.3), C corresponde à capacidade do condensador e V_f corresponde à tensão equivalente de Thévenin (V_{Th}), calculada a partir da expressão (4.2).

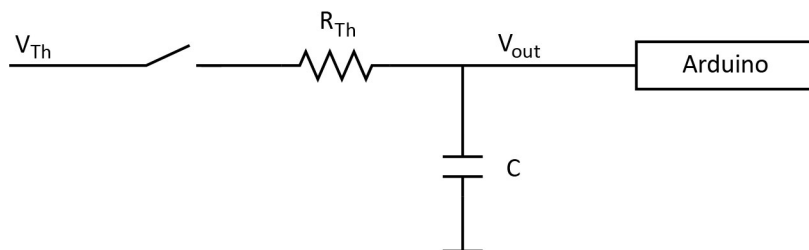


Figura 4.12: Circuito equivalente para o filtro RC utilizado.

$$t = RC \ln \left(\frac{V_f}{V_f - V} \right) \quad (4.4)$$

Quando o interruptor abre o circuito, impedindo a passagem de corrente por R_1 , este comporta-se como se o condensador e R_2 estivessem colocados em série (ver Figura 4.13). Assim, o condensador descarrega através de R_2 com o tempo de descarregamento calculado a partir da expressão (4.5) [22], onde V corresponde à tensão registada em função do tempo decorrido t , V_0 corresponde à tensão equivalente de Thévenin (V_{Th}), R corresponde a R_2 e C à capacidade do condensador.

$$V = V_0 e^{-t/RC} \quad (4.5)$$

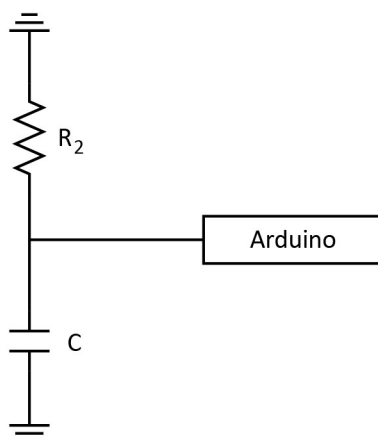


Figura 4.13: Circuito equivalente quando o circuito está aberto.

Os valores escolhidos para o filtro RC que permitem uma leitura única quando os interruptores são pressionados ou libertados e, ao mesmo tempo, uma resposta rápida do mesmo foram $C = 10 \times 10^{-6}$ F, $R_1 = 120 \Omega$ e $R_2 = 1.2 \times 10^3 \Omega$.

Para calcular o tempo de carregamento foi determinada a resistência equivalente de Thévenin, com $R_{Th} = 109 \Omega$, e a tensão equivalente de Thévenin, com $V_{Th} = 4.5$ VDC. Como o Arduino interpreta um *HIGH* a partir dos 3 VDC, o tempo de carregamento é calculado para esse valor, resultando em $t = 0.0012$ s.

Podemos obter a expressão para calcular o tempo de descarregamento do condensador a partir da expressão (4.5) com:

$$t = -RC \log_e \frac{V}{V_0}$$

Calculando o tempo de descarregamento até $V = 1.5$ VDC e com $R = R_2 = 1.2 \times 10^3 \Omega$, $C = 10 \times 10^{-6}$ F e $V_0 = V_{Th} = 4.5$ VDC, obtemos $t = 0.013$ s.

Atuadores

No projeto eletromecânico descrito no capítulo 3, foram adquiridos os atuadores responsáveis pelo desempenho das funcionalidades do sistema de Disponibilização. Neste grupo estão os motores incorporados no dispensador, a válvula e os três motores passo-a-passo dos subsistemas Inclinação do Copo, Saída do Líquido e Abertura e Fecho da Porta.

O estado de um atuador pode alternar entre *ON* e *OFF* consoante os sinais enviados pelo controlador. O estado *ON* corresponde aos motores em funcionamento ou à válvula aberta e o estado *OFF* corresponde aos motores desligados ou à válvula fechada. Ao contrário dos interruptores, não foi possível utilizar o mesmo condicionamento de sinal para os diferentes atuadores adquiridos, pelo que foram divididos em três grupos.

Em conjunto com cada um dos motores passo-a-passo, foi adquirida uma *driver* TB6600, que permite que o controlo dos motores seja feito a partir do Arduino e de forma simplificada. Estas *drivers* têm a funcionalidade de *microstepping*, a qual permite aumentar o número de passos por rotação, resultando numa maior suavidade e precisão dos movimentos. Através do Arduino é possível controlar a direção do movimento e tempo decorrido entre passos que, em conjunto com a escolha de número de passos por rotação, permite controlar a velocidade e suavidade de movimentos dos motores deste grupo.

Relativamente à válvula e aos dois motores incorporados no dispensador, não foi possível obter uma *driver* que permita o comando de forma facilitada por parte do Arduino. Deste modo, foram desenvolvidos circuitos elétricos de comando para que o Arduino possa controlar os três atuadores de forma independente e permitir o correto funcionamento dos mesmos.

De forma a conseguir controlar os atuadores, foram utilizados transístores, que, segundo [22], um dos motivos para a sua utilização é a possibilidade de serem controlados eletricamente a partir de controladores. Neste caso, foram utilizados transístores NPN. Com base nos valores obtidos para as correntes na secção 5.1, foram escolhidos transístores NPN com características diferentes para os dois casos. As correntes dos motores do dispensador com tensão a 24 VDC são de 100 mA pelo que foram utilizados transístores 2N2222A que permitem correntes até 800 mA e 30 VDC de tensão. No caso da válvula, durante o seu funcionamento com tensão 12 VDC, foram observados picos de corrente a rondar 900 mA, pelo que foi utilizado o transístor NPN ZTX653 que permite correntes até 2 A e 100 VDC de tensão.

Tanto a válvula como os motores do dispensador são cargas indutivas. Segundo [22], quando um transistor é utilizado para alimentar cargas indutivas, deve-se proteger o mesmo com a colocação de um diodo em paralelo com a carga (ver Figura 4.14). Não é possível interromper a corrente instantaneamente em cargas indutivas, pois resultaria numa tensão infinita nos seus terminais. O que acontece quando a corrente é interrompida é que a tensão na carga indutiva aumenta abruptamente até forçar passagem de corrente, podendo danificar os componentes eletrónicos que controlam estas cargas. Quando a alimentação é desligada, o diodo passa a condutor e a corrente proveniente da carga indutiva passa por ele sem danificar outros componentes. As características do diodo utilizado para os dois casos encontram-se na Tabela 4.5.

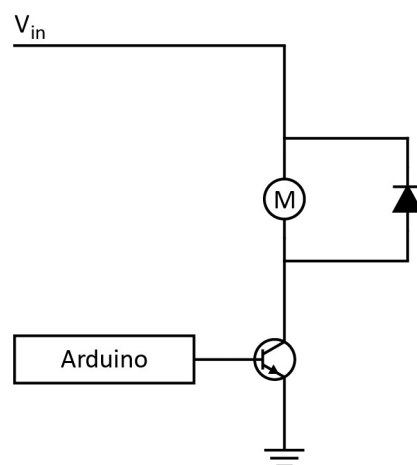


Figura 4.14: Utilização de diodo e transistor com carga indutiva. Adaptado de [22].

Tabela 4.5: Diodo SB140.

Tensão máxima	40 VDC
Corrente máxima	1 A

Um problema que surgiu com a utilização dos motores do dispensador é o ruído produzido quando se encontram em funcionamento, que pode interferir com outros componentes do sistema. De forma a diminuir o ruído, foi adicionado um condensador de cerâmica em paralelo com cada motor com capacidade de 100 nF e tensão até 400 V.

Uma medida adicional para evitar a presença de ruído proveniente dos atuadores no Arduino, foi a utilização de *optocouplers* nas ligações entre o Arduino e os transístores NPN. Segundo [22], os *optocouplers* consistem num *led* emissor em proximidade de um detetor de luz e permitem enviar sinais digitais entre circuitos com ligações à terra separadas. Este isolamento previne a junção das ligações à terra quando são alimentadas cargas remotamente. Neste caso, foram utilizados *optocouplers* do tipo fototransístor, com as características representadas na Tabela 4.6. Estes não podem ser utilizados sem o apoio dos transístores NPN para o controlo da alimentação dos atuadores porque o limite de corrente que os fototransístores permitem é inferior às correntes necessárias ao funcionamento dos atuadores.

Tabela 4.6: Fototransístor EL817C.

Tensão Colector-Emissor	35 VDC
Tensão de isolamento	5 kV
Tempo a ligar	4 μ s
Tempo a desligar	3 μ s

A ligação entre o Arduino e os *optocouplers* é feita através de cabos Jumper Dupont, através dos pinos digitais do Arduino. Estes pinos são registados como pinos de saída. Entre o Arduino e os *optocouplers* é adicionada uma resistência com $R = 1.2 \times 10^3 \Omega$ para garantir a passagem de corrente. Este procedimento é repetido na ligação entre os *optocouplers* e os transístores. Para ligar os atuadores, o Arduino envia um sinal de 5 VDC para os *optocouplers*, que permite a passagem de corrente até ao transístor. Por sua vez o transístor permite a passagem de corrente nos atuadores. Para manter os atuadores desligados, o Arduino força a tensão do pino digital corresponde a 0 VDC.

Os esquemas representativos dos circuitos utilizados para o condicionamento de sinal da válvula e dos motores incorporados no dispensador estão presentes nas Figuras 4.15 e 4.16, respetivamente.

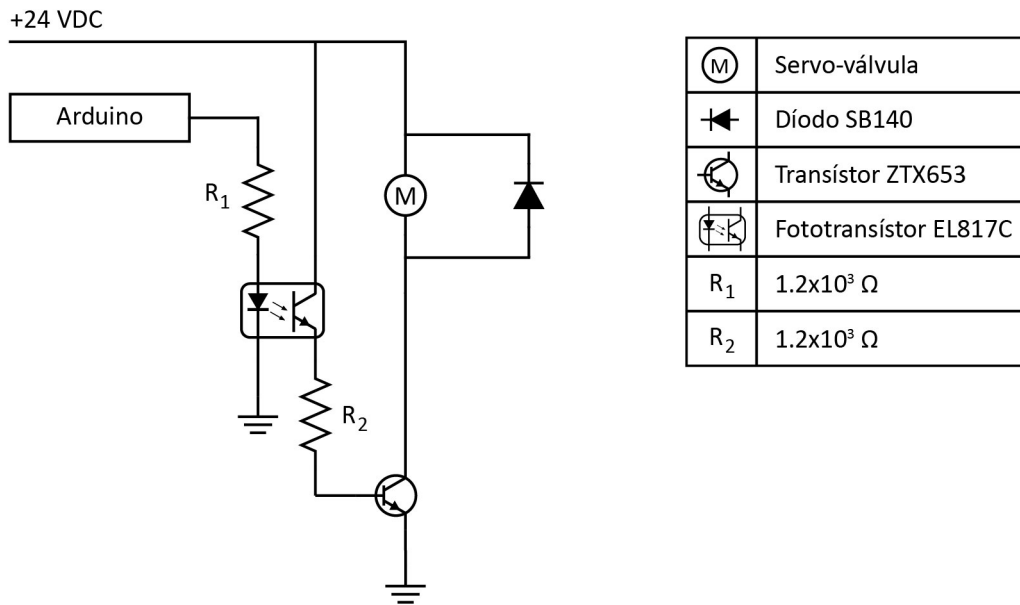


Figura 4.15: Condicionamento de sinal da válvula.

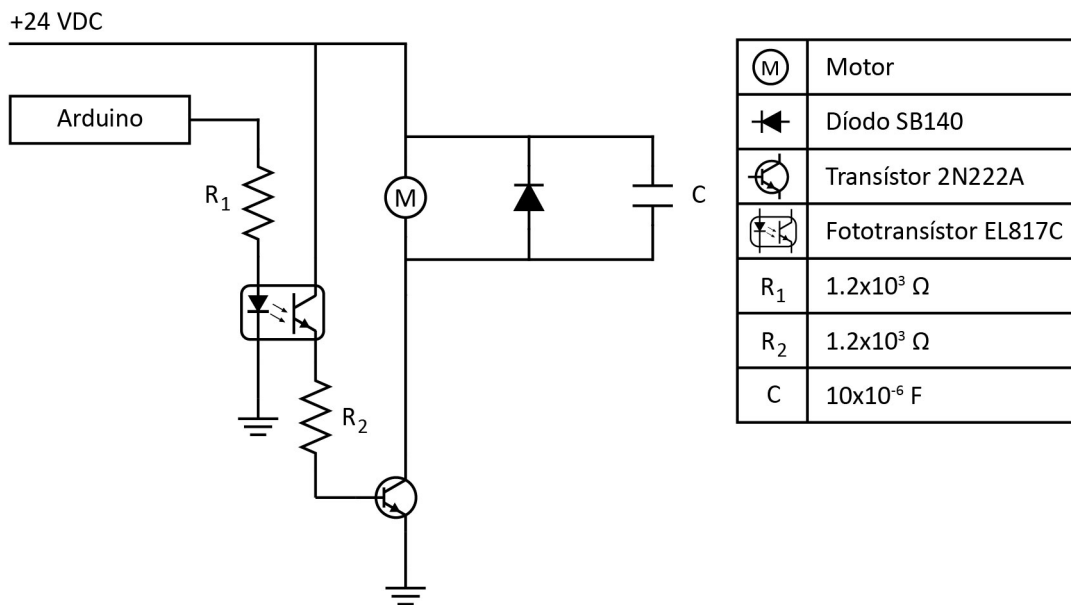


Figura 4.16: Condicionamento de sinal dos motores incorporados no dispensador.

4.3 Modelo do Processo

A modelação do processo visa identificar os comportamentos do sistema, os seus intervenientes e a forma como estes estão relacionados ao longo do mesmo. Para isso foi utilizada a linguagem UML (*Unified Modeling Language*) que facilita a compreensão do modelo. A UML consiste em diferentes elementos gráficos que combinados formam diagramas de acordo com as próprias regras da linguagem.

De modo a facilitar a compreensão do modelo do processo, os atuadores, sensores e interruptores de cada subsistema são designados na Tabela 4.7. Para além destes componentes, são considerados ainda dois atores intervenientes no processo, o operador e o cliente.

Tabela 4.7: Componentes utilizados no modelo do processo.

Subsistema	Designação	Tipo
Disponibilização de Copos	Motor Cup Splitter	Atuador
	Motor Cup Turret	Atuador
	Switch Cup Splitter	Interruptor
	Switch Cup Turret	Interruptor
	Switch Cup Empty	Interruptor
Inclinação do Copo	Motor Copo	Atuador
	Switch Copo 1	Interruptor
	Switch Copo 2	Interruptor
	Sensor IV	Sensor
Saída do Líquido	Válvula	Atuador
	Sensor de Fluxo	Sensor
Deslocação da Válvula	Motor Válvula	Atuador
	Switch Válvula 1	Interruptor
	Switch Válvula 2	Interruptor
Interação com o Utilizador	Botão	Interruptor
Abertura e Fecho da Porta	Motor Porta	Atuador
	Switch Porta 1	Interruptor
	Switch Porta 2	Interruptor

O processo consiste em três atividades principais: o Posicionamento inicial, a Reposição de copos e a Disponibilização de cerveja. Este inicia com o Posicionamento inicial que garante a posição correta dos subsistemas Abertura e Fecho da Porta, Inclinação do Copo e Deslocação da Válvula. De seguida, é verificada a presença de copos no dispensador através do Switch Cup Empty. No caso de não existirem copos no dispensador, é realizada a Reposição de copos. Caso existam copos no dispensador, ou depois da Reposição de copos, é verificada a necessidade de servir mais cervejas. Esta decisão é verificada por um botão de desligar o sistema, referido na secção 5.1. Caso o botão seja pressionado, o sistema desliga-se e o processo termina. Se o botão não for pressionado, é necessário servir mais cervejas e é realizada a Disponibilização de cerveja. Depois de disponibilizar uma cerveja, o processo regressa à verificação da presença de copos no dispensador. Na Figura 4.17 está representado o diagrama de atividades do processo de acordo com a UML.

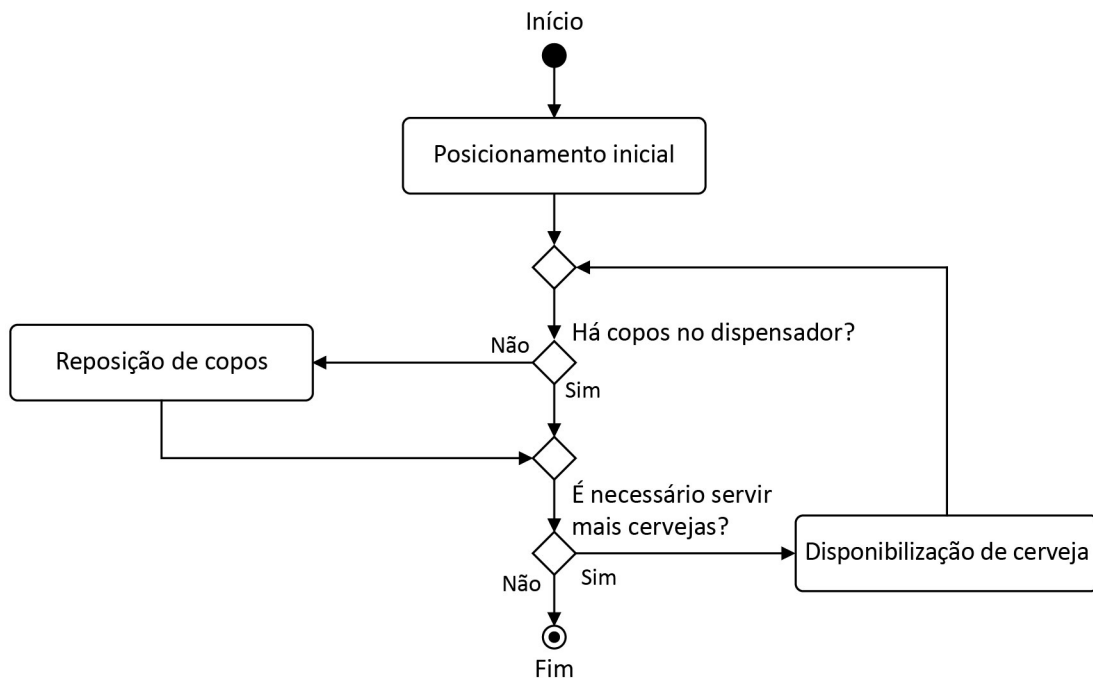


Figura 4.17: Diagrama de atividades do processo.

Relativamente ao Posicionamento inicial, esta atividade é composta por diferentes ações e decisões. O primeiro passo é verificar se a porta está fechada através do Switch Porta 2. Caso a porta não esteja fechada, a mesma é descida acionando o Motor Porta até que esteja fechada. Com a porta fechada, é verificado se o suporte de copos está direito através do Switch Copo 2. Caso esteja inclinado, este é endireitado acionando o Motor Copo até que fique na posição vertical. De seguida, é verificado se a Válvula está recolhida através do Switch Válvula 2. Caso esteja por cima do suporte de copos, a mesma é deslocada para fora do mesmo acionando o Motor Válvula até que fique recolhida. A atividade termina depois de os três subsistemas estarem na posição inicial correta. Esta atividade está representada através de um diagrama de atividades na Figura 4.18.

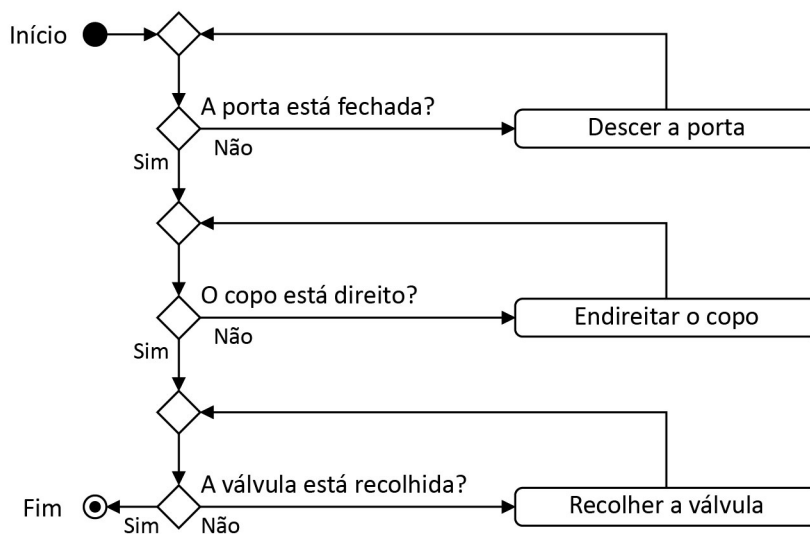


Figura 4.18: Diagrama de atividades do Posicionamento inicial.

A Reposição de copos começa com a rotação da torre de copos acionando o Motor Cup Turret até verificar que esta já rodou o suficiente para o tubo seguinte estar por cima da saída do dispensador através do Switch Cup Turret. Depois de o tubo seguinte estar bem posicionado, é verificada a existência de copos na saída do dispensador através do Switch Cup Empty. Caso não sejam detetados, é realizada a reposição de copos por parte do operador. Assim que seja verificada a presença de copos pelo Switch Cup Empty, a atividade termina. O diagrama de atividades representativo da Reposição de copos é observável na Figura 4.19.

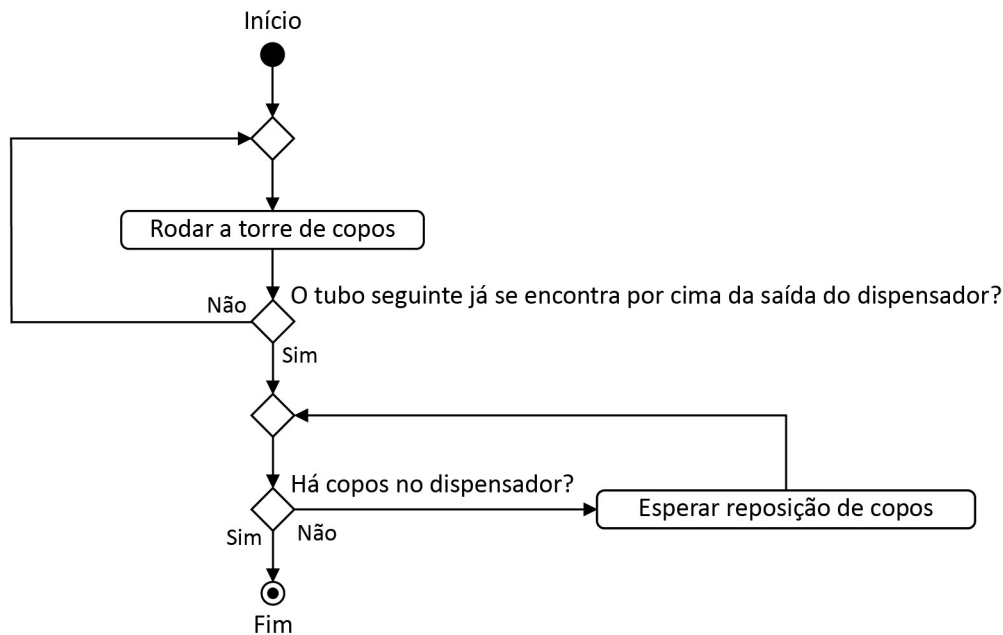


Figura 4.19: Diagrama de atividades da Reposição de copos.

A atividade de Disponibilização de cerveja inicia-se com o pedido de uma cerveja pelo cliente até que o mesmo seja verificado através do Botão. Depois de verificado, é realizada a disponibilização do copo acionando o Motor Cup Splitter até que o mesmo seja disponibilizado. O Switch Cup Splitter verifica se o mesmo foi disponibilizado e de seguida, é confirmado que o copo se encontra no suporte de copos através do Sensor IV. Se o copo não estiver no suporte, o sistema tem de ser desligado para a remoção do copo mal posicionado e a atividade termina. Caso seja validada a presença de copo no suporte, a Válvula é deslocada acionando o Motor Válvula até que esteja por cima do copo. Caso o Switch Válvula 1 verifique que a Válvula está por cima do copo, este é então inclinado através do Motor Copo até estar a 45º, posicionamento verificado através do Switch Copo 1. De seguida, a Válvula é aberta e é extraída cerveja até que o copo esteja parcialmente cheio. Quando o Sensor de Fluxo verifica que o copo está parcialmente cheio, iniciam-se duas ações distintas.

A Válvula permanece aberta e a extração de cerveja continua até que o copo esteja totalmente cheio ao mesmo tempo que o suporte de copos é endireitado acionando o Motor Copo até estar na posição vertical. Assim que o Sensor de Fluxo verifique que o copo está totalmente cheio e o Switch Copo 2 verifique que o copo está direito, a Válvula é deslocada acionando o Motor Válvula até que esteja fora do copo. Assim que o Switch Válvula 2 verifica que a Válvula está fora do copo, a porta é subida acionando o Motor Porta até estar aberta. O Switch Porta 1 verifica que a porta está aberta e o cliente recolhe o copo de cerveja servido. Caso o Sensor IV verifique que o copo está no suporte, o cliente autoriza a descida de porta. O Botão verifica se a descida de porta foi autorizada e, de seguida, o Motor Porta é acionado de forma a descer a porta. A atividade termina quando o Switch Porta 2 verifica que a porta está fechada. O diagrama de atividades representativo da atividade é observável na Figura 4.20.

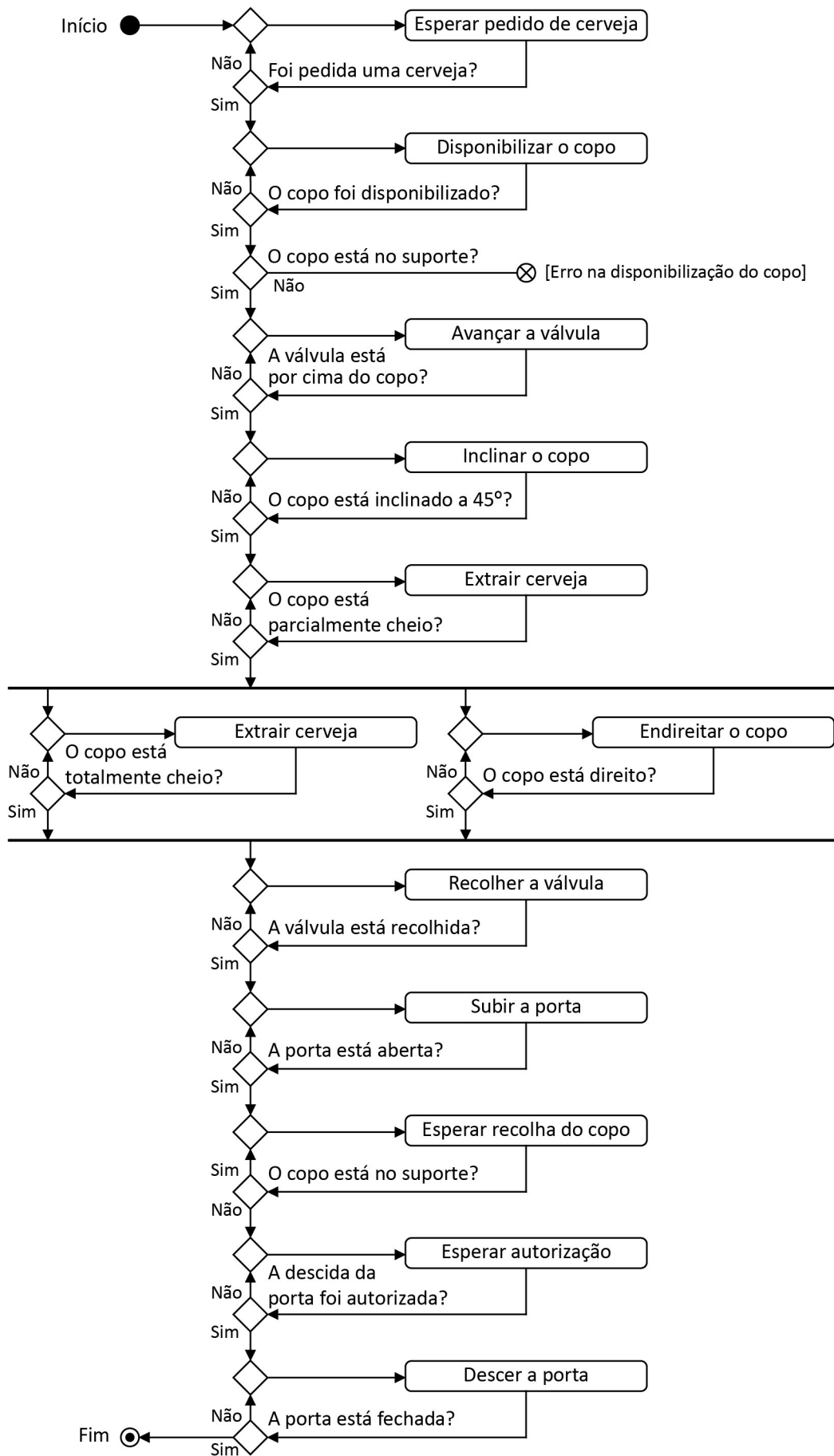


Figura 4.20: Diagrama de atividades da Disponibilização de cerveja.

De forma a descrever o comportamento do sistema do ponto de vista do utilizador, foi utilizado um diagrama de caso de uso de acordo com a UML (ver Figura 4.21). Na atividade correspondente ao Posicionamento inicial, não existe interação com elementos externos ao sistema. Na Reposição de copos, o operador é responsável por repôr os copos, interagindo com o sistema. Na Disponibilização de cerveja, o cliente efetua o pedido de uma cerveja, retira a cerveja do suporte de copos e também autoriza a descida da porta.

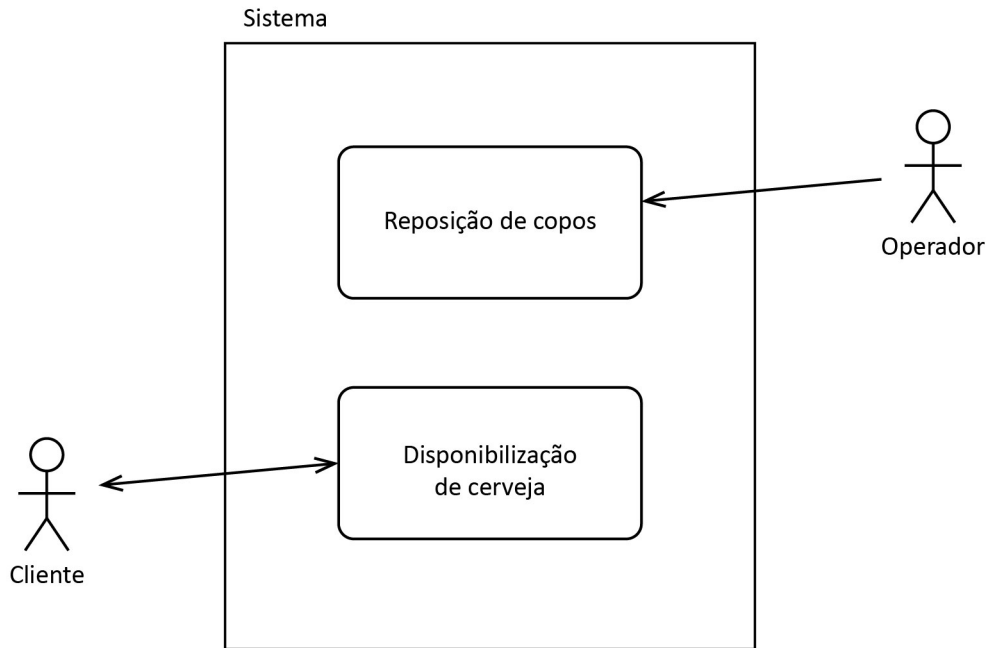


Figura 4.21: Diagrama de caso de uso do sistema.

Como foi referido na secção 4.2, o Arduino pode interpretar dois estados nos sensores e interruptores, *HIGH* e *LOW*, assim como as alterações de estado, *RISING* e *FALLING*. Os sinais medidos são lidos pelo controlador de forma a verificar as decisões dos diagramas de atividades das Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20. Os sinais lidos pelo controlador em cada momento de decisão estão representados na Tabela 4.8.

Relativamente às ações presentes nos diagramas de atividades das Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, estas podem ser realizadas por atuadores ou podem ser momentos de espera por ações externas desempenhadas por atores. Na atividade Reposição de copos existe um momento de espera pela reposição dos mesmos por parte do operador e na atividade Disponibilização de cerveja existem três momentos de espera: para o cliente pedir uma cerveja, recolher o copo e por autorizar a descida da porta. Na tabela 4.9, está a correspondência entre os atuadores responsáveis e as ações de cada diagrama. O Arduino comanda o funcionamento do Motor Cup Splitter, Motor Cup Turret e Válvula ao alterar o seu estado entre *ON* e *OFF*. Nos motores passo-a-passo, são enviados dois sinais distintos. O primeiro define a direção dos mesmos e o segundo define o seu funcionamento. Para a realização de um passo, o seu estado altera para *ON* durante o tempo definido para um passo e, passado esse tempo, o seu estado volta a alterar para *OFF*.

O código utilizado na implementação do controlo automatizado do processo na linguagem de programação do Arduino pode ser consultado no Anexo B.

Tabela 4.8: Componentes e respectivos sinais lidos pelo controlador para verificar as decisões representadas em cada diagrama.

Diagrama	Decisão	Componente	Sinal lido
Processo	Há copos no dispensador? É necessário servir mais cervejas?	Switch Cup Empty Botão alimentação	HIGH -
Posicionamento inicial	A porta está fechada? O copo está direito? A válvula está recolhida?	Switch Porta 2 Switch Copo 2 Switch Válvula 2	LOW LOW LOW
Reposição dos copos	O tubo seguinte já se encontra por cima da saída do dispensador? Há copos no dispensador?	Switch Cup Turret Switch Cup Empty	RISING HIGH
Disponibilização de cerveja	Foi pedida uma cerveja? O copo foi disponibilizado? O copo está no suporte? A válvula está por cima do copo? O copo está inclinado a 45°? O copo está parcialmente cheio? O copo está totalmente cheio? O copo está direito? A válvula está recolhida? A porta está aberta? O copo está no suporte? A descida da porta foi autorizada? A porta está fechada?	Botão Switch Cup Splitter Sensor IV Switch Válvula 1 Switch Copo 1 Sensor de Fluxo Sensor de Fluxo Switch Copo 2 Switch Válvula 2 Switch Porta 1 Sensor IV Botão Switch Porta 2	FALLING FALLING LOW LOW LOW 45xRISING 90xRISING LOW LOW LOW HIGH FALLING LOW

Tabela 4.9: Responsáveis pelas ações representadas em cada diagrama.

Diagrama	Ação	Responsável
Posicionamento inicial	Descer a porta Endireitar o copo Recolher a válvula	Motor Porta Motor Copo Motor Válvula
Reposição dos copos	Rodar a torre de copos	Motor Cup Turret
Disponibilização de cerveja	Disponibilizar copo Avançar a válvula Inclinar o copo Extrair cerveja (x2) Endireitar o copo Recolher a válvula Subir a porta Descer a porta	Motor Cup Splitter Motor Válvula Motor Copo Válvula Motor Copo Motor Válvula Motor Porta Motor Porta

Capítulo 5

Protótipo Desenvolvido e Análise de Resultados

Como referido no capítulo 2, o protótipo divide-se em dois sistemas, o sistema de Extração e Refrigeração e o sistema de Disponibilização. Neste capítulo, estes sistemas são analisados em separado. Começou-se por analisar os consumos dos diferentes componentes e realizado o dimensionamento da alimentação necessária para o sistema de Disponibilização. Com base nos dados recolhidos, analisa-se o desempenho dos sistemas e são realizados testes de fiabilidade. Por último, analisam-se os custos associados aos componentes adquiridos para os dois sistemas, assim como o custo de servir uma cerveja. O protótipo desenvolvido ao longo desta dissertação encontra-se na Figura 5.1.

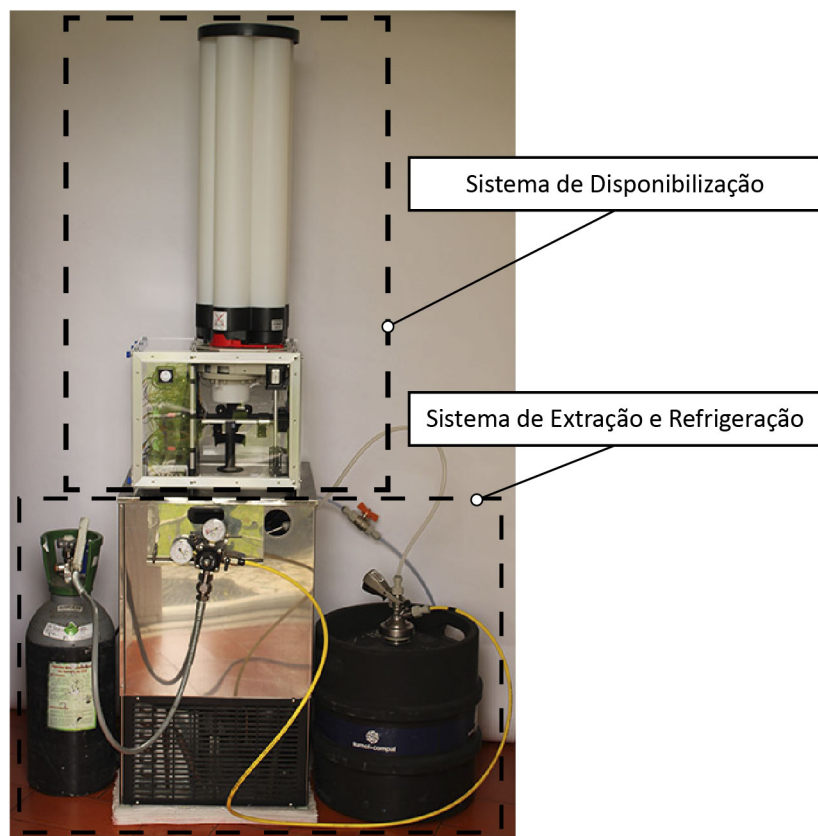


Figura 5.1: Protótipo desenvolvido.

5.1 Alimentação

Em relação ao sistema de Extração e Refrigeração, o único componente que precisa de ser alimentado é o refrigerador, que tem uma ficha incorporada que o permite ligar diretamente à corrente alternada 230 VAC.

De forma a alimentar os diferentes componentes do sistema de Disponibilização, adquiriu-se uma fonte de alimentação. Para o dimensionamento da fonte de alimentação, foram medidas as correntes necessárias para os diferentes componentes do sistema, que estão descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores registados pelos componentes.

Componente	Corrente	Tensão	Potência
Motor Cup Splitter	0.100 A	24 VDC	2.400 W
Motor Cup Turret	0.100 A	24 VDC	2.400 W
Motor Copo	0.257 A	12 VDC	3.084 W
Motor Válvula	0.490 A	12 VDC	5.880 W
Motor Porta	0.490 A	12 VDC	5.880 W
Válvula	0.487 A	12 VDC	5.844 W
Arduino	0.145 A	12 VDC	1.740 W
Sensor IV	0.037 A	5 VDC	0.185 W
Sensor de Fluxo	0.004 A	5 VDC	0.020 W
Botão	0.004 A	5 VDC	0.020 W
Fins-de-curso (Dispensador)	0.004 A	5 VDC	0.020 W
Fins-de-curso (Posicionamento)	0.004 A	5 VDC	0.020 W

A fonte de alimentação é o ponto de ligação entre todos os componentes que são alimentados a corrente contínua e a corrente alternada a 230 VAC que é possível utilizar da rede elétrica pública. Tendo em conta que a tensão máxima necessária é relativa aos dois motores incorporados no dispensador, a fonte de alimentação tem de funcionar como conversor de tensão de 230 V de corrente alternada para 24 V de corrente contínua. Como está detalhado na Tabela 5.1, são necessárias diferentes tensões para os diversos componentes deste sistema, e de modo a dimensionar a fonte de alimentação também é necessário calcular a potência necessária para o sistema. A soma das potências dos vários componentes é de 27.653 W. Os valores das correntes foram medidos com os componentes em funcionamento e, apesar de os componentes não estarem em funcionamento em simultâneo, foram considerados esses valores para o cálculo da potência necessária.

De modo a dimensionar a fonte de alimentação para a possibilidade de adicionar componentes que complementem o sistema atual, foi adquirida uma fonte de alimentação com uma potência superior à necessária. A fonte de alimentação escolhida, cujas características podem ser consultadas na Tabela 5.2, tem 24 VDC como tensão de saída e um limite de potência de 156 W.

Tabela 5.2: Fonte de alimentação Mean Well RS150-24.

Tensão de entrada	88 – 132; 176-264 VAC
Tensão de saída	24 VDC
Corrente de saída	6.5 A
Potência	156 W
Proteção	sobrecarga, sobretensão, curto-circuito

Para ligar a fonte de alimentação adquirida, foi adquirido um cabo de alimentação Schuko e um

terminal correspondente. De forma a permitir cortar a alimentação sem ser necessário retirar o cabo, a fonte de alimentação é ligada a um botão basculante com duas posições estáveis, permitindo alternar entre *ON* e *OFF*. As características do botão podem ser consultadas na Tabela 5.3. O acrílico da face de trás da estrutura de suporte foi recortado e uma peça impressa em 3D onde encaixa o terminal e o botão é aparafusada ao acrílico (ver Figura 5.2).

Tabela 5.3: Botão basculante com duas posições estáveis.

Tensão máxima	250 V
Corrente máxima	6.5 A

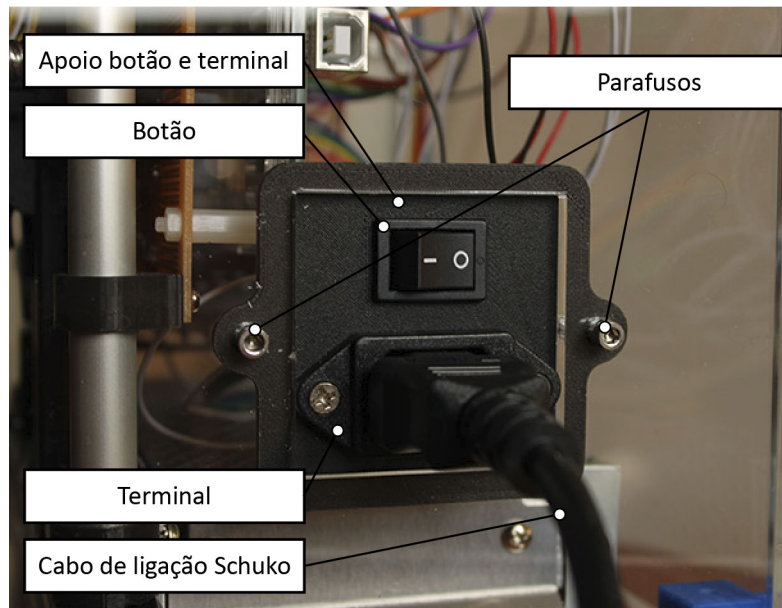


Figura 5.2: Ligação Schuko e botão para a fonte de alimentação.

Tendo em conta que os diversos componentes operam a diferentes tensões, é necessário converter os 24 VDC fornecidos pela fonte de alimentação para as tensões operacionais de cada componente. Como referido na secção 4.1, o Arduino tem 4 pinos que possibilitam a alimentação de 5 VDC até um limite de 0.200 A por pino. Tendo em conta que os sensores e os interruptores deste sistema são alimentados com 5 VDC e que a ligação à terra dos mesmos precisa de estar ligada ao Arduino, estes componentes são alimentados pelo mesmo. A corrente necessária para o funcionamento destes componentes é de 0.081 A, pelo que poderiam ser todos alimentados por um só pino. Por questões de acessibilidade, o Sensor IV e o Sensor de Fluxo são alimentados por um pino cada e os interruptores por outro.

De forma a evitar ruídos, o Arduino, os sensores e os interruptores devem estar isolados dos atuadores. Como referido na secção 4.2, os comandos enviados pelo Arduino para acionar os dois motores e a válvula são isolados através dos *optocouplers*. Os motores passo-a-passo têm uma placa própria que também isola a ligação ao Arduino da própria alimentação.

Para além do isolamento no condicionamento de sinal dos atuadores, é também necessário isolar a alimentação do Arduino, pelo que foi adquirido um isolador DC/DC. Ao mesmo tempo que isola o Arduino da fonte de alimentação, também converte a tensão de 24 VDC para 12 VDC, permitindo alimentar o Arduino diretamente. As características do isolador adquirido estão descritas na Tabela 5.4.

Os dois motores do dispensador são alimentados diretamente através dos 24 VDC provenientes da fonte de alimentação. Para alimentar os três motores passo-a-passo e a válvula solenoide, foi adquirido

Tabela 5.4: Isolador DC/DC de 24 V para 12 V - REC6-2412SRW/R10/A.

Tensão de entrada	24 VDC
Tensão de saída	12 VDC
Corrente de saída máxima	0.5 A
Tensão de isolamento	10 kV
Eficiência	0.84

o conversor DC/DC LM2596, que permite converter 24 VDC para 12 VDC. A corrente de saída máxima deste conversor é de 3 A, inferior à corrente necessária para alimentar os 4 componentes, com o total de 1.724 A.

O equipamento responsável pela alimentação e pelo condicionamento de sinal deste sistema está fixo aos perfis horizontais da face esquerda da estrutura de suporte e protegido pela estrutura externa de acrílico. Esta disposição é observável na Figura 5.3.

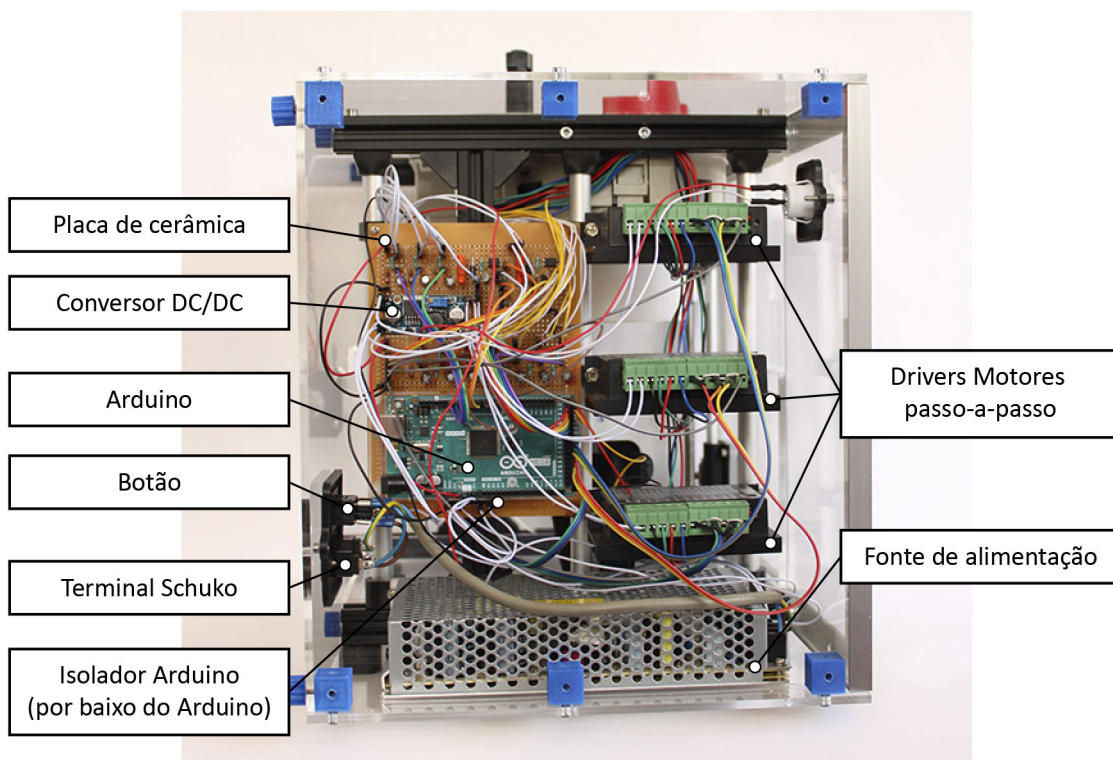


Figura 5.3: Disposição do equipamento responsável pela alimentação e condicionamento de sinal.

A alimentação de todos os componentes a partir da fonte de alimentação está representada de forma simplificada na Figura 5.4.

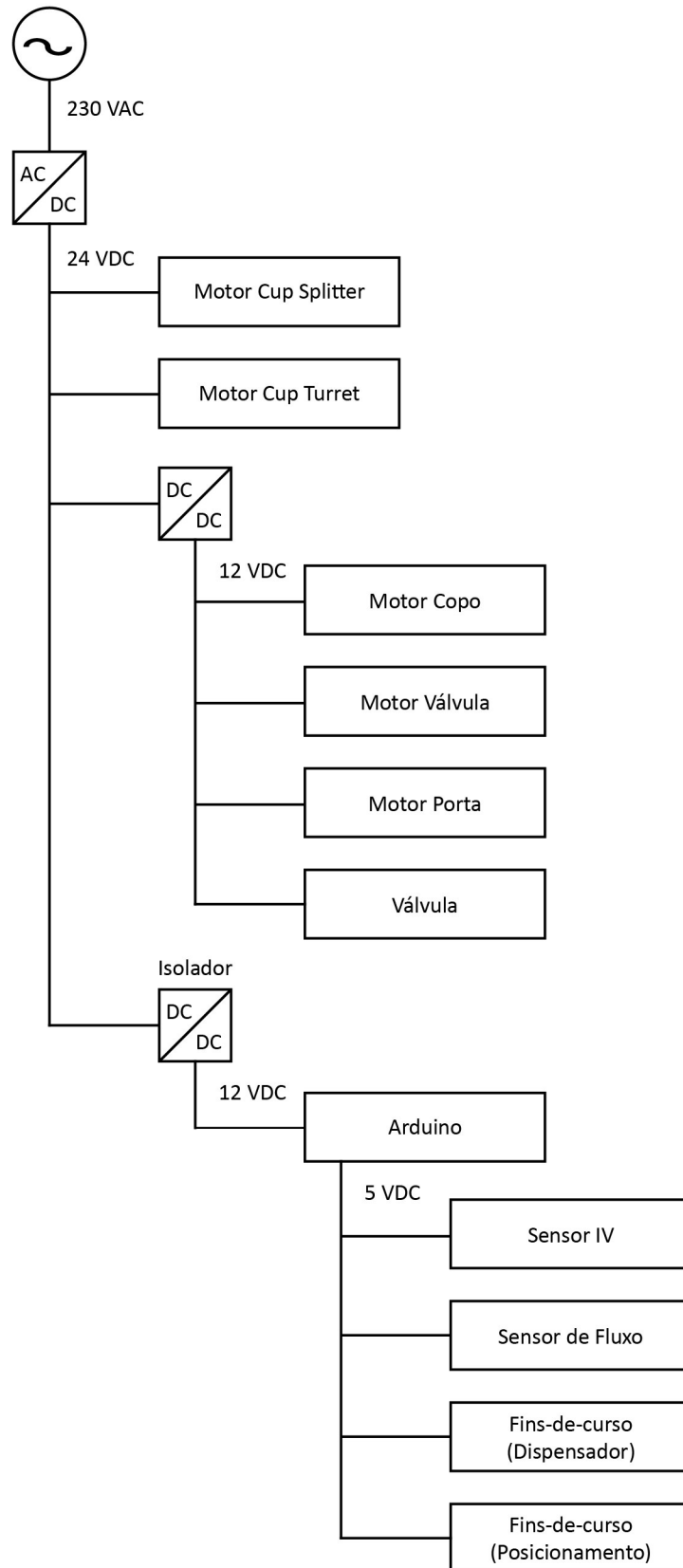


Figura 5.4: Esquema representativo da alimentação dos componentes.

5.2 Desempenho do Sistema

O desempenho do sistema de Extração e Refrigeração pode ser analisado de forma independente. Existe um consumo energético associado ao tempo de arrefecimento do refrigerador, pelo que o mesmo pode demorar até duas horas a estar em condições ideais de utilização. Isto significa que a energia necessária para a inicialização deste sistema é de 1.2 kWh. Durante o funcionamento do protótipo, o refrigerador consome em média 0.6 kWh por hora. Estes valores são disponibilizados pelo fabricante do refrigerador.

Como referido na secção 4.3, o processo automatizado do sistema de Disponibilização é composto por três atividades principais: Posicionamento inicial, Reposição dos copos e Disponibilização de cerveja. Cada atividade foi analisada de forma independente e conforme o seu desempenho a nível de duração e energia consumida.

O Posicionamento inicial ocorre apenas quando o protótipo é inicializado. O consumo associado com o posicionamento dos subsistemas está dependente das posições iniciais dos mesmos, pelo que a Tabela 5.5 descreve o tempo decorrido e a energia consumida com diferentes disposições iniciais. Caso não seja necessário alterar o posicionamento dos motores, a duração e o consumo energético deste momento podem ser desprezados.

Tabela 5.5: Desempenho da atividade Posicionamento inicial.

Motor Porta		Motor Copo		Motor Válvula		Desempenho	
Posição		Posição		Posição		Duração [s]	Energia [Wh]
Correta	Incorreta	Correta	Incorreta	Correta	Incorreta		
X		X		X		-	-
X			X	X		3	0.014
X			X		X	5	0.023
X		X			X	4	0.019
	X	X		X		7.5	0.035
	X		X	X		9	0.042
	X		X		X	11.5	0.054
	X	X			X	9.5	0.044

Na Reposição dos copos, quando não é detetada a presença de copos na saída do dispensador, é realizada a rotação da torre de copos. Como cada tubo tem capacidade para 89 copos, este processo acontece a cada 89 utilizações. A energia consumida neste momento é de 0.037 Wh e demora 7 s.

A Disponibilização de cerveja inicia-se com o pedido do utilizador ao pressionar o Botão e termina com o fecho da porta. A duração desta atividade é de 27 s e a energia consumida é de 0,126 Wh.

De forma a complementar a análise do desempenho do sistema de Disponibilização, foram realizados testes de fiabilidade. As diferentes atividades foram testadas de forma independente através da execução das mesmas de forma repetida.

Para testar a atividade Posicionamento inicial, foram repetidas 5 vezes cada uma das configurações presentes na Tabela 5.5. Não foram registadas falhas, pelo que o posicionamento dos motores foi realizado sem problemas em cada uma das configurações.

A segunda atividade testada foi a Reposição dos copos. Neste caso, os testes foram divididos tendo em conta duas situações diferentes: o dispensador não tem copo e o tubo seguinte repõe os copos; o dispensador não tem copo e o tubo seguinte não repõe os copos. Estas situações foram repetidas 5 vezes cada e foram executadas sem problemas. No primeiro caso, realizou-se sempre a rotação da torre de copos e os copos foram repostos possibilitando servir mais cervejas. No segundo, deu-se

sempre a rotação da torre de copos mas não foram repostos os copos e apenas foi possível servir mais cervejas depois de a reposição de copos ser realizada.

Relativamente à Disponibilização de cerveja, foram realizados dois testes diferentes. No primeiro teste, repetiu-se a atividade por 20 vezes consecutivamente. Durante o teste, a única falha foi o copo não entrar no suporte de copos por 2 vezes, resultando numa taxa de eficácia de 90%. No segundo teste, o protótipo foi iniciado e a atividade foi realizada apenas uma vez. Este procedimento foi repetido 20 vezes e a única falha foi o copo não entrar no suporte de copos por 2 vezes, resultando novamente numa taxa de eficácia de 90%. No total, a Disponibilização de cerveja foi repetida 40 vezes em que 4 dessas vezes o copo não entrou no suporte de copos.

Relativamente ao sistema de Extração e Refrigeração, de forma a otimizar a qualidade da cerveja é necessário estudar a influência das variáveis temperatura e quantidade de dióxido de carbono pelo que não foram realizados testes a este sistema nesta dissertação.

5.3 Custo

Nesta secção, são analisados os custos de desenvolvimento do protótipo, fator relevante que deve ser considerado no estudo da viabilidade de um produto, e o custo resultante de servir uma cerveja.

Em relação ao sistema de Extração e Refrigeração, os custos de aquisição dos componentes necessários para o funcionamento do sistema podem ser consultados na Tabela 5.6. Os encargos com os copos, barris de cerveja e tubos de dióxido de carbono são apenas considerados no custo de servir uma cerveja porque variam consoante a quantidade pretendida, dependendo das necessidades do utilizador.

Tabela 5.6: Custo relativo ao sistema de Extração e Refrigeração.

Componentes	Custo [Euros]
Regulador de pressão	45
Engate	40
Linhas de cerveja e gás	3
Refrigerador	250
Conectores	18
Total	356

Os custos relativos ao desenvolvimento do sistema de Disponibilização estão representados na Tabela 5.7, pelo que os custos de aquisição destes componentes podem diminuir significativamente quando obtidos em maior escala, nomeadamente com componentes standard utilizados no condicionamento de sinal e com os parafusos, rolamentos e porcas.

Tabela 5.7: Custo relativo ao sistema de Disponibilização.

Componentes	Custo [Euros]
Dispensador	150
Arduino	43.83
Isolador Arduino	35.59
Condicionamento de sinais	89.21
Fonte de alimentação	32.53
Estrutura de suporte	40.89
Parafusos, rolamentos, porcas	82.04
Acrílico	93.85
Motor passo-a-passo (x3)	77.94
Sensor de Fluxo	20.25
Sensor IV	1.18
Válvula	10.6
Perfil alumínio 6x6 [mm]	2.29
Perfil alumínio L	7.98
Total	688.18

Para calcular o custo de servir uma cerveja, é necessário analisar o custo da energia consumida pelo protótipo e o custo variável relacionado com o copo, barril e dióxido de carbono consumido. Para calcular o custo da energia, assumiu-se a utilização do protótipo durante 8 horas e a servir em média 90 cervejas por hora. Deste modo, o custo de arrefecimento da máquina e da utilização da mesma é dividido por 720 cervejas.

Como foi referido na secção 5.2, a energia consumida no arrefecimento de refrigerador é de 1.2 kWh e a energia consumida por hora de utilização é de 0.6 kWh. Ao fim das 8 horas de utilização foram consumidos 12 kWh. A energia consumida pelo refrigerador por cada cerveja servida é de 16.667 Wh. De forma a calcular o total de energia consumida por cerveja, é necessário adicionar a energia consumida pela atividade Disponibilização de cerveja, com 0,126 Wh. Assumindo 22 cêntimos por kWh como preço médio da eletricidade em Portugal [23], e 16.793 Wh como total de energia consumida por cerveja, o custo da energia necessária para servir uma cerveja é de 0.37 cêntimos.

O custo variável por cerveja depende do preço do barril, do dióxido de carbono e dos copos. Estes valores estão descritos na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Custo dos produtos consumíveis.

Produto consumível	Quantidade	Custo [Euros]
Barril de cerveja	30 L	35
Tubo CO ₂	8 kg	46
Copos	100	7.5

Para calcular a quantidade consumida por cerveja é assumido 5% de desperdício para o barril de cerveja e para o tubo de CO₂. Em relação ao barril, 28.5 L de cerveja são suficientes para servir 142 cervejas de 20 cL. Pelo que o custo associado ao barril de cerveja por cada cerveja servida é de 25 cêntimos. Um tubo de CO₂ de 8 kg é suficiente para aproximadamente 35 barris de cerveja de 30 L. Tendo em conta que um barril de cerveja tem capacidade para 142 copos de 20 cL, o preço de CO₂ por cerveja é de 1 cêntimo por cerveja. No caso dos copos serem adquiridos em conjuntos de 100, o seu custo é de 7.5 cêntimos por copo. O custo total de produtos consumíveis é de 33.5 cêntimos por cerveja.

Somando o custo da energia necessária para servir uma cerveja e o custo dos produtos consumíveis, o custo total por cerveja é de 33.87 centavos.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

A presente dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de uma máquina automática de extração, refrigeração e disponibilização de bebidas gaseificadas, nomeadamente cerveja, de forma a que as variáveis associadas com o processo de servir uma cerveja pudessem ser controladas pelo sistema e não pela interação humana, suscetível de maior imprecisão.

Relembrando que o desenvolvimento do protótipo foi dividido em dois sistemas, conclui-se que para o sistema de Extração e Refrigeração, as soluções existentes no mercado são transversais a qualquer sistema e, por isso, foram integradas sem ser necessário grande desenvolvimento. Assim, o principal foco desta dissertação foi o desenvolvimento de um sistema responsável pelos processos envolvidos na disponibilização de cerveja.

Depois de definidas as funcionalidades a integrar na solução, realizou-se o projeto eletromecânico dos subsistemas responsáveis pelas mesmas. De forma a automatizar o processo, elaborou-se um modelo do mesmo, onde o controlador escolhido permitiu comandar o funcionamento dos atuadores, sensores e interruptores para a implementação desse modelo. Por último, todos os constituintes do protótipo foram integrados numa solução final autónoma. Assim, podemos considerar que todos os objetivos secundários desta dissertação foram cumpridos.

O desempenho do protótipo resultante desta dissertação foi analisado e, em 90% dos testes realizados ao ciclo de servir uma cerveja, o mesmo funcionou sem problemas. Nos outros 10%, o copo não entrou no suporte de copos, impossibilitando a continuação do processo de servir uma cerveja. A qualidade da cerveja servida não foi analisada pelo que as variáveis relacionadas com o sistema de Extração e Refrigeração necessitam de ser estudadas. O objetivo principal desta dissertação é considerado cumprido, demonstrando que é possível automatizar os processos envolvidos com a extração, refrigeração e disponibilização de uma cerveja à pressão.

6.1 Recomendações

No desenvolvimento do protótipo, foi adquirido um dispensador e desenhado um suporte de copos compatíveis com os copos utilizados. Tendo em conta que os copos utilizados têm capacidade de 20 cL e são feitos de papel, poderia ser pertinente adaptar o sistema com o objetivo de utilizar copos com maior capacidade e, por exemplo, de plástico reutilizável.

Tendo em conta que nesta dissertação foi desenvolvido um protótipo de uma máquina automática de extração, refrigeração e disponibilização de cerveja, é importante referir que existem funcionalidades que podem ser melhoradas ou adicionadas e estudos que podem ser realizados com o objetivo de melhorar o funcionamento do mesmo. Os tópicos seguintes são sugestões de trabalho que seria pertinente prosseguir:

- Realização de estudos sobre a influência da inclinação do copo, da pressão de dióxido de carbono e da temperatura na qualidade da cerveja servida;
- Análise de sistemas alternativos ao refrigerador utilizado, como os refrigeradores com tecnologia de frio seco, que permita reduzir o tempo de arrefecimento do mesmo e não seja necessário a utilização de água para esse efeito;
- Adaptação do sistema de Disponibilização para a utilização de copos com diferentes capacidades e permitir ao utilizador selecionar o tamanho pretendido;
- Integração de um sistema de comunicação do protótipo com um servidor externo que permita obter informações relativas com à sua utilização e prever a substituição do barril de cerveja e tubo de dióxido de carbono;
- Integração de um terminal de pagamento que permita a venda de bebidas alcoólicas através do protótipo.

Referências

- [1] E. Poelmans and J. Swinnen, “A brief economic history of beer,” *The Economics of Beer*, 2012.
- [2] D. Iserentant, “Beers: Recent technological innovations in brewing,” in *Fermented Beverage Production*, A. G. H. Lea and J. R. Piggott, Eds. Boston, MA: Springer US, 2003, pp. 41–58.
- [3] Statista, “Beer report 2020,” 2020, [Online]. Available: <https://www.statista.com/study/48816/beer-report/>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [4] Grande Consumo, “Super bock e sagres são as marcas de cerveja preferidas dos portugueses,” 2020, [Online]. Available: <https://grandeconsumo.com/super-bock-e-sagres-sao-as-marcas-de-cerveja-preferidas-dos-portugueses/#.YDPchej7RPZ>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [5] Future Market Insights, “Automatic Coffee Machine Market Healthy Pace throughout the Forecast during 2017 - 2026,” 2017, [Online]. Available: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/automatic-coffee-machines-market>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [6] M. Bellis, “The History of the Soda Fountain,” *ThoughtCo*, sep 2019, [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/history-of-the-soda-fountain-1992432>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [7] The Coca-Cola Company, “Coca-Cola Freestyle Unveils Next-Gen Fountain Dispenser, New Operating System and More,” 2018, [Online]. Available: <https://www.coca-colacompany.com/news/freestyle-unveils-new-dispenser-and-more>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [8] Seedrs, “EBar,” 2021, [Online]. Available: <https://www.seedrs.com/ebar>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [9] A. Guerreiro, “O Ramiro tem self service de cerveja,” oct 2016, [Online]. Available: <https://www.nit.pt/comida/restaurantes/10-28-2016-o-ramiro-tem-um-self-service-de-cerveja>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [10] MB WAY, “Conheça o novo MB WAY Beer Point. . . e oferecemos-lhe a 2ª cerveja!” 2017, [Online]. Available: <https://www.mbway.pt/conheca-novo-mb-way-beer-point-oferecemos-lhe-2a-cerveja/>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [11] MBWAY, “O MB WAY Beer Point ganha prémio da Meios & Publicidade!” 2018, [Online]. Available: <https://www.mbway.pt/mb-way-beer-point-ganha-premio-da-meios-publicidade/>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [12] L. Lau, “Green Living: Local startup Soapstand launches vending machines for liquid-soap and household-cleaner refills,” aug 2018, [Online]. Available: <https://www.straight.com/life/1122051/green-living-local-startup-soapstand-launches-vending-machines-liquid-soap-and>. [Accessed: Feb. 15, 2021].

- [13] N. Caddell, “Young Guns: Andy Chou sees change in the vending machine game,” nov 2019, [Online]. Available: <https://www.bcbusiness.ca/Young-Guns-Andy-Chou-sees-change-in-the-vending-machine-game>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [14] R. Mertens, “Beer Dispensing,” in *Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets*, H. M. Eßlinger, Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, 2009, pp. 339–357.
- [15] Brewers Association, *Draught Beer Quality Manual*, 4th ed., E. Jimenez, Ed. Kristi Switzer, 2019.
- [16] Biertap.eu, “Help By Choice Beerdispenser,” 2021, [Online]. Available: <https://www.biertap.eu/en/help-by-choice-beerdispenser>. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [17] R. Budynas and K. Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, 9th ed. McGraw-Hill, 2011.
- [18] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*, 4th ed. McGraw-Hill, 2010.
- [19] “Motion/Position Control Motors, Controls, and Feedback Devices,” National Electrical Manufacturers Association, Standard, 2001.
- [20] F. Beer, E. R. Johnston, D. F. Mazurek, P. J. Cornwell, and E. R. Eisenberg, *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*, 9th ed. McGraw-Hill, 2010.
- [21] J. R. Azinheira, *Sensores e Atuadores*. I.S.T.- DEM, 2002.
- [22] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge University Press, 2015.
- [23] Eurostat, “Estatísticas sobre os preços da eletricidade,” 2020, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/pt&oldid=496211#Pre.C3.A7os_da_eletricidade_para_consumidores_dom.C3.A9sticos. [Accessed: Feb. 15, 2021].
- [24] F. Beer, E. R. Johnston, J. T. Dewolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 6th ed. McGraw-Hill, 2012.

Anexo A

Dimensionamento estático do veio

Em relação ao carregamento estático do veio foram feitas duas simplificações: os pontos de apoio no rolamento e na união elástica foram considerados apoios simples e a carga é aplicada num ponto único. O veio tem 150 mm de comprimento e o ponto de aplicação da carga é a meio do mesmo. O diagrama de corpo livre do carregamento estático ao veio está representado na Figura A.1.

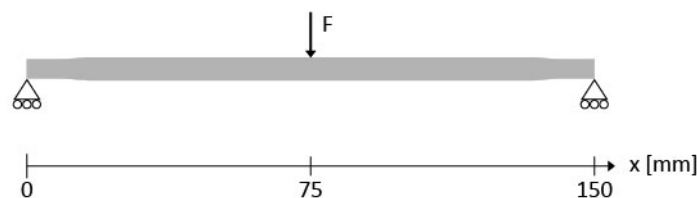


Figura A.1: Diagrama de corpo livre do veio.

O primeiro momento a ser verificado é quando o copo está cheio na posição vertical e a carga total consiste no peso (W) resultante do copo cheio e do suporte de copos. O resultado é obtido a partir de (A.1), onde a aceleração gravítica (g) é de 9.8 ms^{-2} e a massa total (m) é de 0.225 kg que corresponde à soma da massa do suporte de copos com a massa do copo cheio, com $W = 2.2 \text{ N}$.

$$W = mg \quad (\text{A.1})$$

Na Figura A.2, estão representados os diagramas do esforço transversal e do momento fletor resultantes no veio. Com base nestes diagramas, é possível concluir que a secção crítica do veio é a meio do mesmo e os esforços transversal e momento fletor são calculados através da expressão (A.2).

$$V = \frac{F}{2}; M = \frac{Fx}{2} \quad (\text{A.2})$$

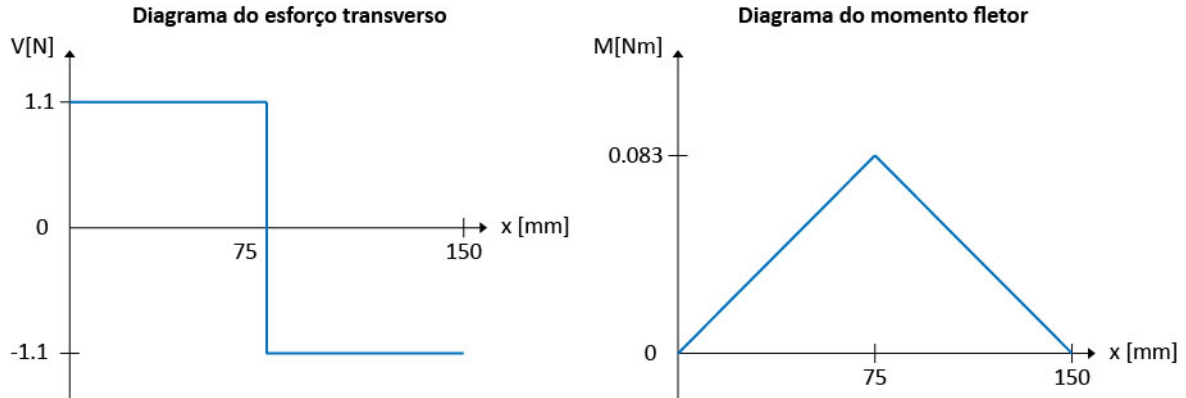


Figura A.2: Diagrama de esforço transverso (V) e momento fletor (M) com o copo cheio na posição vertical.

Sendo F a carga aplicada e x a distância do ponto de aplicação da carga ao ponto de apoio, os resultados obtidos a partir da expressão (A.2) são $V = 1.1$ N e $M = 0.083$ Nm. Adicionalmente, foi considerado um binário resultante do centro do copo estar a 50 mm do eixo. O torque (T) é calculado a partir da expressão (A.3) onde r é a distância ao ponto da carga aplicada perpendicular à direção da carga, obtendo-se $T = 0.098$ Nm.

$$T = Fr \quad (\text{A.3})$$

As tensões mecânicas correspondentes ao esforço transverso (τ_V), ao momento fletor (σ_M) e ao torque (τ_T) são calculadas a partir das equações (A.4). Os segundos momentos de área para o eixo x (I_x) e eixo y (I_y), assim como o segundo momento polar de área (J) para uma secção quadrada de lado h , são calculados a partir de (A.5). Os valores obtidos com $h = 6$ mm são $I_x = I_y = 1.08 \times 10^{-10}$ m⁴ e $J = 2.16 \times 10^{-10}$ m⁴.

$$\sigma_M = \frac{Mc}{I_x}; \tau_V = \frac{3V}{2A}; \tau_T = \frac{Tr}{J} \quad (\text{A.4})$$

$$I_x = \frac{h^4}{12}; I_y = \frac{h^4}{12}; J = I_x + I_y \quad (\text{A.5})$$

As tensões calculadas através das expressões em (A.4), onde c e r que são as distâncias do centro da secção ao ponto crítico da secção e A a área da secção, resultam em $\tau_V = 46$ kPa, $\sigma_M = 2,3$ MPa e $\tau_T = 1.4$ MPa.

A tensão de von Mises σ_{VM} é calculada a partir da expressão (A.6) que, para este caso, é $\sigma_{VM} = 3.3$ MPa.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3(\tau_V + \tau_T)^2} \quad (\text{A.6})$$

O segundo momento verificado é quando o copo está inclinado a 45° e encontra-se a metade da sua capacidade. A carga aplicada neste caso é de $F = 1.2$ N, calculada a partir de (A.1) com m a corresponder à soma das massas do suporte de copos e do copo com metade da capacidade. Para o cálculo dos diagramas de esforço transverso e momento fletor, representados na Figura A.3, utilizou-se o mesmo diagrama de corpo livre (ver Figura A.1).

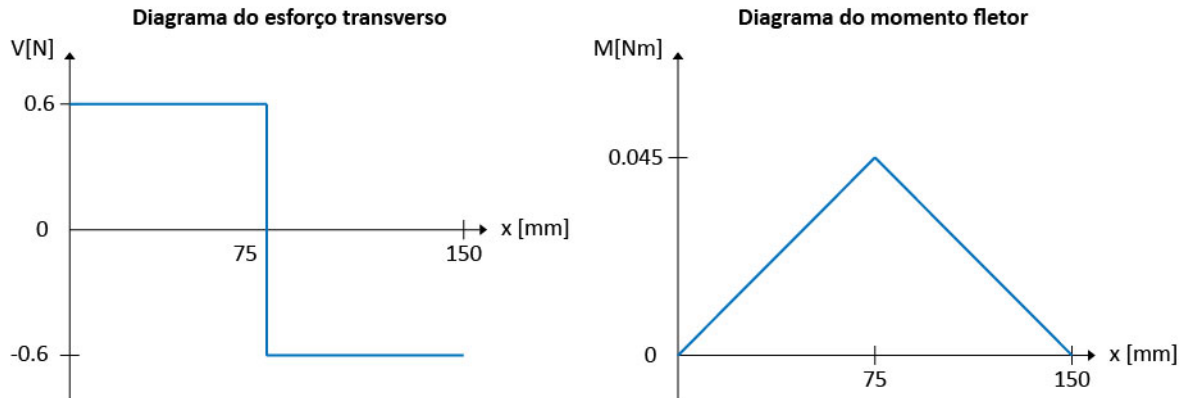


Figura A.3: Diagrama de esforço transverso (V) e momento fletor (M) com copo a 45° e com metade da capacidade.

A secção crítica para este carregamento estático é a meio do veio, onde o esforço transversal e momento fletor são calculados através das expressões (A.2), resultando em $V = 0.6 \text{ N}$ e $M = 0.045 \text{ Nm}$. Neste caso, o binário resultante é calculado considerando que o ponto de aplicação do peso do suporte é a meio do mesmo, a 50 mm do veio, e que o ponto de aplicação do peso do copo com metade da capacidade é na base do suporte de copos, a 100 mm do Veio. Através da expressão (A.3), o torque resultante é $T = 0.078 \text{ Nm}$.

As tensões resultantes dos esforços aplicados no veio, calculadas a partir de (A.4), são $\tau_V = 25 \text{ kPa}$, $\sigma_M = 1,3 \text{ MPa}$ e $\tau_T = 1.1 \text{ MPa}$. A partir da expressão (A.6), é possível calcular a tensão de von Mises, com $\sigma_{VM} = 2,3 \text{ MPa}$.

Como a tensão de von Mises é superior quando o copo está cheio e na vertical, o fator de segurança (n) é calculado a partir da expressão (A.7), sendo S_y a tensão de cedência do material escolhido. Segundo [24], a tensão de cedência da liga de alumínio 1100-H14 é $S_y = 95 \text{ MPa}$. O fator de segurança neste caso é $n = 29$.

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{VM}} \quad (\text{A.7})$$

Anexo B

Programação Arduino

```
// Inicializacao de variaveis
// Variaveis Botao
char estadoBotao = 1;
unsigned long marcadorBotao = 0;
const int botao = 8;

//Variaveis Interruptor Cup Splitter
char estadoInterruptorCS = 1;
unsigned long marcadorInterruptorCS = 0;
const int interruptorCS = 11;

//Variaveis motor Cup Splitter
const int motorCS = 6;

//Variaveis sensor Infra vermelhos
const int sensorIV = 23;

//Variaveis motor Valvula
//motor
const int pulValvula = 49;
const int dirValvula = 51;
const int enaValvula = 53;
const int steptimeValvula = 1;
byte avancarValvula = HIGH;
byte recuarValvula = LOW;
//interruptores
const int interruptor1Valvula = 26;
const int interruptor2Valvula = 28;

//Variaveis motor copo
//motor
const int pulCopo = 37;
const int dirCopo = 39;
const int enaCopo = 41;
```

```

const int steptimeCopo = 5;
byte inclinarCopo = LOW;
byte desinclinarcopo = HIGH;
//interruptores
const int interruptor1Copo = 22;
const int interruptor2Copo = 24;

//Variaveis motor porta
//motor
const int pulPorta = 43;
const int dirPorta = 45;
const int enaPorta = 47;
const int steptimePorta = 1;
byte subirPorta = LOW;
byte descerPorta = HIGH;
//interruptores
const int interruptor1Porta = 30;
const int interruptor2Porta = 32;

//Variaveis Interruptor Cup Empty
const int interruptorCE = 10;

//Variaveis Interruptor Cup Turret
char estadoInterruptorT = 0;
unsigned long marcadorInterruptorT = 0;
const int interruptorT = 9;

//Variaveis motor Cup Turret
const int motorT = 7;

//Variavel switch
int etapa = 0;

//Variaveis Valvula
const int valvula = 5;
byte abrirValvula = HIGH;
byte fecharValvula = LOW;

//Variaveis Sensor Fluxo
char estadoSensorFluxo = 0;
unsigned long marcadorSensorFluxo = 0;
const int sensorFluxo = 12;
int freqFluxo = 0;

void setup() {

```

```

//Inicializar sensores e fins de curso
pinMode(botao,INPUT);
pinMode(interruptorCS,INPUT);
pinMode(sensorIV,INPUT);
pinMode(interruptor1Valvula,INPUT);
pinMode(interruptor2Valvula,INPUT);
pinMode(interruptor1Copo,INPUT);
pinMode(interruptor2Copo,INPUT);
pinMode(interruptor1Porta,INPUT);
pinMode(interruptor2Porta,INPUT);
pinMode(interruptorCE,INPUT);
pinMode(interruptorT,INPUT);
pinMode(sensorFluxo, INPUT);

//Inicializar motores
//motorCS
pinMode(motorCS,OUTPUT);
digitalWrite(motorCS, LOW);
//motorValvula
pinMode(pulValvula,OUTPUT);
pinMode(dirValvula,OUTPUT);
pinMode(enaValvula,OUTPUT);
digitalWrite(pulValvula,LOW);
digitalWrite(dirValvula,avancarValvula);
digitalWrite(enaValvula,LOW);
//motorCopo
pinMode(pulCopo,OUTPUT);
pinMode(dirCopo,OUTPUT);
pinMode(enaCopo,OUTPUT);
digitalWrite(pulCopo,LOW);
digitalWrite(dirCopo,inclinarCopo);
digitalWrite(enaCopo,LOW);
//motorPorta
pinMode(pulPorta,OUTPUT);
pinMode(dirPorta,OUTPUT);
pinMode(enaPorta,OUTPUT);
digitalWrite(pulPorta,LOW);
digitalWrite(dirPorta,subirPorta);
digitalWrite(enaPorta,LOW);
//motorT
pinMode(motorT,OUTPUT);
digitalWrite(motorT, LOW);
//valvula
pinMode(valvula, OUTPUT);
digitalWrite(valvula, LOW);

```

```

}

```

```

void loop() {

  switch (etapa){

    //Verificar posições iniciais
    case 0:
      //Verificar posição porta
      if(desligarMotor(interruptor2Porta) == false){ //Verificar Fim de curso
        ligarMotor(dirPorta, descerPorta); //Direcionar motor
        etapa = 1;
      }else{
        etapa = 2;
      }
      break;

    case 1:
      //Descer porta
      if(desligarMotor(interruptor2Porta) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulPorta,steptimePorta); //Andar um step no motor
      }else{
        etapa = 2;
      }
      break;

    case 2:
      //Verificar posição copo
      if(desligarMotor(interruptor2Copo) == false){ //Verificar Fim de curso
        ligarMotor(dirCopo, desinclinarCopo); //Direcionar motor
        etapa = 3;
      }else{
        etapa = 4;
      }
      break;

    case 3:
      //Desinclinar copo
      if(desligarMotor(interruptor2Copo) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulCopo,steptimeCopo); //Andar um step no motor
      }else{
        etapa = 4;
      }
      break;

    case 4:
      //Verificar posição valvula
      if(desligarMotor(interruptor2Valvula) == false){ //Verificar Fim de curso

```



```

    ligarMotor(dirValvula, recuarValvula); //Direcionar motor
    etapa = 5;
}else{
    etapa = 6;
}
break;

case 5:
//Recuar valvula
    if(desligarMotor(interruptor2Valvula) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulValvula,steptimeValvula); //Andar um step no motor
    }else{
        etapa = 6;
    }
break;

case 6:
//Verificar presença de copo
    if (digitalRead(interruptorCE) == LOW){ //Verificar sensor Cup Empty
        digitalWrite(motorT, HIGH); //Ligar motor Cup Turret
        etapa = 7;
    }else{ //Ainda há copos
        etapa = 9;
    }
break;

case 7:
//Rodar torre de copos
    if (sensorRising(digitalRead(interruptorT), &marcadorInterruptorT, &estadoInterruptorT, 10UL )){
        digitalWrite(motorT, LOW);
        etapa = 8;
    }
break;

case 8:
//Verificar presença de copo
    if (digitalRead(interruptorCE) == HIGH){ //Verificar sensor Cup Empty
        etapa = 9;
    }
break;

//Ciclo de Disponibilizacao de cerveja
case 9:
// Detectar Falling do Botao
    if (sensorFalling(digitalRead(botao), &marcadorBotao, &estadoBotao, 10UL )){
        digitalWrite(motorCS, HIGH); //Iniciar Motor CS
        etapa = 10;

```

```

    }
    break;

case 10:
//Detetar Sensor CS
    if (sensorFalling(digitalRead(interruptorCS), &marcadorInterruptorCS, &estadoInterruptorCS, 10))
        digitalWrite(motorCS, LOW); //Terminar Motor CS
        etapa = 11;
    }
    break;

case 11:
//Detetar presença de copo
    if (digitalRead(sensorIV)== LOW){
        ligarMotor(dirValvula, avancarValvula); //Direcionar motor
        etapa = 12;
    }
    break;

case 12:
//Avançar valvula
    if(desligarMotor(interruptor1Valvula) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulValvula,steptimeValvula); //Andar um step no motor
    }else{
        ligarMotor(dirCopo, inclinarCopo); //Direcionar motor
        etapa = 13;
    }
    break;

case 13:
//Inclinar Copo
    if(desligarMotor(interruptor1Copo) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulCopo,steptimeCopo); //Andar um step no motor
    }else{

        //
        //Abrir Valvula
        digitalWrite(valvula, abrirValvula); //Abrir Valvula
        //

        etapa = 14;
    }
    break;

//
case 14:
//Encher copo

```

```

if (sensorRising(digitalRead(sensorFluxo), &marcadorSensorFluxo, &estadoSensorFluxo, 10UL )){
    freqFluxo++;
    if (freqFluxo >= 45){
        ligarMotor(dirCopo, desinclinarCopo); //Direcionar motor
        etapa = 15;
    }
}
break;

case 15:
//Desinclinar Copo
    if (sensorRising(digitalRead(sensorFluxo), &marcadorSensorFluxo, &estadoSensorFluxo, 10UL )){
        freqFluxo++;
        if (freqFluxo >= 90){
            digitalWrite(valvula, fecharValvula);
            freqFluxo = 0;
        }
    }
    if(desligarMotor(interruptor2Copo) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulCopo,steptimeCopo); //Andar um step no motor
    }else{
        if (freqFluxo == 0){
            ligarMotor(dirValvula, recuarValvula); //Direcionar motor
            etapa = 16;
        }
    }
break;

case 16:
//Recuar valvula
    if(desligarMotor(interruptor2Valvula) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulValvula,steptimeValvula); //Andar um step no motor
    }else{
        ligarMotor(dirPorta, subirPorta); //Direcionar motor
        etapa = 17;
    }
break;

case 17:
//Subir Porta
    if(desligarMotor(interruptor1Porta) == false){ //Verificar Fim de curso
        rodarMotor(pulPorta,steptimePorta); //Andar um step no motor
    }else{
        etapa = 18;
    }
break;

```

```

case 18:
//Detetar se ainda há copo
if (digitalRead(sensorIV)== HIGH){
//Detectar Falling do Botao
if (sensorFalling(digitalRead(botao), &marcadorBotao, &estadoBotao, 10UL )){
ligarMotor(dirPorta, descerPorta); //Direcionar motor
etapa = 19;
}
}
break;

case 19:
//Descer porta
if(desligarMotor(interruptor2Porta) == false){ //Verificar Fim de curso
rodarMotor(pulPorta,steptimePorta); //Andar um step no motor
}else{
etapa = 6; // Voltar ao início do ciclo pedir uma cerveja
}
break;

}
}

// Verificar a mudança de estado FALLING
boolean sensorFalling(char sensor, unsigned long *marcador, char *estado, unsigned long intervalo) {
switch (*estado) {
case 0:
if (sensor == HIGH) return false;
else {
*estado = 2;
*marcador = millis();
return false;
}

case 1:
if (sensor == LOW) return false;
else {
*estado = 3;
*marcador = millis();
return false;
}

case 2:
if (sensor == HIGH) {
*estado = 0;
return false;
}
}
}

```

```

else {
    if (millis() - *marcador >= intervalo) {
        *estado = 1;
        return true;
    }
    else
        return false;
}

case 3:
    if (sensor == LOW) {
        *estado = 1;
        return false;
    }
    else {
        if (millis() - *marcador >= intervalo) {
            *estado = 0;
            return false;
        }
        else
            return false;
    }
default:
    {
        *estado = 0;
        return false;
    }
}

}

void ligarMotor(int dir, byte direcaoMotor){
    digitalWrite(dir,direcaoMotor);
}

void rodarMotor(int pul, int steptime){
    digitalWrite(pul,HIGH);
    delay(steptime);
    digitalWrite(pul,LOW);
    delay(steptime);
}

bool desligarMotor(int sensor){
    if (digitalRead(sensor) == LOW) {
        return true;
    }else{
        return false;
    }
}

```

```

}

// Verificar a mudança de estado RISING
boolean sensorRising(char sensor, unsigned long *marcador, char *estado, unsigned long intervalo) {
  switch (*estado) {
  case 0:
    if (sensor == HIGH) return false;
    else {
      *estado = 2;
      *marcador = millis();
      return false;
    }

  case 1:
    if (sensor == LOW) return false;
    else {
      *estado = 3;
      *marcador = millis();
      return false;
    }

  case 2:
    if (sensor == HIGH) {
      *estado = 0;
      return false;
    }
    else {
      if (millis() - *marcador >= intervalo) {
        *estado = 1;
        return false;
      }
      else
        return false;
    }

  case 3:
    if (sensor == LOW) {
      *estado = 1;
      return false;
    }
    else {
      if (millis() - *marcador >= intervalo) {
        *estado = 0;
        return true;
      }
      else
        return false;
    }
  }
}

```

```
    }  
    default:  
    {  
        *estado = 0;  
        return false;  
    }  
}  
}
```