



Projeto de sistema de lavagem para tanques de armazenamento de produtos alimentares

Pedro Miguel Alves Lomelino
Licenciado em Engenharia Mecânica

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Fernando Paulo Neves da Fonseca Cardoso Carreira
Doutor Francisco Mateus Marnoto Oliveira Campos

Júri:

Presidente:

Doutor Vitor Manuel Rodrigues Anes

Vogais:

Doutor Pedro Miguel Abreu Silva
Doutor Fernando Paulo Neves da Fonseca Cardoso Carreira

Fevereiro de 2022

Página deixada propositadamente em branco

A todos os mestres que a vida me ofereceu.

Página deixada propositadamente em branco

Agradecimentos

A nível técnico quero aproveitar este espaço para um agradecimento aos meus orientadores, o Professor Francisco Campos e o Professor Fernando Carreira. Foram incansáveis ao longo desta jornada.

À equipa CISROBCLE - Desenvolvimento de um sistema robótico inteligente para a lavagem de cisternas (Nº POCI-01-0247-FEDER-039764), tendo o atual trabalho final de mestrado ter sido desenvolvido em colaboração com o projeto.

A nível pessoal quero agradecer a oportunidade que me foi dada pela minha mãe e pelo meu pai em melhorar as minhas capacidades e procurar um futuro melhor.

À minha companheira de vida por me acompanhar nos altos e baixos fazendo este percurso tanto melhor.

Página deixada propositadamente em branco

Resumo

As alterações climáticas são um tema, nos dias que correm, cada vez mais relevante e que suscita preocupação na realidade das empresas e dos consumidores. Neste contexto, é importante procurar substituir os métodos tradicionais quando existirem soluções tecnológicas mais avançadas e com menor impacto ambiental. Estas devem reduzir a utilização de recursos e aumentar a eficácia dos processos. Desta forma, para além dos benefícios ambientais, as empresas tornar-se-ão mais competitivas no mercado de que fazem parte.

O presente trabalho propõe uma solução tecnológica mais avançada em relação ao mercado da lavagem de tanques de armazenamento de produtos. A presente solução foi idealizada para uma herdade onde os tanques de armazenamento são utilizados para a produção de vinho.

Na solução aqui apresentada propõe-se, por um lado, automatizar os processos de lavagem, através de um sistema para lavar sequencialmente vários tanques de armazenamento sem a intervenção dos operadores. Por outro lado, tentou-se reduzir os custos de lavagem, selecionando um elemento terminal de lavagem (cabeça de lavagem rotativa) mais atual relativamente à solução presentemente utilizada na herdade (bola de lavagem fixa).

Os resultados obtidos, quando comparadas as duas soluções, mostram que a solução proposta tem efeitos positivos a nível do consumo de recursos (água e detergente) com uma redução em cerca de 30%. Por outro lado, verificou-se que a nível económico, existe retorno do investimento inicial a médio-longo prazo.

Concluiu-se então que o sistema desenvolvido apresenta benefícios que podem constituir uma mais-valia na herdade para onde foi dimensionado. De uma forma geral, os estudos realizados sugerem que, para empresas onde exista um maior volume de lavagens de tanques, os benefícios do sistema proposto serão mais acentuados.

Palavras-Chaves: Cabeça de lavagem rotativa, *Gantry*, Sustentabilidade, Sistemas de lavagens, Alterações climáticas, Sistemas automáticos.

Página deixada propositadamente em branco

Abstract

Climate change is an increasingly relevant issue these days and one that is causing concern in companies and consumers alike. In this context, it is important to seek to replace traditional methods when more advanced technological solutions with less environmental impact exist. These should reduce the use of resources and increase process efficiency. In this way, besides the environmental benefits, companies will become more competitive in the market they are part of.

The present work proposes a more advanced technological solution in relation to the market of product storage tank washing. This solution was conceived for a farm where the storage tanks are used for wine production.

The solution presented here proposes, on the one hand, to automate the washing processes by means of a system for sequentially washing several storage tanks without the intervention of operators. On the other hand, an attempt has been made to reduce washing costs by selecting a more up-to-date washing terminal element (rotating washing head) compared to the solution currently used on the estate (fixed washing ball).

The results obtained, when comparing the two solutions, show that the proposed solution has positive effects on resource consumption (water and detergent) with a reduction of approximately 30%. On the other hand, it was verified that, at an economic level, there is a return on the initial investment in the medium to long term.

It was concluded that the system developed presents benefits that can constitute an added value in the farm where it was dimensioned. In a general way, the studies carried out suggest that, for companies where there is a higher volume of tank washing, the benefits of the proposed system will be more accentuated.

Keywords: Rotary jet heads, Gantry, Sustainability, Wash systems, Climate change, Automatic systems.

Página deixada propositadamente em branco

Abreviaturas e Acrónimos

COP	Clean Out of Place
CIP	Cleaning In Place
PLC	Power Line Communication
HMI	Human-Machine Interface
EHEDG	Grupo Europeu de Engenharia e Design Higiênico
SCADA	Supervisory control and data acquisition
CAD	Computer Aided Design
SA	Sociedade Anónima
DL	Decreto-Lei
BCSD	Business Council for Sustainable Development

Página deixada propositadamente em branco

Lista de Símbolos

P_0	Pressão de entrada na cabeça de lavagem
A_0	Área de entrada da cabeça de lavagem
A_1	Área de entrada no volume de controlo
A_2	Área de saída do <i>nozzle</i> 1
A_3	Área de saída do <i>nozzle</i> 2
A_4	Área de saída do <i>nozzle</i> 3
A_5	Área de saída do <i>nozzle</i> 4
h_1	Distancia entre a entrada ao ponto de apoio
F_a	Força nos apoios
F_p	Força provocada pela pressão do fluído
D	Diâmetro do tanque
D_{tampa}	Diâmetro da tampa
ρ	Densidade da água
g	Aceleração gravítica
Δh	Altura de coluna de água
ΔP	Diferencial de pressão
v	Velocidade do escoamento
A	Área da secção transversal do escoamento
d_A	Diâmetro da tubagem em aço inoxidável
Z_1	Cota da altura da tubagem a nível térreo
Z_2	Cota mais elevada da tubagem
d_m	Diâmetro da mangueira
Z_3	Cota da mangueira no elemento terminal
Q	Caudal debitado pela cabeça de lavagem
P	Pressão do fluido (água) na cabeça de lavagem
T	Temperatura do fluido (água)
L_A	Comprimento total da tubagem de aço inoxidável
L_M	Comprimento total da tubagem de mangueira
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
d	Diâmetro

v_a	Velocidade do escoamento na tubagem em aço inoxidável
v_m	Velocidade do escoamento na mangueira
f	Fator de atrito
Re	Número de Reynolds
ε	Coefficiente de rugosidade
ε_t	Coefficiente de rugosidade tubo de aço inoxidável
ε_m	Coefficiente de rugosidade mangueira
$\sum \lambda$	Soma das perdas de carga existentes na tubagem
ΔP_{linear}	Perda de carga linear
L	Comprimento
$\Delta P_{localizada}$	Perda de carga localizada
k	Coefficiente de perda de carga
$k_{tubagem}$	Coefficiente de perda de carga na tubagem
M	Massa
V	Volume
c	Calor específico
ΔT	Diferencial de temperatura

Índice

Resumo	V
Abstract	VII
Abreviaturas e Acrónimos	IX
Lista de Símbolos	XI
Índice	XIII
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Conceção estrutural, mecânica e acionamento do sistema robótico	3
1.1.2 Sistema de lavagem	4
1.1.3 Materiais constituintes do sistema	5
1.2 Definição do caso de estudo	5
Capítulo 2 - Estado da arte	9
2.1 Sistemas de lavagens	9
2.1.1 Métodos de limpeza	9
2.1.2 Equipamentos de limpeza	11
2.1.3 Estudo sobre a eficiência de lavagem com diferentes elementos terminais.	16
2.2 Sistemas robóticos de manipulação	21
2.2.1 Componentes de um manipulador robótico	21
2.2.2 Robots de configuração cartesiana – <i>gantry robots</i>	22
2.3 Normativas homem-máquina	25
Capítulo 3 - Projeto do sistema robotizado de lavagem de tanques de armazenamento de produtos alimentares	27
3.1 Estudo do sistema automático de lavagem	27
3.2 Definição do conceito do sistema automático de lavagem	28

3.3	Cabeça de lavagem _____	29
3.4	Caraterísticas dos tanques de armazenamento e dos componentes do sistema de lavagem _____	34
3.5	Estudo do comprimento do tubo para posicionamento _____	38
3.6	Definição das especificações dimensionais do <i>gantry robot</i> _____	40
3.7	Definição das especificações dinâmicas do <i>gantry robot</i> _____	45
3.8	Projeto do <i>gantry robot</i> _____	50
Capítulo 4 - Projeto do sistema de automação _____		57
4.1	Componentes do sistema automático _____	57
4.2	Estudo do movimento do robot para lavagem de tanques de armazenamento _____	60
4.3	Modos de operação _____	61
4.4	Interfaces de utilizador - HMI _____	64
4.5	Algoritmos de funcionamento _____	66
4.5.1	Definição das posições dos eixos _____	66
4.5.2	Algoritmo do modo de sequência automática _____	67
4.5.3	Algoritmo do modo de seleção manual _____	69
4.5.4	Algoritmo do processo de lavagem _____	69
Capítulo 5 – Projeto do sistema de lavagem _____		71
5.1	Caraterísticas dos fluidos de lavagem _____	71
5.2	Cálculo da perda de carga na rede dos fluidos de lavagem _____	80
5.2.1	Cálculo do número de Reynolds _____	84
5.2.2	Cálculo do fator de atrito _____	85
5.2.3	Cálculo da perda de carga linear _____	87
5.2.4	Cálculo da perda de carga localizada _____	87
5.2.5	Cálculo da perda de carga total ao longo da tubagem _____	90
5.3	Seleção da bomba da água de lavagem _____	90
5.4	Estudo energético acerca do elemento terminal de lavagem. _____	92

5.5 Período de payback _____	97
Capítulo 6 - Conclusões e trabalho futuro _____	101
Referências bibliográficas _____	105
Anexos _____	111
Anexo I – Cabeça de lavagem rotativa (Alfa Laval Multijet 25) _____	113
Anexo II – Cálculo da perda de carga _____	151

Página deixada propositadamente em branco

Índice de Figuras

Figura 1 – Armazém da zona de fermentação utilizado como caso de estudo.....	6
Figura 2 – Sistemas de limpeza: a) bola de lavagem fixas; b) bola de lavagem rotativas; c) cabeça de lavagem rotativa.....	12
Figura 3 – Comparação dos parâmetros de tempo, temperatura, recursos (água e detergente) e força de impacto das 3 soluções disponíveis para a lavagem dos tanques de armazenamento. Fonte: Laval, 2021, adaptado.	12
Figura 4 – Padrão dos jatos nas paredes dos tanques a serem lavados através das três soluções: a) bola fixa, b) bola rotativa e c) cabeça de lavagem rotativa Fonte: Laval, 2021	13
Figura 5 – Projeção da água com uma bola de lavagem rotativa	14
Figura 6 – Cabeça de lavagem rotativa	14
Figura 7 –Efeito do jato na parede: 1) centro do impacto; 2) limite da zona de impacto	15
Figura 8 – Zona de passagem do jato de água proveniente de uma cabeça de lavagem. Fonte: Cleaning, 2021	16
Figura 9 – Simulação comparativa dos três tipos de elementos terminais de lavagem: cabeça fixa (esquerda), cabeça rotativa (centro) e cabeça de lavagem rotativa (direita). Fonte: Laval, 2021	17
Figura 10 – Planta do armazém, localização dos tanques de armazenamento (círculos no canto superior esquerdo) e do sistema automático de lavagem (linha a vermelho)	28
Figura 11 – Definição dos principais elementos do sistema robótico de lavagem.....	29
Figura 12 – Objetivos principais na implementação do conceito de sustentabilidade nas organizações Laval, 2021	31
Figura 13 - Cabeça de lavagem da Alfa Laval Multijet 25	33
Figura 14 – Sistema de lavagem e descrição dos componentes	34
Figura 15 – Descrição dos fatores que comprometem o dimensionamento e especificações dos tanques de armazenamento. Fonte: Vieira, 2020, adaptado.	35
Figura 16 – Dimensões da cabeça de lavagem alfa Laval multijet 25	36
Figura 17 – Componentes do dispositivo de lavagem.....	37
Figura 18 – Análise dos constrangimentos para definição da tampa	37
Figura 19 –Distância de alcance dos jatos com a cabeça de lavagem na posição mais desfavorável.....	39

Figura 20 – Caraterísticas do jato da Alfa Laval Multijet 25. Fonte: Cleaning, 2021 ...	40
Figura 21 – Definição da folga nas extremidades e entre os tanques de armazenamento	41
Figura 22 –Análise do curso do eixo Y: a) limite inferior; b) limite superior gantry robot	43
Figura 23 - Dimensões do sistema de lavagem a considerar	44
Figura 24 – Cotas do plano de trabalho do sistema de lavagem.....	44
Figura 25 - Cotas do plano de trabalho do sistema de lavagem e análise da folga até ao teto.	45
Figura 26 – Cargas aplicadas no ponto de apoio do suporte do sistema de lavagem.	46
Figura 27 – Volume de controlo para calculo da pressão exercida pelo fluido.....	47
Figura 28 – Esquema de pressão e área considerado.....	48
Figura 29 – Comprimento da carga	51
Figura 30 – Representação dos eixos utilizados na software	52
Figura 31 – Distância entre o chão e a superfície mais próxima do chão	52
Figura 32 – Representação da distância horizontal entre o eixo da carga e o pilar.....	54
Figura 33 –Modelo 3D do gantry robot obtido através da plataforma de configuração	54
Figura 34 - Modelo 3D do sistema robótico de lavagem, gantry robot com os tanques de armazenamento	55
Figura 35 - Componentes do Sistema automático de lavagem a controlar	57
Figura 36- Arquitetura de controlo de robot automático de lavagem de tanques de armazenamento	58
Figura 37 – Arquitetura de controlo do Sistema de lavagem	60
Figura 38 – Etapas do movimento executado por uma junta	61
Figura 39 – Esquema do Sistema de controlo das juntas	61
Figura 40 – Modos de funcionamento do robot para lavagem de tanques de armazenamento	62
Figura 41 – Posicionamento do sistema de lavagem em condições de stand-by: posição home.	63
Figura 42 – HMI: layout da tela inicial do HMI - seleção do modo de operação	64
Figura 43 – Tela exemplo do modo de operação “modo de seleção manual” do HMI..	65
Figura 44 - Tela exemplo do modo de operação “modo de sequência automática” do HMI	65
Figura 45 - Tela exemplo do modo de operação “manutenção” do HMI.....	66

Figura 46- Definição das posições do elemento terminal do gantry robot.....	66
Figura 47 – Cotas dos pontos que definem as posições do elemento terminal do robot automático	67
Figura 48 - Fluxograma do processo de funcionamento do modo sequência automática	68
Figura 49 –Fluxograma do processo de funcionamento do modo seleção manual	69
Figura 50 – Diagrama do processo de lavagem.....	70
Figura 51 – Escala de pH. Fonte: Antunes et al., 2018, adaptado.....	72
Figura 52 – Principais substâncias incluídas num detergente eficaz (Sansebastiano et al., 2007).....	73
Figura 53 – Características do produto utilizado para efetuar a lavagem do tanques Fonte: Synerlogic & Barroso, 2020.	75
Figura 54 – Fatores a considerar no desempenho de um detergente de lavagem. FONTE: adaptado de (Tamine, 2009).	76
Figura 55- Padrão formado pelos jatos na superfície do tanque durante 4 minutos de funcionamento	80
Figura 56 – Diagrama do sistema para efetuar a lavagem dos tanques de armazenamento	81
Figura 57 - Representação esquemática do circuito de lavagem.....	83
Figura 58 - Coeficientes de rugosidade para diferentes materiais (Wikibooks, 2017)...	86
Figura 59 - Perda de carga nos ligadores rápidos (Parker, 2021).....	89
Figura 60 - Gama de produtos que respondem aos critérios de seleção da Efaflu®.....	91
Figura 61 - Curva característica da bomba selecionada	92
Figura 62 – Gráfico correspondente ao período de payback que compara o investimento da bola fixa com a cabeça rotativa.....	98

Página deixada propositadamente em branco

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Caraterísticas do processo de lavagem do taque de fermentação.....	18
Tabela 2 – Procedimentos e custos associados ao processo de lavagem.....	19
Tabela 3 – Percentagem de poupança de recursos	19
Tabela 4 – Estudo comparativo entre uma bola fixa e uma cabeça rotativa. Fonte: (Technologies, 2021) adaptado.....	20
Tabela 5 – Estudo comparativo de diferentes configurações de gantry robots	24
Tabela 6 - Sistemas de cabeças de lavagem pré-selecionados para a fase seguinte de seleção.	33
Tabela 7 - Dimensões do tanque de armazenamento	35
Tabela 8 – Dimensões a considerar para o projeto do gantry robot	42
Tabela 9 - Deslocamento dos eixos do sistema de posicionamento da cabeça de lavagem	45
Tabela 10 – Caraterísticas dinâmicas da carga.....	46
Tabela 11- Esforços totais aplicados no ponto de fixação do dispositivo de lavagem...	50
Tabela 12 – Procedimento de lavagem atual	78
Tabela 13- Resultados obtidos para o fator de atrito	86
Tabela 14 – Coeficientes de perda de carga em componentes (Dandara, 2019).....	88
Tabela 15 - Resultados detalhados do cálculo de perdas de carga	90
Tabela 16 - Processo de lavagem e consumos praticados na herdade da Malhadinha Nova	95
Tabela 17 – Cálculo do volume anual de água e detergente e custos associados.....	96
Tabela 18 – Custos anuais acumulados para cada uma das soluções (bola fixa e cabeça rotativa).....	98

Página deixada propositadamente em branco

Capítulo 1 – Introdução

Em Portugal, a exportação no sector da agricultura tem vindo a aumentar nas últimas décadas (Portuguesa, 2019). Na produção de vinho, Portugal tem produtores no ‘top’ 100 a nível mundial (Público, 2020). Já em relação à produção de azeite, prevê-se que Portugal seja o terceiro maior produtor mundial na próxima década (Notícias, 2020). Existem também linhas de crédito de quantias consideráveis que estão a ser distribuídas a fim de desenvolver este sector (Governo - República Portuguesa, 2020). Estes dados sugerem que serão cada vez maiores as necessidades de armazenamento dos produtos alimentares acima mencionados, tais como outros equivalentes, enquanto aguardam o momento da sua exportação ou consumo. Existem grandes espaços, nomeadamente armazéns, que são utilizados para guardar este tipo de produtos em tanques de várias dimensões. Uma vez que o mesmo produtor pode necessitar de utilizar o mesmo tanque para o armazenamento de lotes ou tipos de produtos diferentes, é necessário que seja feita uma lavagem completa e eficaz dos tanques. Neste contexto, o presente trabalho final de mestrado pretende desenvolver um sistema de lavagem automático para a lavagem de tanques de armazenamento de produtos alimentares.

1.1 Objetivos

Os estudos realizados revelaram que atualmente existem empresas que executam a lavagem dos seus tanques de armazenamento de produtos alimentares de forma manual, isto é, os operadores entram nos tanques de armazenamento para efetuar a lavagem. O presente trabalho final de mestrado tem como principal objetivo investigar e desenvolver um sistema robótico inteligente para efetuar a lavagem automática de tanques de armazenamento de produtos alimentares ou outro tipo de produto. Pretende-se obter um sistema que:

- i. Elimine a necessidade de intervenção humana no interior do tanque de armazenamento, com a promover a segurança dos operadores;
- ii. Diminuição do custo global do processo, quando comparado com sistemas manuais;

- iii. Automatize e aumente a eficiência do processo de lavagem;
- iv. Reduza os desperdícios gerados em termos de recursos hídricos e produtos químicos durante a lavagem;

Assim, e de forma a atingir-se os objetivos gerais anteriores, o presente trabalho visa os seguintes objetivos específicos:

- Investigar o modelo estrutural e configuração geométrica: um dos principais desafios do projeto é desenvolver um sistema com uma arquitetura e configuração geométrica que permita a entrada do elemento que efetua a lavagem dos tanques de armazenamento no seu interior, sem que exista o risco de colisão;
- Projetar o modo de movimentação e deslocação do sistema: neste contexto, o objetivo será realizar a investigação em torno do modo de ação e tipo de movimentação do sistema;
- Estudar e desenvolver o modelo da arquitetura do sistema estrutural, mecânico e de acionamento: um dos principais desafios do projeto incide na integração dos diversos sistemas (estrutural, mecânico, acionamento e lavagem), que compõem o sistema robótico a desenvolver;
- Estudar os materiais e componentes do sistema de lavagem: Pretende-se obter um sistema com elevada resistência à exposição a ambientes químicos agressivos, que caracterizam o ambiente de lavagem deste tipo de estruturas. Simultaneamente, pretende-se estudar os materiais a aplicar, que terão de ser compatíveis com os requisitos impostos pelas agências reguladoras, nomeadamente referentes às normas de segurança para produtos alimentares.

O trabalho final de mestrado propõe o desenvolvimento de um novo sistema de robótico para a lavagem automática de tanques de armazenamento de produtos alimentares ou outro tipo de produto. O conceito e arquitetura subjacente à solução proposta assenta nos seguintes conceitos:

- i. Sistema robótico para movimentar um dispositivo de lavagem através de um sistema de eixos lineares, com um espaço de trabalho cartesiano, designado por *gantry robot*;
- ii. Sistema autónomo com atuação segundo perfis de lavagem programados, de acordo com as especificidades da matéria-prima a lavar;

O presente trabalho final de mestrado será desenvolvido com uma arquitetura apta a corresponder aos requisitos geométricos e dimensionais dos tanques de armazenamento. A par desta investigação, o projeto procurará estudar a componente dos materiais constituintes, de modo a corresponder aos requisitos de resistência química, mecânica, e segurança, aquando da exposição ao processo de lavagem.

Finalmente, será realizado um estudo energético comparativo, em que o objetivo principal passará por realizar uma comparação do consumo de água e de energia entre o sistema utilizado atualmente na herdade e o sistema proposto. Este estudo deverá revelar qual dos modos (atual ou proposto) é mais económico e acarreta menor impacto ambiental.

Uma descrição mais detalhada das especificações gerais que irão orientar o desenvolvimento do conceito final do sistema é apresentada de seguida.

1.1.1 Conceção estrutural, mecânica e acionamento do sistema robótico

O sistema a desenvolver estará sujeito a um conjunto de constrangimentos dimensionais, nomeadamente impostos pelas dimensões da entrada no tanque de armazenamento e do espaço envolvente. Neste sentido, a solução apresentará uma configuração diferenciada para operar em ambientes condicionados em termos dimensionais e geométricos. Neste âmbito será realizado o estudo estrutural e de configuração geométrica do sistema mecânico com o objetivo de se atingir um sistema flexível com as seguintes especificações:

- O sistema robótico deve apresentar uma configuração geométrica e dimensões não só compatíveis com as dimensões dos compartimentos de entrada como também das restantes dimensões do tanque de armazenamento, nomeadamente a altura e diâmetro de cada tanque.
- O sistema robótico deve possuir eixos com curso suficiente para executar a lavagem dos tanques dispostos lado-a-lado. O número de tanques dispostos lado-a-lado e consequentemente, o comprimento dos eixos serão definidos ao longo do presente documento.
- O sistema robótico deverá suportar as solicitações a que a estrutura estará exposta, em consequência do peso da própria estrutura e dos componentes de lavagem;

Ao nível do desenvolvimento da estrutura, também se pretende estudar as abordagens do tipo de movimento, nas seguintes vertentes:

- Movimento de translação vertical para descida/subida do sistema de lavagem;
- Movimento de translação para deslocamento do sistema de lavagem na direção longitudinal.

1.1.2 Sistema de lavagem

Para desempenhar a sua função, o sistema robótico a desenvolver irá integrar um sistema de lavagem que terá como finalidade o transporte dos fluidos e a sua projeção para a lavagem interior dos tanques de armazenamento. Assim, para efetuar a lavagem de forma eficaz realizar-se-á uma investigação tendo como objetivos o estudo e seleção de sistemas avançados de “cabeça de lavagem” (*head cleaning systems*). A implementação desta solução irá encontrar determinados desafios, nomeadamente relacionados com as dimensões e configuração do espaço interior dos tanques de lavagem. Adicionalmente, outro dos desafios reside em maximizar a eficiência do processo de lavagem, com vista à otimização dos recursos hídricos e compostos químicos utilizados. Assim, será estudada a melhor abordagem para responder aos requisitos da otimização do processo de lavagem. De acordo com o sistema de controlo a desenvolver, pretende-se a criação de perfis de lavagem em função do produto armazenado, para a atuação automática do sistema. Este modo de atuação do sistema irá permitir um modelo de otimização de desperdícios, em termos de recursos hídricos e compostos químicos. Por outro lado, será necessário conceber e projetar um suporte para o elemento terminal do sistema de lavagem (cabeça de lavagem) para o ligar ao sistema robótico. Neste sentido, posteriormente serão estudados os efeitos do peso e forças que possam ser geradas na fase de atuação do sistema.

1.1.3 Materiais constituintes do sistema

Conforme já referido, o material a utilizar no sistema terá de atender aos requisitos de resistência a temperaturas e humidades elevadas, bem como à exposição a resíduos corrosivos existentes no interior de um tanque de armazenamento. Entre os parâmetros que serão considerados no estudo de materiais, encontram-se:

- Pressão do fluido de lavagem;
- Temperatura do fluido de lavagem;
- Características químicas do fluido de lavagem;

Dadas as boas características dos aços inoxidáveis relativamente à resistência à oxidação e resistência à corrosão, estes materiais serão considerados para a construção da estrutura mecânica do sistema robótico. É importante garantir a resistência às condições adversas intrínsecas ao processo de lavagem. Nesse sentido, o aço inoxidável visa a possibilidade de conferir resistência mecânica e resistência à corrosão exigidas durante o processo de lavagem. Procurar-se-á encontrar o equilíbrio necessário entre: a facilidade de construção do equipamento e resistência à corrosão de toda a estrutura e o custo. Será ainda determinante que a seleção dos materiais respeite as normas impostas pelas agências reguladoras no que diz respeito à introdução dos materiais no interior de unidades de armazenamento de produtos alimentares.

1.2 Definição do caso de estudo

Atualmente Portugal assume destaque como um país de referência internacional na produção de vinhos. A oferta de enoturismo está presente em todo o território nacional. Nesse sentido, tem-se também verificado uma crescente oferta de produtos, equipamentos e serviços ligados ao enoturismo, com capacidade de atrair turistas às regiões de menor densidade turística (mesmo em épocas baixas), que importa apoiar, promover e replicar (Turismo de Portugal, 2019). Por estas razões, assim como a motivação pessoal do autor sobre o mercado do enoturismo, este trabalho propõe uma solução para a lavagem automatizada dos tanques de armazenamento onde é feita a fermentação da uva. Este trabalho irá utilizar como caso de estudo, a implementação do sistema desenvolvido na herdade da Malhadinha Nova, que possui um armazém de fermentação com tanques de aço inox para a maioria da produção de vinho (Figura 1). No processo de fermentação da uva, as leveduras alimentam-se do açúcar natural presente no sumo das uvas,

transformando-o em álcool e dióxido de carbono. Nesta fase, o enólogo decide sobre a realização desta etapa em tanques de aço inox ou em barricas de carvalho.



Figura 1 – Armazém da zona de fermentação utilizado como caso de estudo.

Durante uma visita à herdade em questão foi proposto ao enólogo responsável pelo armazém de fermentação o projeto de um sistema automático para a lavagem dos tanques de armazenamento para a fermentação. De uma forma bastante sucinta e direta foram identificadas as dificuldades abaixo citadas:

“Os tanques em questão são em aço inoxidável. Aqui, fermentamos as nossas melhores uvas tintas. Estes depósitos são utilizados para fermentar as uvas, transformando o mosto de uvas em vinho tinto, processo esse que demora cerca de 7-8 dias.

Durante esse processo de fermentação são efetuadas uma série de operações, nomeadamente a remontagem com auxílio de bombas enológicas. Esses mesmos tanques são refrigerados para poder manter a temperatura da fermentação como desejamos.

Assim que entendo que está na altura de se retirar o vinho inicia-se a higienização, que consiste no uso sequencial de água e detergente de limpeza. Trata-se de um processo relativamente moroso e com alguns riscos tanto para o operador como para os tanques adjacentes que poderão estar ou não cheios com uva ou mosto a fermentar.”

Após o diálogo com o enólogo da herdade, tornou-se mais claro que um sistema automático de lavagem pode ser uma mais-valia nos trabalhos de limpeza dos tanques de armazenamento. Após confrontado com a ideia, o enólogo mostrou-se recetivo e concordou que o sistema poderia melhorar a segurança, acelerar o processo e reduzir os

custos. Como desvantagem, apontou que uma vez que a herdade funciona também como alojamento no ramo do enoturismo, uma estrutura metálica na adega poderia causar alguma poluição visual. Nesse sentido, foi sugerido que o projeto fosse o mais minimalista possível.

A presente dissertação encontra-se subdividida em 6 capítulos. O primeiro capítulo, Objetivos, dispõe não só a problemática designada como também os objetivos para que esta seja resolvida. Inicialmente é realizado um pequeno enquadramento sobre a posição de Portugal perante o mundo em relação às exportações de produtos alimentares. Posteriormente é abordado o sistema de lavagem proposto com o objetivo de otimizar a lavagem de tranques de armazenamento.

O segundo capítulo, Estado da arte, descreve de forma pormenorizada informação acerca de um sistema de lavagem, nomeadamente, os métodos de limpeza existentes e os equipamentos utilizados. Posteriormente é abordado o sistema que será responsável pelo posicionamento da cabeça de lavagem na sua posição de funcionamento, o *gantry robot*. Neste capítulo são também discutidas as normativas homem-máquina relacionadas e que estão atualmente em vigor.

O terceiro capítulo, Projeto do equipamento, apresenta o local onde será implementado o sistema de lavagem relatando os principais constrangimentos a ter em conta. Neste capítulo é realizada a seleção do elemento terminal de lavagem, assim como levantadas as dimensões dos tanques de armazenamento. São também abordadas as especificações dimensionais estáticas e dinâmicas do elemento terminal de lavagem com o objetivo de realizar o projeto do *gantry robot*.

O quarto capítulo, Projeto de automação, são apresentados os componentes a serem incluídos no sistema automático, assim como a sua arquitetura de integração. Neste capítulo são apresentados também os algoritmos de comando do sistema.

O quinto capítulo, Projeto do sistema de lavagem descreve o cálculo da perda de carga do sistema de lavagem com o objetivo de selecionar a bomba de água adequada. No final deste capítulo é realizado um estudo comparativo entre o sistema de lavagem atualmente utilizado e o sistema de lavagem proposto.

Por fim, o sexto capítulo Conclusões e trabalho futuro, apresenta as principais conclusões e os passos futuros a realizar.

Página deixada propositadamente em branco

Capítulo 2 - Estado da arte

No presente capítulo serão estudadas as tecnologias atualmente empregues nas lavagens de tanques de armazenamento de produtos alimentares, com o objetivo de fundamentar as escolhas a efetuar no desenvolvimento do presente trabalho. Começa-se pela elaboração de um estudo acerca dos sistemas de lavagem, nomeadamente os métodos e os equipamentos mais utilizados nas lavagens. Posteriormente aborda-se a tecnologia dos pórticos automáticos que são utilizados para deslocar equipamentos em unidades industriais, usualmente denominados *gantry robot*. Finalmente, tendo em conta a segurança dos operadores, realizou-se um estudo sobre as normativas homem-máquina relacionadas com este tipo de sistemas automáticos.

2.1 Sistemas de lavagens

A limpeza de um tanque é uma tarefa difícil que deve ser realizada apenas por pessoas qualificadas (Osmjorkin, 2015). As organizações têm a necessidade de otimizar os processos de limpeza dos equipamentos de armazenamento ou transporte. Contudo, esta otimização deve ser realizada em segurança, sem colocar em causa a saúde dos profissionais, tendo em conta os produtos químicos que são utilizados durante a limpeza, e que serão estudados mais em detalhe na secção 5.1.

2.1.1 Métodos de limpeza

Os principais métodos de limpeza utilizados atualmente na indústria são os seguintes:

- Limpeza manual – Neste método a lavagem é realizada por um operador com recurso a esponjas ou a acessórios de limpeza equivalentes. Assim, é provável que o detergente entre em contato com a sua pele. Os detergentes utilizados são ligeiramente alcalinos, ligeiramente ácidos ou neutros e a temperatura é moderada.
- Limpeza em circulação – Neste método de aplicação, os detergentes em circulação são geralmente muito mais fortes e agressivos que os do método anterior (limpeza

manual). Na limpeza em circulação, a lavagem é efetuada num circuito fechado. Por esse motivo, podem ser utilizadas altas temperaturas. Contudo, os custos de instalação podem ser muito altos.

- Limpeza por imersão - Este é o sistema de limpeza menos eficiente, por gastar mais tempo e consumir mais recursos. Os componentes são limpos por imersão em tanques, com a introdução de um pequeno agitador ou linha de ar para fornecer agitação. Este método resulta em longos períodos de tempo para realizar a limpeza.
- Limpeza por jato - Este sistema é normalmente projetado para uma finalidade específica. A pressão de trabalho utilizada é normalmente bastante elevada.
- Limpeza de superfície vertical - Nesta técnica, a prática mais comum é a injeção da espuma/gel na limpeza, que é aplicada à superfície a ser limpa por meio de injetores (em inglês: *nozzle 's*) especialmente projetados.

Existem duas abordagens possíveis no método de “limpeza em circulação”: a limpeza fora do local de utilização do tanque (*Clean Out of Place* - COP) e a limpeza no local (*Cleaning-In-Place* - CIP). O método de CIP reduz a possibilidade de contaminação cruzada, tornando-se, por isso, muito higiênico, sendo comum em quase todas as empresas de produção de laticínios, bebidas e alimentos processados (Severino, 2020). Contudo, em muitos casos as empresas ainda recorrem à prática de “limpeza manual” para efetuar a lavagem de tanques. Esta realidade levanta dois potenciais problemas: os riscos para saúde dos operadores e a utilização de soluções químicas pouco adequadas (com menos concentração), quando comparadas às soluções num sistema CIP (Forni, 2007). A limpeza automatizada tem ganho cada vez mais expressão na indústria moderna, com a grande vantagem de eliminar os problemas associados ao erro humano durante a operação.

Segundo Tamine, 2009, o processo de limpeza de um tanque é realizado essencialmente por 6 etapas, podendo algumas delas repetirem-se de acordo com o produto a lavar e o tipo de resíduo:

- Remoção de detritos grosseiros - Envolve a drenagem do produto do tanque a ser limpo, podendo ser realizada por gravidade, ou deslocamento do produto, podem também serem utilizados outros meios como ar comprimido, água ou outros.

- Pré-lavagem – Os objetivos da pré-lavagem passam por reduzir o consumo total de água e utilizar energia na forma de calor. Nesta fase é bastante importante controlar o volume de água utilizado, por isso, pode ser controlada por meio de um cronómetro.
- Circulação de detergente – É nesta fase que ocorre a principal limpeza, resultando na remoção da sujidade da superfície do tanque. O tempo despendido nesta fase é definido de forma experimental e tendo em conta o nível de experiência dos operadores, podendo variar entre 15 minutos e 1 hora.
- Lavagem intermédia - A lavagem intermédia serve para remover todos os vestígios de detergente e sujidade que se encontra suspensa nas paredes do tanque. Nesta etapa da lavagem deve ser utilizada água potável, normalmente fria.
- Desinfecção – O ciclo de desinfecção é geralmente realizado a frio e muitas vezes uma solução de hipoclorito de sódio ou ácido peracético. Também é possível usar água quente na fase de desinfecção em vez de um agente químico. Contudo, isso requer elevada energia térmica, o que pode tornar-se caro.
- Lavagem final - A lavagem final deve ser feita com água potável fria. A qualidade desta a água é crítica, pois pode levar à contaminação do tanque e deterioração do produto lá armazenado.

2.1.2 Equipamentos de limpeza

Existem três tipos diferentes de equipamentos de limpeza normalmente utilizados para a limpeza do interior de tanques (Figura 2):

- a) Bolas de lavagem fixa
- b) Bolas de lavagem rotativas
- c) Cabeças de lavagem rotativas

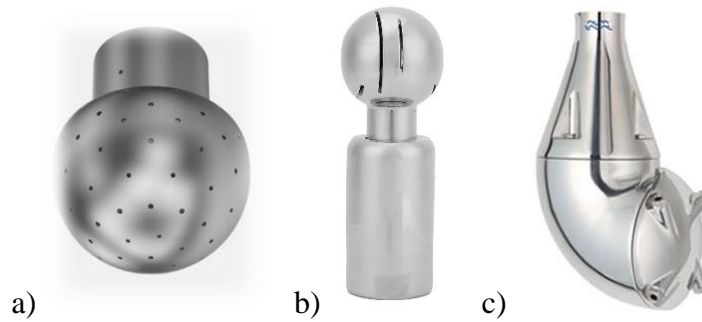


Figura 2 – Sistemas de limpeza: a) bola de lavagem fixas; b) bola de lavagem rotativas; c) cabeça de lavagem rotativa

A Figura 3 apresenta a comparação dos parâmetros de tempo, temperatura, recursos (água e detergente) e força de impacto referente às lavagens com as três soluções. Analisando a Figura 3 é possível verificar que a bola de lavagem fixa consome mais tempo de lavagem, mais detergente e mais água, sem que isso se traduza num impacto superior do jato de água nas paredes dos tanques. Em contraste, encontram-se a solução com a cabeça de lavagem rotativas que requerem um menor tempo de lavagem e menos água e detergentes para obter uma limpeza mais efetiva. Na Figura 4 pode-se observar o padrão obtido pela projeção dos jatos nas paredes do tanque com as três soluções.

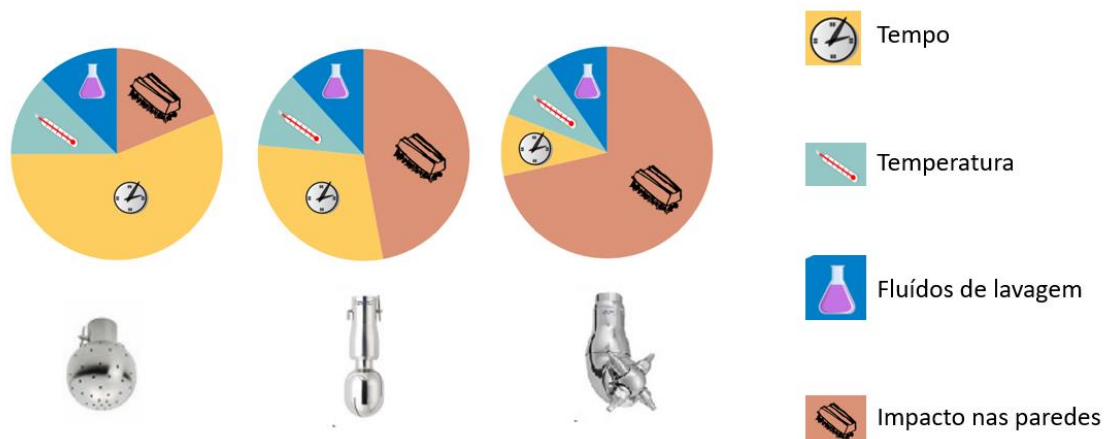


Figura 3 – Comparação dos parâmetros de tempo, temperatura, recursos (água e detergente) e força de impacto das 3 soluções disponíveis para a lavagem dos tanques de armazenamento. Fonte: Laval, 2021, adaptado.

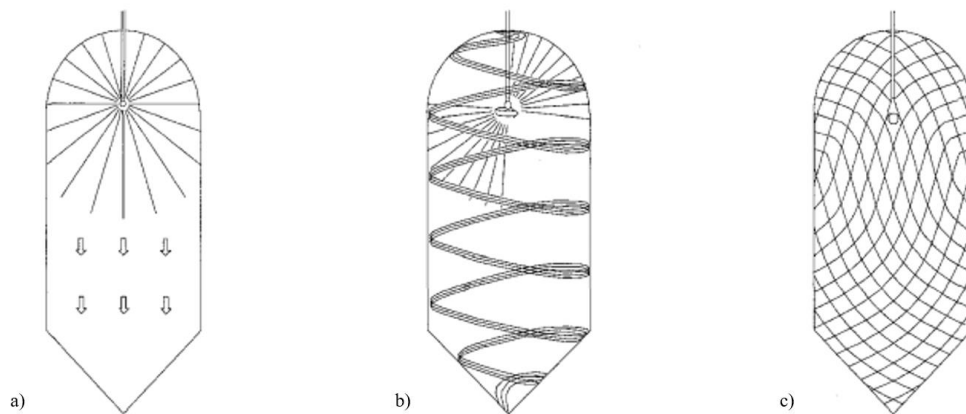


Figura 4 – Padrão dos jatos nas paredes dos tanques a serem lavados através das três soluções:
 a) bola fixa, b) bola rotativa e c) cabeça de lavagem rotativa Fonte: Laval, 2021

A forma mais comum de efetuar a lavagem de tanques utiliza uma bola de lavagem fixa (Figura 2a), com grandes caudais de água a baixa pressão. Neste caso, o objetivo passa por garantir que o fluido de lavagem passa por toda superfície do tanque. Isso implica que a maior parte da limpeza ocorre pelo facto de o fluido de lavagem escorrer, por gravidade, pelas superfícies do tanque. Neste processo é também possível controlar o caudal, a temperatura e o tipo de detergente, a fim de atingir um melhor resultado da lavagem. No caso das bolas de lavagem fixas, a água embate nas paredes dos tanques com um padrão pré-definido, isto é, o fluido é disperso continuamente através de cada furo da bola, que se encontra fixa a uma estrutura de suporte. Isto resulta num grande consumo de água e num elevado tempo de lavagem. No tanque de armazenamento, os pontos de impacto dos jatos também são fixos. Após o impacto, o escoamento transforma-se em cascatas de fluido de lavagem que descem pelas paredes do tanque. As cascatas geram uma tensão de corte na superfície das paredes internas do tanque com um padrão irregular. A tensão de corte do escoamento da cascata na parede do tanque é cerca de 1 a 5 Pa (Technologies, 2021). Assim, tanto o tempo, o detergente, e a temperatura são os fatores que determinam quando o tanque está lavado.

No caso das bolas de lavagem rotativas, existe um padrão tipo ‘faixa’ que varre as paredes dos tanques a serem lavados. Com esta solução é possível gastar menos recursos do que com a bola fixa, nomeadamente água e detergentes (Figura 5).



Figura 5 – Projeção da água com uma bola de lavagem rotativa

Ao contrário das bolas de lavagem fixas, as bolas de lavagem rotativas são um dispositivo de limpeza dinâmico. Neste caso, as forças geradas pelo escoamento do líquido de lavagem que atravessa o dispositivo dão origem a um movimento de rotação de 360° em torno de 2 eixos, permitindo que o fluido atinja as superfícies do tanque em vários pontos, com o padrão ilustrado na Figura 4c). As bolas de lavagem rotativas projetam a água com grande impacto (Figura 6) para remover os resíduos e permitem uma redução dos recursos necessários para obter os resultados de lavagem desejados, quando comparadas com as bolas de lavagem estáticas (Technologies, 2021).



Figura 6 – Cabeça de lavagem rotativa

Das três tecnologias de cabeças de lavagem apresentadas, a cabeça rotativa é a mais eficaz, pois proporciona uma maior força de impacto e, por consequência, uma maior tensão de corte na superfície das paredes do tanque (Technologies, 2021).

A cabeça de lavagem rotativa pode ter entre um e quatro nozzle's, projetando o fluido de lavagem com um jato bem definido. As cabeças de lavagem rotativas giram a uma velocidade predefinida, de acordo com um caudal e pressão de operação, para fornecer um padrão de lavagem em toda a superfície do tanque. Isso garante que toda a superfície

do tanque será sujeita ao impacto do jato num dado período de tempo, completando um ciclo de lavagem. A força de impacto e a dispersão que esta produz criam uma área de lavagem muito maior, quando comparadas com as restantes soluções, assim como uma tensão de corte mais elevada. A pressão do impacto provocado pelo jato ao embater na superfície do tanque é de, aproximadamente, 104 Pa e, a cerca de 150 mm do centro de impacto, diminui para cerca de 7,5 Pa (Figura 7). Esta tensão de corte superficial provocada pelas cascatas de fluido de lavagem são significativamente superiores aos valores de 1 e 5 Pa existentes na lavagem com as bolas de lavagem fixas (Technologies, 2021).

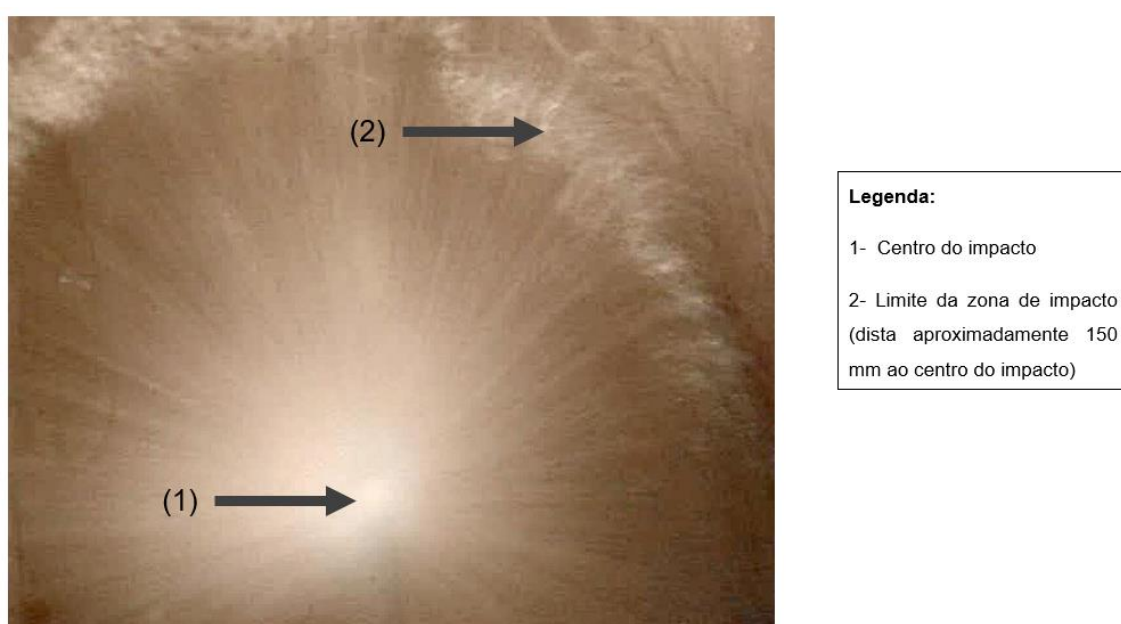


Figura 7 –Efeito do jato na parede: 1) centro do impacto; 2) limite da zona de impacto

Esta análise permite concluir que a utilização de uma bola de lavagem fixa requer um grande volume de fluido de lavagem, causando um impacto significativo nos custos. Além disso, dado o seu modo de funcionamento, este método torna-se inadequado para a limpeza de tanques utilizados para produtos com alta viscosidade (Laval, 2021).

Genericamente, o efeito de limpeza mais eficaz resulta da ação do impacto causado por um jato. Este efeito é multiplicado à medida que os jatos projetados pela cabeça de lavagem vão sendo aplicados na superfície do tanque (Figura 8).

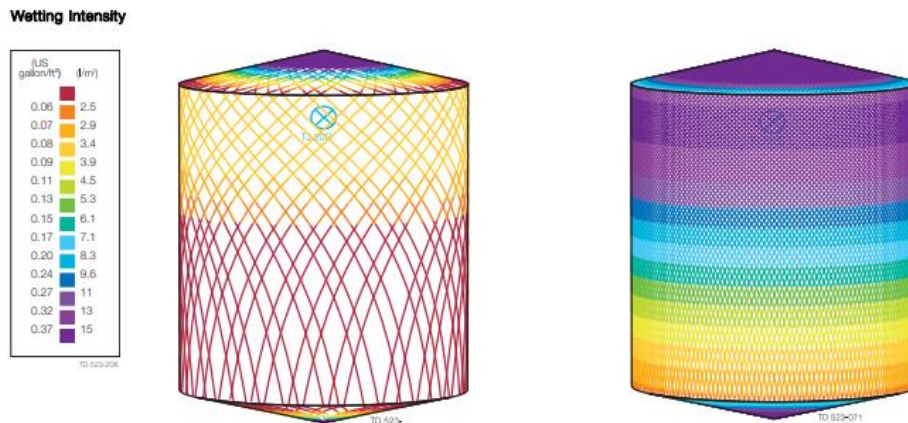


Figura 8 – Zona de passagem do jato de água proveniente de uma cabeça de lavagem. Fonte: *Cleaning*, 2021

2.1.3 Estudo sobre a eficiência de lavagem com diferentes elementos terminais.

O estudo de um caso real (Sneard, 2015) realizado sobre uma cervejeira em Manchester relata que, dado o aumento das vendas, houve a necessidade de aumentar a capacidade de produção, tendo sido adquiridos tanques maiores para esse fim. Estes novos tanques tinham um diâmetro de cerca de 3,5 metros. O principal responsável da cervejeira chegou à conclusão de que os tanques eram demasiado grandes para serem lavados através das tradicionais bolas de lavagem fixas, tendo sido os fabricantes dos tanques a recomendar uma limpeza através de um cabeça de lavagem rotativa. Alguns meses depois de se iniciar as lavagens com recurso à nova solução, os tanques foram inspecionados e verificou-se que apresentavam uma superfície brilhante e semelhante aos novos. O ciclo de lavagem durava cerca de 40 min e consistia numa pré-lavagem com água fria, seguida de uma fase cáustica de 2% e uma pós-lavagem com ácido peracético diluído. Neste estudo foi comparado o consumo de água obtido com os dois elementos terminais de lavagem: bola fixa e cabeça de lavagem rotativa. No seu modo de funcionamento, as bolas de lavagem fixas projetam água sobre as paredes do tanque com elevada velocidade, inundando o seu interior, enquanto as cabeças rotativas são acionadas por engrenagens, levando a que operem com baixas velocidades e limpem as superfícies através do impacto da água. A alteração do modo de operação para uma cabeça de lavagem rotativa levou a uma redução no consumo de água em cerca de 30%, levando a uma redução dos custos associados.

De forma a sustentar o estudo referido anteriormente, a empresa em questão ilustrou (Figura 9) numa conferência o resultado da simulação de uma lavagem do mesmo tanque

através de três tipos de elementos terminais: bolas de lavagem fixas, bolas de lavagem rotativas e cabeça de lavagem rotativa (Laval, 2021). Analisando a Figura 9 é possível visualizar que no tanque à esquerda, lavado com uma bola fixa, foram utilizados mais recursos e um tempo de lavagem superior. Em oposição, no tanque lavado com a cabeça de lavagem rotativa (direita) foram gastos menos recursos e foi necessário um menor tempo de operação, para garantir a mesma qualidade de lavagem.

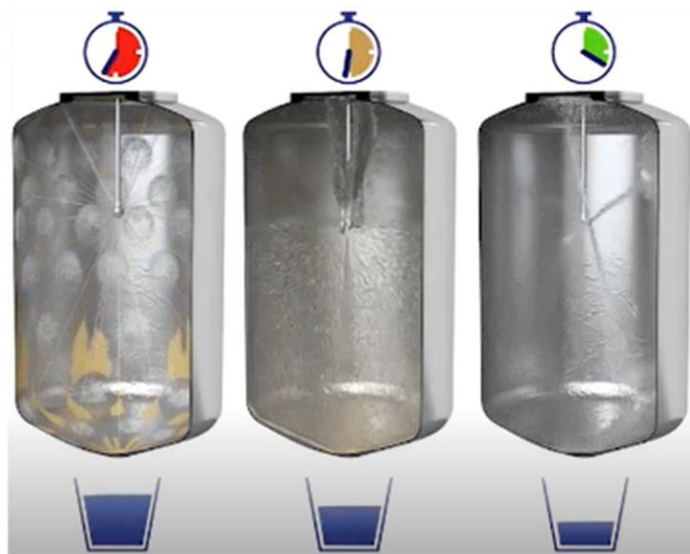


Figura 9 – Simulação comparativa dos três tipos de elementos terminais de lavagem: cabeça fixa (esquerda), cabeça rotativa (centro) e cabeça de lavagem rotativa (direita).

Fonte: Laval, 2021

No caso de uma cabeça de lavagem rotativa, o jato projetado cria um padrão na parede do tanque (Figura 4). Durante a rotação da cabeça de lavagem rotativa, as linhas do padrão aproximam-se, ou seja, no primeiro ciclo o jato traça um padrão na superfície do tanque e os ciclos seguintes tornam esse padrão gradualmente mais denso até que o padrão inicial volta a ser atingindo (Hansen & Manager, 2003).

Nesta abordagem, a água proveniente de cada jato da cabeça rotativa escorre ao longo da superfície das paredes do interior do tanque, tal como acontece com as soluções de bola fixa ou rotativa. Contudo, como a força de impacto obtida com uma cabeça de lavagem rotativa é significativamente mais elevada (tal como verificado na secção 2.1.2), assim é possível alcançar uma poupança nos recursos necessários: tempo de operação e consumo dos fluidos de lavagem (água e detergente) e de energia.

Segundo o estudo da Technologies, 2021 o aumento da força de impacto é o parâmetro mais importante para se obter uma lavagem mais eficiente. Neste estudo também se conclui que a lavagem com uma força de impacto mais elevada permite garantir a mesma qualidade, quando a água está a uma temperatura mais baixa. Assim, quando se utiliza uma cabeça de lavagem rotativa é possível reduzir o tempo necessário para a limpeza do tanque, a quantidade de detergentes de limpeza e a energia consumida, uma vez que os fluidos de lavagem não necessitam de ser aquecidos a temperaturas elevadas.

Um outro estudo retrata a realidade de um dos maiores produtores de queijo do Reino Unido, em que o leite é armazenado em seis tanques com capacidade de 160 000 litros que são limpos diariamente (Gloucester, 2004). A rotina de lavagem envolve uma pré-lavagem com água, uma lavagem com água quente com uma solução cáustica a 1%, uma lavagem intermédia com esterilizante e, por fim, uma lavagem final com água. Globalmente são consumidos neste processo 400 000 litros de água diários. Dado que o processo de lavagem foi originalmente implementado para a utilização de bolas de lavagem fixas (Figura 2a), com o passar dos anos houve a necessidade de reduzir os desperdícios e aumentar a eficiência do processo. Nesse sentido, começou-se por analisar os resultados na lavagem de um dos tanques com a troca de uma bola de lavagem fixa por uma rotativa (Figura 5). O sucesso da lavagem foi de tal forma alcançado que a organização rapidamente instalou o mesmo equipamento nos restantes cinco tanques. Esta substituição traduziu-se numa redução do tempo de operação de 43 para 28 minutos e de 30% no consumo de água. Esta organização relata um aumento de eficiência no processo de limpeza dos tanques de leite cru de 35% (Gloucester, 2004).

Com o objetivo de quantificar a poupança de recursos de lavagem (água e detergentes), assim como financeiros, a Alfa Laval realizou um estudo comparativo, considerando a utilização de uma bola fixa e uma cabeça rotativa, aplicadas à lavagem de um tanque de fermentação de uma cervejeira (Joseph Holt Brewery), cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do processo de lavagem do tanque de fermentação.

Nome do projeto	BreweryFermenterCleaning
Produto	Malte
Tipo de tanque	Fermentação
Complexidade de lavagem	Muito difícil
Lavagem por semana	1
Lavagens por ano	52

Uma vez que a empresa utilizava tradicionalmente as bolas de lavagem fixas foi possível avaliar as diferenças decorrentes da alteração para a cabeça de lavagem rotativa. Os dados comparativos dos recursos e custos utilizados anualmente para ambas as soluções estão ilustradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Procedimentos e custos associados ao processo de lavagem

	Bola de lavagem fixa		Cabeça de lavagem rotativa	
	Volume utilizado (m ³ /ano)	Custo (€/ano)	Volume utilizado (m ³ /ano)	Custo (€/ano)
Água	676	2704	137,28	547,56
Soda cáustica	162,24	811,2	54,6	274,04
Ácido	162,24	811,2	54,6	274,04
Desinfetante	108,16	540,8	54,6	274,04
Total	1108,64	4867,2	301,08	1369,68

Analisando os dados da Tabela 2 foi possível determinar a percentagem de poupança dos recursos utilizados, nomeadamente de água, soda cáustica, ácido e desinfetante, que se detalham na Tabela 3.

Tabela 3 – Percentagem de poupança de recursos

	Poupança (%)
Água	20,3
Soda cáustica	33,7
Ácido	33,7
Desinfetante	50,5
Total	27,2

Os dados acima ilustrados (Tabela 3) corroboram os dados do fabricante (Alfa Laval), assim como os estudos anteriormente apresentados, que indicam uma redução nos consumos em cerca de 30% quando comparados os elementos terminais (bola de lavagem fixa e cabeça de lavagem rotativa).

Como forma de sustentar as diferenças significativas que existem no consumo de recursos, a Joseph Holt Brewery realizou um estudo (Technologies, 2021) onde foi comparado o consumo de água e o tempo despendido na lavagem. Na Tabela 4 é possível observar o resultado do estudo comparativo entre uma bola fixa e uma cabeça rotativa.

Tabela 4 – Estudo comparativo entre uma bola fixa e uma cabeça rotativa. Fonte: (Technologies, 2021) adaptado

Elemento terminal de lavagem	Consumo de água	Tempo de lavagem
Bola fixa	11m ³ /Lavagem	33 minutos
Cabeça rotativa	3,5m ³ /Lavagem	23 minutos

Por observação da Tabela 4, verifica-se que a cabeça de lavagem rotativa efetua uma lavagem em menos 10 minutos quando comparada com uma bola de lavagem fixa. No estudo descrito na secção 2.1.2, concluiu-se que a cabeça de lavagem funciona com um caudal inferior quando comparado com uma cabeça de lavagem fixa. A junção destes dois fatores fez com que, para o caso de estudo (Technologies, 2021), seja possível concluir que existe uma redução dos recursos utilizados (consumo de água) em cerca de 30%.

Além dos resultados descritos, existem atualmente recomendações e normas, que são resultado direto da partilha de experiência entre os utilizadores dos equipamentos e também do suporte de organizações. Nomeadamente a EN 1672-2 (Standard, 2021).. O Grupo Europeu de Engenharia e Design Higiênico (EHEDG), tem como objetivo a promoção da higiene durante o processo de fabricação de alimentos e bebidas. Nesse sentido, a EHEDG lançou uma publicação onde destacou a tecnologia de lavagem de tanques de armazenamento através de cabeças de lavagem rotativas como. “*uma alternativa otimizada para lavar os tanques de armazenamento*” (EHEDG, 2016).

Na indústria da produção de vinho, os métodos de limpeza de tanques mais comuns são a limpeza manual com máquinas portáteis de lavagem a alta pressão ou com recurso a bolas fixas. Esta limpeza só é eficaz se o jato de água for projetado com precisão sobre toda a superfície do tanque e com uma distância muito curta, sob pena de perder a eficácia. Além disso, uma limpeza manual acarreta outros problemas, como a segurança dos operadores, aumento dos recursos utilizados e a perda de eficácia da lavagem.

Como referido anteriormente, a utilização de cabeças de lavagem rotativas é uma alternativa que permite a lavagem do tanque. A evolução dos elementos terminais de lavagem, surgem no sentido de garantir uma lavagem com mais qualidade e menos impacto para o meio Ambiente (Technologies, 2021). Devido a às vantagens apresentadas, neste trabalho propõe-se a utilização de uma cabeça de lavagem rotativa no projeto do sistema de lavagem de tanques de produtos alimentares.

2.2 Sistemas robóticos de manipulação

Atualmente, devido ao elevado nível de exigência que se vive nas organizações torna-se importante ser mais rápido, cometer menos erros e diminuir os desperdícios. O cumprimento destes fatores por uma unidade fabril promove o aumento da qualidade e, conseqüentemente, maiores lucros.

Nesse sentido, as áreas de produção utilizam cada vez mais sistemas robóticos para atingir as metas descritas. Os robots são máquinas que não tem emoções nem preconceitos ou outras características que podem estar presentes em algumas decisões tomadas por seres humanos (Rombão, 2019).

É incontornável, no estudo da robótica, deparamo-nos com a origem da palavra robot, introduzida pelo escritor Karel Capek, que usou a palavra numa peça teatral (Ribeiro, 2014). O primeiro robot industrial foi utilizado em 1961 numa fábrica da General Motors nos Estados Unidos, tratando-se de um manipulador robótico da Unimate, com semelhanças a um braço humano, para realizar tarefas de soldadura nos chassis dos automóveis na linha de montagem. Desde essa altura têm vindo a ser desenvolvidos robots, com diferentes configuração e aplicações. Os robôs possuem a capacidade de realizar tarefas de forma autónoma ou em cooperação com outros sistemas automáticos e com humanos (Ribeiro, 2014).

Pela sua definição, um sistema robótico é composto por um robot industrial, o seu controlador e outros componentes como ferramentas, eixos auxiliares externos e sensores que apoiam o robot na execução das suas tarefas (ISO 10218-1, 2006).

2.2.1 Componentes de um manipulador robótico

Tipicamente um robot manipulador é constituído essencialmente por elos e juntas. Os elos são os elementos que oferecem robustez e rigidez ao sistema e, a sua configuração determina o alcance do manipulador (Romano, 2002). Na constituição dos manipuladores existem também as juntas, os dispositivos que proporcionam mobilidade entre os elos, podendo ser denominadas também por eixos. Geralmente os movimentos das juntas de um robot são lineares (prismáticas ou deslizantes) ou rotativas, existem alguns braços robóticos que possuem juntas do tipo bola-e-encaixe (Rosário, 2005). Na extremidade do último elo é colocado um elemento terminal com a capacidade de executar a tarefa que

se pretende automatizar com o robot. A tipologia das juntas define a configuração do espaço de trabalho. Dentro desse volume, o robot terá a capacidade de manipular o elemento terminal com um determinado número de graus de liberdade. Quando não existem juntas redundantes, o número de juntas equivale ao número de graus de liberdade.

Essencial à operação de um robot industrial é a unidade de controlo que tem como objetivo monitorizar os parâmetros operacionais que são requeridos durante a realização de uma tarefa. Esta envia sinais elétricos à unidade de potência (drives), através de um protocolo de comunicação. A unidade de potência é o componente responsável por fornecer potência aos atuadores.

Tipicamente, os atuadores de um robot industrial são motores elétricos que têm como finalidade converter a energia elétrica em potência mecânica. A potência mecânica gerada pelos atuadores é enviada na forma de movimento aos elos dos robots através de sistemas de transmissão (Romano, 2002).

Os sensores permitem perceber o ambiente envolvente e dar informações ao controlador. Existem vários tipos de sensores, desde os de proximidade, posição, velocidade, força, pressão, entre outros. Os encoders são dispositivos eletromecânicos usados para servo posicionamento. São estes que fornecem os dados de posição para o controlo de acionamento dos motores. Um encoder típico usa sensores óticos para fornecer uma série de pulsos enquanto a junta se move, que são utilizados para determinar a posição ou a direção do movimento (B. Q. de F. Oliveira et al., 2017). É também comum usar-se sensores de proximidade em robots para verificar a existência ou ausência de objetos, evitando embates que podem ser nocivos à estrutura.

Todos estes componentes (elos, atuadores, transmissões, sensores, controlador, etc.) a funcionar em conjunto permitem ter um sistema robótico a desempenhar uma determinada tarefa. No caso do presente trabalho, trata-se de posicionar uma cabeça de lavagem no interior de um tanque de armazenamento de vinho e executar a sua lavagem.

2.2.2 Robots de configuração cartesiana – *gantry robots*





Nas últimas décadas o desenvolvimento da robótica produziu robots com diversas configurações cinemáticas, permitindo a definição de diferentes espaços de trabalho e constrangimentos de mobilidade. Os manipuladores robóticos são utilizados quando se

pretende utilizar uma ferramenta (garra, parafusadora, ponteira de soldadura, etc.) em regiões do espaço que estejam cobertas pelo espaço de trabalho do próprio robot, o qual é determinado pela dimensão do manipulador e das juntas que o compõem (Pérez et al., 2016). Exemplos da aplicabilidade destes robots na área industrial incluem o empacotamento de medicamentos, sistemas de automação no manuseamento de produtos na indústria alimentar e automatização de linhas de produção no ramo automóvel (Miguel & Tavares, 2015).

Para uma maior flexibilidade, os robots manipuladores móveis permitem que os elementos que o constituem se movam livremente no espaço, através de um sistema de locomoção (Pedersen et al., 2016). No entanto, estes robots requerem a implementação de sistemas de localização e de navegação em espaços complexos, para além do planeamento de movimento do braço manipulador.

No contexto deste trabalho, pretende-se projetar um sistema robótico para efetuar lavagens de tanques de produtos alimentares de forma autónoma, evitando a intervenção humana no processo. Uma vez que os tanques de armazenamento estão fixos ao chão e dispostos em filas, com 2 graus de liberdade é possível posicionar o elemento terminal com 2 juntas de translação perpendiculares entre si (1 junta horizontal e 1 junta vertical). Assim, para atingir estes objetivos, entende-se que o desenvolvimento de um robot com a configuração cartesiana, usualmente denominado por *gantry robot*, é a solução mais adequada. A denominação, *gantry*, é uma classificação relativa à estrutura do robot, referindo-se a um pórtico com capacidade de movimentar alguns equipamentos como câmaras, garras, sensores, entre outros num espaço de trabalho cartesiano. Na Tabela 5 está ilustrado um estudo comparativo de diferentes configurações de *gantry robots*, apresentando as vantagens e desvantagens de cada um, cuja análise será útil na definição do sistema a adotar no projeto do sistema de lavagem de tanques a desenvolver.

Tabela 5 – Estudo comparativo de diferentes configurações de gantry robots

Tipo de Pórtico	Exemplar	Vantagens e Desvantagens
Dois eixos assentes em pilares		<p><u>Vantagens</u></p> <p>Peso distribuído de forma mais uniforme Possibilidade de juntas com maior dimensão Menor custo</p> <p><u>Desvantagens</u></p> <p>Ocupação do espaço Maior poluição visual</p>
Dois eixos no chão		<p><u>Vantagens</u></p> <p>Peso distribuído de forma mais uniforme Possibilidade de juntas com maior dimensão Maior poluição visual</p> <p><u>Desvantagens</u></p> <p>Sujidade nos carris Carris podem ser um obstáculo</p>
Um eixo no chão		<p><u>Vantagens</u></p> <p>Menos espaço ocupado Menor poluição visual</p> <p><u>Desvantagens</u></p> <p>Peso distribuído de forma menos uniforme Carris podem ser um obstáculo Sujidade nos carris</p>
Um eixo assente em pilares		<p><u>Vantagens</u></p> <p>Menos espaço ocupado Menor custo Menor poluição visual</p> <p><u>Desvantagens</u></p> <p>Peso distribuído de forma menos uniforme</p>

Foi feita uma análise acerca das práticas utilizadas nas empresas ligadas ao setor do fabrico de *gantry robots* (benchmarking). Assim, foi possível obter uma avaliação dos custos associados a cada uma das alternativas assim como as suas principais vantagens e desvantagens. Desde logo, foi possível descartar as opções “Um eixo no chão” e “Dois eixos no chão”, dado que o espaço onde o robot irá ser instalado é uma unidade fabril. Nesse sentido, prevê-se que, pelo facto de os carris se movimentarem no solo, possa existir a possibilidade de os carris acumularem sujidade. Uma vez atingidas quantidades elevadas de sujidade, esta poderá impedir o correto funcionamento do movimento do robot ao longo do carril.

No mercado de desenvolvimento de sistemas de coordenadas cartesianas a solução “Dois eixos assentes em pilares” é o modelo mais usual. Esta é uma vantagem, pois existe um sólido *know-how* sobre a construção destes sistemas, contudo, a solução “Um eixo assente

em pilares” também se trata de uma solução corrente. Dentro destas duas possíveis soluções aquela que criará menos poluição visual no local a instalar trata-se da solução: “*Um eixo assente em pilares*”. Por esse motivo, dado que a poluição visual se trata de um fator relevante para o responsável da herdade (secção 1.2), foi decidido avançar pela configuração “*Um eixo assente em pilares*”.

2.3 Normativas homem-máquina

Tal como referido anteriormente, a aplicação de robots no desempenho de operações industriais permite melhorar a eficiência e a flexibilidade na produção. Ainda que na sua generalidade os robots sejam considerados seguros, estes exigem uma avaliação de risco para garantir a segurança dos operadores (humanos) durante a sua utilização.

Nesse sentido, nos postos de trabalho onde é utilizado um robot que trabalha em simultâneo com mão de humana é importante analisar acerca da segurança do trabalho.

No que diz respeito às normas internacionais atualmente em vigor, estas encontram-se resumidas na norma EN ISO 10218 e ISO/TS 15066 (Silva et al., 2019) e fornecem padrões e orientações para a colaboração que terá de existir entre o operador e o robot. Algumas das linhas orientadoras com maior relevância para o caso de estudo serão evidenciadas ao longo do presente trabalho, nomeadamente as regras relativas à área de trabalho do robot. Estas regras são bastante claras no que respeita à presença de pessoas no espaço de trabalho: “antes de um operador entrar na área de trabalho do robot, este deve ser parado mesmo que esteja na funcionalidade de limitação de força” (ISO 10218-1, 2006). Assim é importante que a área de trabalho se encontre isolada, desimpedida e munida de sensores para o efeito acima referido. No caso prático em estudo deverá ser estabelecida uma área de trabalho bem definida onde se garante a segurança acima referida. Para dar início à operação do robot, os operadores devem primeiro retirar-se desse espaço protegido. A garantia de que o espaço está desocupado poderá, mais uma vez, ser obtida com recurso a sensores de segurança e/ou verificação adicional do operador (Stories et al., 2019).

Em Portugal, o Decreto-Lei (DL) nº 103/2008 vai de encontro às normas internacionais e estabelece as regras relativas à colocação no mercado de máquinas e respetivos acessórios. Neste DL são dadas instruções acerca da segurança de máquinas e feita uma

melhoria em relação à anterior legislação, definindo com maior precisão o âmbito e os conceitos relativos à sua aplicação.

O DL confere ao fabricante de uma máquina, ou ao seu mandatário, a função de assegurar que seja efetuada uma avaliação dos riscos a fim de determinar os requisitos de saúde e de segurança que se aplicam à máquina (Decreto-Lei n.º 103/2008 Do Ministério de Planeamento e Das Infraestruturas, 2008). Assim, devem ser identificados os perigos que podem ser originados pela máquina e as situações perigosas que lhes estão associadas, numa tentativa de mitigar essas situações. Nesse sentido, os sistemas de comando devem ser concebidos e fabricados por forma a evitar a ocorrência de situações perigosas (Decreto-Lei n.º 103/2008 Do Ministério de Planeamento e Das Infraestruturas, 2008).

Mais concretamente, o DL afirma que é importante o operador poder, a partir do posto de comando, certificar-se da ausência de pessoas nas zonas perigosas. No caso de tal não ser possível deverá, antes do arranque da máquina, emitir um sinal de aviso, sonoro e/ou visual. As pessoas potencialmente expostas ao perigo devem ter tempo para abandonar a zona perigosa ou para interromper o arranque da máquina. Ainda neste DL é referido que o sistema deverá possuir um sistema de paragens de emergência (implementado por um ou vários dispositivos), que devem permitir evitar situações de perigo iminentes ou existentes.

Capítulo 3 - Projeto do sistema robotizado de lavagem de tanques de armazenamento de produtos alimentares

O presente capítulo é focado no projeto e dimensionamento do sistema robótico de lavagens dos tanques de armazenamento de produtos alimentares. Inicialmente, será apresentado o caso de estudo e feita uma análise das dimensões do espaço, com base nas plantas do armazém em análise, para se desenvolver o conceito do sistema robótico proposto no âmbito deste trabalho. Posteriormente, será estudado e selecionado o elemento terminal de lavagem a implementar no sistema e definida a sua posição de funcionamento, tendo em conta os constrangimentos geométricos relacionados com a dimensão dos tanques e do armazém. Por fim, será dimensionada a estrutura do *gantry robot* que é responsável pelo deslocamento do elemento terminal ao longo de uma fila de tanques de armazenamento e analisadas as cargas aplicadas à estrutura, incluindo as forças provenientes do escoamento.

3.1 Estudo do sistema automático de lavagem

Pretende-se projetar um sistema robótico para lavagem de tanques de produtos alimentares, adotando, como caso de estudo, o armazém da adega da Herdade da Malhadinha Nova, utilizado para guardar o vinho em produção. Para realizar o projeto do equipamento foi, inicialmente, realizado um estudo sobre os requisitos dimensionais e constrangimentos geométricos do espaço onde irá ser instalado.

Uma vez que o sistema a ser desenvolvido deverá ser integrado num armazém já existente na herdade, foi realizada uma visita ao local e solicitada uma planta do espaço (Figura 10). A localização atual dos tanques de armazenamento está assinalada com círculos no canto superior esquerdo. Neste trabalho optou-se por focar apenas a lavagem automática para uma das filas de tanques de armazenamento (estrutura colorida a vermelho sobreposta à planta). O sistema dimensionado servirá de protótipo para que, no futuro, o sistema possa ser replicado para as restantes filas de tanques existentes no armazém.

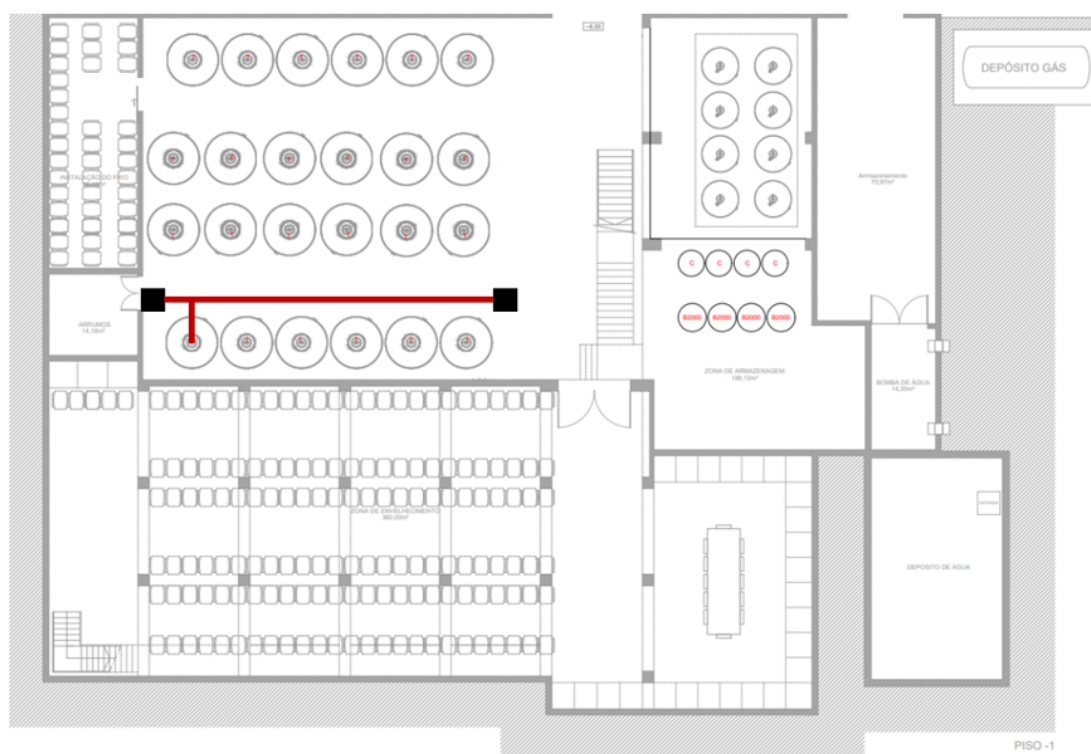


Figura 10 – Planta do armazém, localização dos tanques de armazenamento (círculos no canto superior esquerdo) e do sistema automático de lavagem (linha a vermelho)

3.2 Definição do conceito do sistema automático de lavagem

O projeto do sistema robótico de lavagem pretende trazer mais-valias à Herdade da Malhadinha Nova, tais como: eliminar os problemas de segurança dos operadores, reduzir os tempos de lavagem e aumentar a eficácia do processo (utilização de menos recursos), a competitividade e a sustentabilidade ambiental. Numa perspetiva tecnológica, a utilização de sistemas robóticos mais avançados aumenta valorização da empresa e pode criar oportunidades em novos mercados.

Essencialmente, o sistema robótico de lavagem é responsável por movimentar uma cabeça de lavagem, i.e., um componente que projeta, com alto impacto e em todas as direções, um ou mais jatos de água que contêm produtos de lavagem (água e detergente). A manipulação robotizada da cabeça de lavagem tem por objetivo inseri-la de forma automática no interior do tanque de armazenamento. Uma vez no interior, a cabeça de lavagem é acionada, realizando-se nessa altura a sua lavagem. O sistema robótico de lavagem que é preconizado para este efeito é essencialmente composto por dois módulos: (1) um *gantry robot*, responsável pelo movimento da cabeça de lavagem (2) no plano

horizontal e vertical, de modo a inseri-la no interior do tanque de armazenamento (Figura 11).

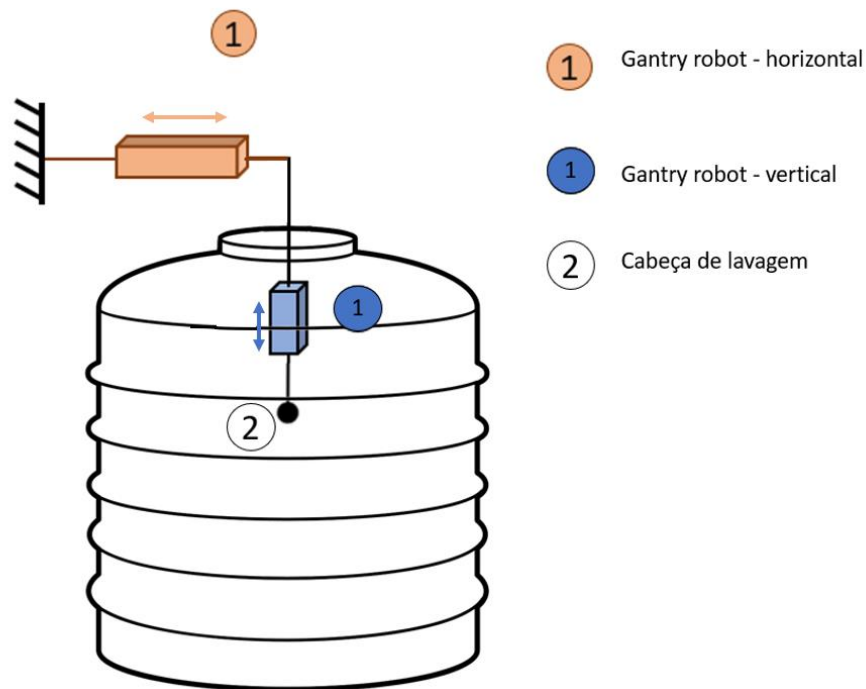


Figura 11 – Definição dos principais elementos do sistema robótico de lavagem

3.3 Cabeça de lavagem

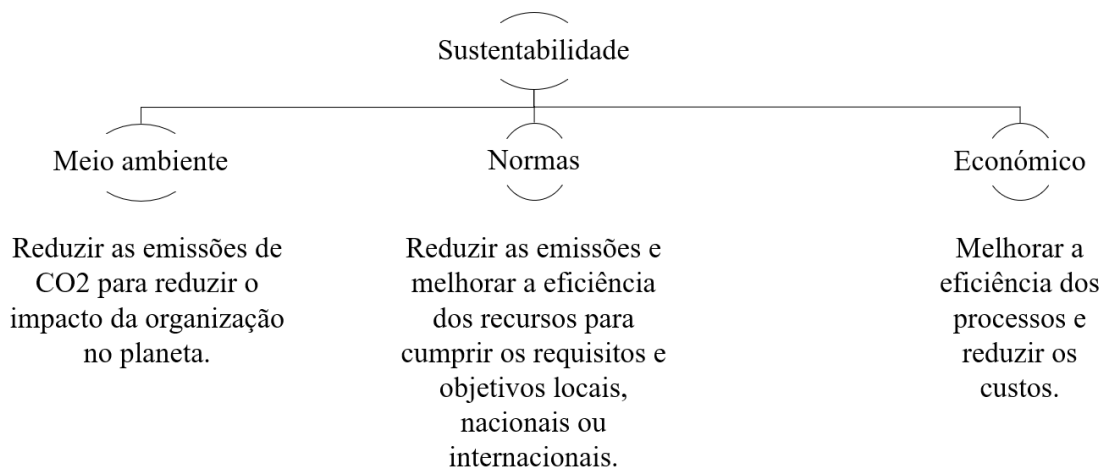
Na presente secção será selecionado um elemento terminal de lavagem para o sistema robótico. Nesse sentido, torna-se relevante fundamentar o conceito de sustentabilidade que irá servir de critério para a seleção do elemento terminal de lavagem. Atualmente, a sustentabilidade é uma questão muito importante para as organizações, tanto por razões financeiras como pelas ambientais e sociais (Mehlmann et al., 2015). A nível técnico, a forma de atingir esta mudança de paradigma é muitas vezes uma questão em aberto, podendo existir diferentes soluções. Para responder a esta questão é importante salientar que cada organização tem o seu modo de mudança. Nas empresas que efetuam lavagem de tanques, a evolução do elemento terminal de lavagem poderá constituir uma solução para o aumento da sustentabilidade.

Seguir um princípio de sustentabilidade não só permite proteger o meio ambiente, como também o próprio negócio. Quando uma empresa possui um projeto otimizado e sustentável é possível obter vantagens a nível ambiental, social e financeiro. A sustentabilidade empresarial (Claro & Claro, 2014) pode ser definida como um método

integrado de abordar uma ampla gama de negócios e projetos, tendo em conta as vantagens para: o ambiente, os trabalhadores, os consumidores, os fornecedores, a comunidade local, o governo, entre outros *stakeholders*, contudo, sem perder a sua competitividade no mercado.

Com objetivo de aumentar a sustentabilidade da Herdade da Malhadinha Nova é importante analisar as variáveis que podem afetar o desenvolvimento do conceito do sistema robótico de lavagem. A limpeza de um tanque é mais eficaz quando a água e os detergentes são projetados sobre a superfície a lavar com uma velocidade elevada, produzindo grande impacto. Além disso, também a temperatura e o tipo de detergente são fatores relevantes para a qualidade da lavagem como verificado na secção 2.1. Por essa razão, o processo de lavagem necessita de fornecer energia cinética e térmica à água e aos restantes produtos de lavagem. Normalmente, a pressão do fluido nas redes de limpeza de tanques é mais elevada do que a das redes de distribuição doméstica, sendo usadas bombas que elevam a pressão para os valores pretendidos. Durante a operação de bombagem, alguma da energia consumida pela bomba é perdida, sendo convertida em calor. A forma como as energias cinética e térmica dos fluídos de lavagem são produzidas podem afetar a sustentabilidade e por esse motivo devem ser estudadas.

Nas últimas décadas têm-se desenvolvido diferentes tecnologias de cabeças de lavagem, cabendo ao projetista a análise das diferentes soluções tecnológicas, de acordo com os critérios considerados relevantes. A qualidade, o tempo despendido e a eficiência (quantidade de recursos utilizados) de uma lavagem são fatores a ter em conta nas práticas diárias das organizações para se evitar o desperdício, no sentido que “a prática da melhoria nas organizações, nos dias atuais, é uma premissa para a manutenção da sua competitividade no mercado” (Gonzalez & Martins, 2000). A água é utilizada para processar, lavar e arrefecer diversas máquinas usadas na indústria alimentar, o que torna este setor e os produtos associados, um dos principais consumidores de água a nível mundial (Selborne, 2001). Como sugerido pelo diagrama da Figura 12, o conceito de sustentabilidade é implementado nas organizações com 3 objetivos principais.



*Figura 12 – Objetivos principais na implementação do conceito de sustentabilidade nas organizações
Laval, 2021*

O princípio da sustentabilidade torna-se bastante importante pois cada vez mais os clientes procuram produtos e serviços que apresentem a responsabilidade ambiental como um valor acrescentado. Segundo os estudos da empresa Alfa Laval, as alterações climáticas são um fator considerado na decisão final de cerca de 80% dos clientes finais (Laval, 2021). Por outro lado, é referido que 94% das maiores empresas do mundo fixaram objetivos relacionados com a sustentabilidade desde o ano de 2017 e 67% definiram objetivos explícitos como a redução das emissões de CO₂.

Em relação à lavagem dos tanques de armazenamento, as seguintes estratégias contribuem para melhorar a sustentabilidade do processo de limpeza:

- Limpeza mais rápida e com um menor custo;
- Redução do uso de água e detergentes;

No presente projeto, as estratégias para aumentar a sustentabilidade da herdade passam por reduzir o consumo de água e de detergente a utilizar em cada lavagem. A redução do consumo de água tem influência nos custos energéticos porque há menos necessidade de energia para aquecer a água na caldeira, uma vez que o volume de água para aquecer é menor. Assim, a redução do consumo de água de lavagem implica uma diminuição nos custos do investimento inicial do sistema de aquecimento e da energia consumida, além do impacto ambiental da operação.

Nos estudos apresentados na secção 2.1.2 foram evidenciados a poupança de recursos quando se substituiu as bolas de lavagem fixas por cabeça de lavagem rotativas. As cabeças de lavagem rotativas são um método mais recente e eficaz de lavagem que passa por projetar um volume menor (relativamente a tecnologias anteriores) de fluídos de lavagem a alta pressão sobre as superfícies (Laval, 2021). Este processo é realizado por um jato controlado e projetado por injetores (*nozzle's*) colocados numa cabeça de lavagem com um sistema de engrenagens que permite fazer a rotação dos injetores com diferentes graus de liberdade. O efeito de limpeza resulta do impacto físico do jato, em vez do enxaguamento causado pelo grande volume de líquido quando se utiliza uma bola de lavagem fixa. No caso da lavagem com recurso a uma cabeça de lavagem rotativa, o efeito de lavagem é obtido quando se garante que o jato tem impacto em praticamente toda a superfície do tanque a ser lavado. Quando é utilizado este método é, geralmente, requerido menos fluido de lavagem e produtos químicos. Além disso, a lavagem tende de ser mais rápida (Laval, 2021). Por este motivo, foi sugerida a utilização de uma cabeça de lavagem rotativa para efetuar a lavagem dos tanques de armazenamento de vinho da Herdade da Malhadinha Nova.

Os sistemas de cabeças de lavagem rotativas desenvolvidos recentemente permitem melhorar a eficiência do processo e, conseqüentemente, o custo do procedimento da lavagem dos tanques de armazenamento, quando comparados com as soluções mais antigas (Alfa Laval, 2021).

Nesta secção pretende-se selecionar um elemento terminal para o sistema de lavagem que permita otimizar o processo de lavagem e reduzir o tempo da operação. Nesse sentido, foi realizada uma análise ao mercado das cabeças de lavagem e selecionada a empresa Alfa Laval como fornecedor destes equipamentos. Esta empresa tem uma elevada presença na indústria e evidenciou profundo conhecimento sobre a utilização de cabeças de lavagem na indústria do vinho, azeite e indústria das tintas. Além disso, esta empresa apresenta uma elevada gama de cabeças de lavagem, disponibiliza informação completa e detalhada sobre cada um dos seus produtos e garante o fornecimento de peças de substituição num prazo curto, a partir de Espanha.

Após a consulta deste fornecedor foi elaborado um processo de seleção dos vários modelos da marca, tendo em conta que o objetivo é a lavagem de tanques de armazenamento de vinho. Nesta análise, também necessário averiguar a distância máxima

entre as paredes do tanque e a cabeça de lavagem. O estudo das dimensões do tanque de armazenamento, que se encontra na secção 3.4, permite concluir que distância máxima a percorrer pelos jatos é de 5 metros. Com estes dados, foi possível realizar uma pré-selecção dos modelos de cabeças de lavagem presentes na Tabela 6, onde se ilustram as principais características, tais como: pressão, caudal, peso, temperatura máxima de serviço e alcance.

Tabela 6 - Sistemas de cabeças de lavagem pré-selecionados para a fase seguinte de seleção.

Fornecedor	Modelo	Pressão Máxima (bar)	Caudal máximo (L/min)	Peso (Kg)	Temperatura máxima (C°)	Alcance (m)
Alfa Laval	Tankjet Gj4	21	1116,7	12,7	95	24,5
	Tankjet Gj8	28	507	6,5	95	19
	Multijet25	8	250	5,1	95	7,5

Seguindo o conceito de sustentabilidade e tendo em conta a redução dos recursos consumidos (energia, água e detergente) durante a lavagem dos tanques, procurou-se o modelo que exigisse a utilização de menor pressão e caudal e, ao mesmo tempo, garantisse um alcance superior a 5m. Assim, selecionou-se o modelo Multijet 25 (Figura 13), cujas especificações respondem aos requisitos acima descritos. No anexo I é apresentada detalhadamente a descrição técnica sobre a sua instalação, operação, segurança, manutenção, montagem e desmontagem, problemas comuns, kits de substituição, etc.



Figura 13 - Cabeça de lavagem da Alfa Laval Multijet 25

3.4 Características dos tanques de armazenamento e dos componentes do sistema de lavagem

Na presente secção pretende-se realizar um levantamento das características dimensionais dos tanques de armazenamento, assim como dos restantes componentes associados ao sistema robotizado, nomeadamente o dispositivo de lavagem. Dado que o dispositivo de lavagem terá (através de uma tampa) a função de impedir que os fluidos de lavagem sejam expelidos durante o processo de lavagem, foi definido o diâmetro da tampa, tendo em conta as características levantadas. Para melhor compreender o objetivo a que esta secção se propõe, torna-se relevante descrever o sistema de lavagem (Figura 14).

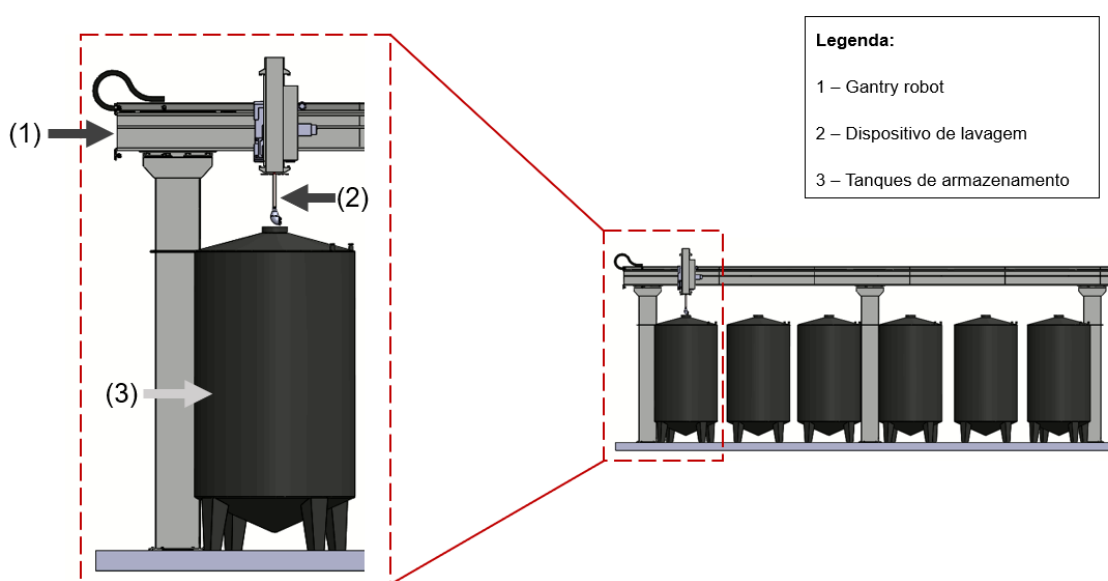


Figura 14 – Sistema de lavagem e descrição dos componentes

O sistema de lavagem é constituído pelo *gantry robot* (1) que desloca o dispositivo de lavagem (2) sobre os tanques de armazenamento (3) e os introduz no seu interior para os lavar (Figura 14).

As dimensões do sistema de lavagem estão fortemente condicionadas pelas dimensões dos tanques de armazenamento descritas na Figura 15, nomeadamente: (1) dimensões da câmara de expansão, (2) diâmetro de entrada e (3) diâmetro do tanque de armazenamento. A Figura 15 apresenta também as dimensões necessárias para o dimensionamento do pórtico (secção 3.8).

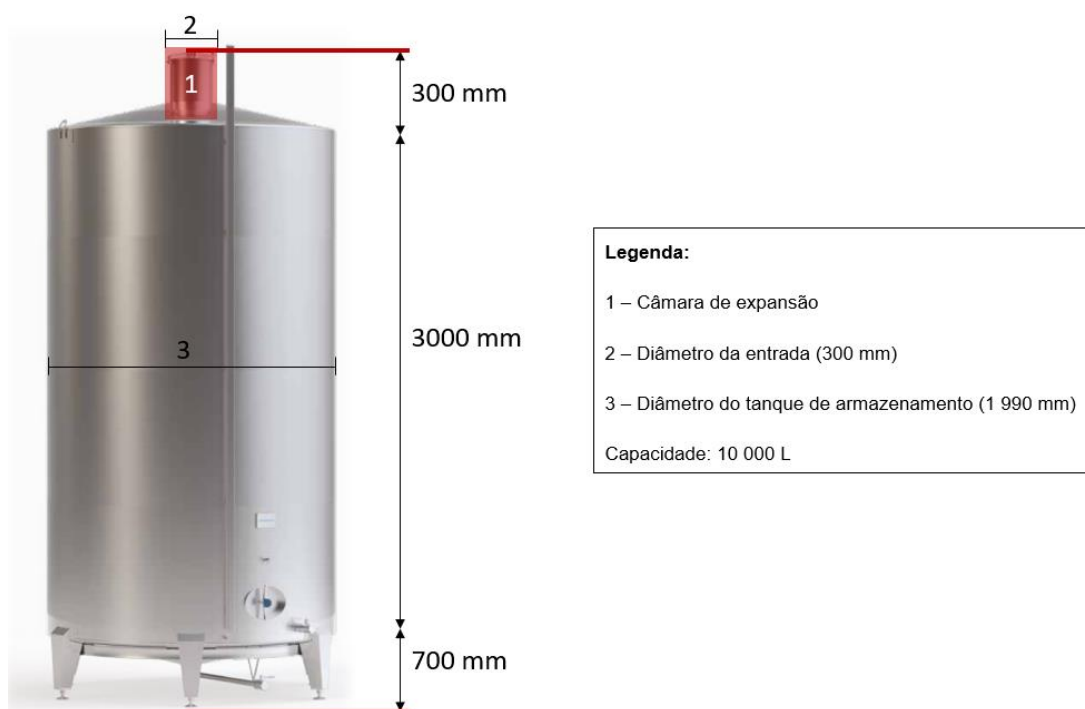


Figura 15 – Descrição dos fatores que comprometem o dimensionamento e especificações dos tanques de armazenamento. Fonte: Vieira, 2020, adaptado.

Tabela 7 - Dimensões do tanque de armazenamento

	Dimensão (mm)
Diâmetro do tanque de armazenamento (3)	1 990
Diâmetro da entrada (2)	300
Altura da câmara de expansão	300

Além do levantamento das dimensões dos tanques de armazenamento (Tabela 7), nesta secção foi realizado um levantamento dos componentes do sistema de lavagem. Assim, foram analisadas as dimensões da cabeça de lavagem com o objetivo de validar a capacidade de entrar no tanque sem risco de colisão com a entrada do mesmo. Posteriormente na secção 3.5, as dimensões da cabeça de lavagem serão utilizadas novamente com o objetivo de definir o curso do eixo Y do sistema de lavagem, que será necessário para a introduzir dentro do tanque.

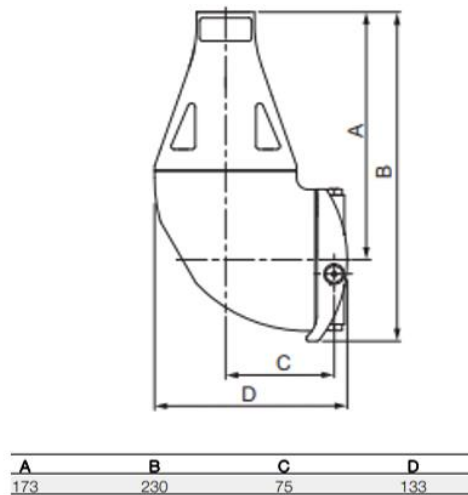


Figura 16 – Dimensões da cabeça de lavagem alfa Laval multijet 25

Por observação do catálogo do fabricante (Figura 16) foi possível concluir que a cabeça de lavagem rotativa possui 133 mm de largura (D) e 230 mm de altura (B). Uma vez que o diâmetro da entrada dos tanques é de 300 mm, é possível concluir que não haverá risco de colisão durante a entrada da cabeça de lavagem nos tanques de armazenamento.

O dispositivo de lavagem a ser movimentado pelo *gantry robot* é constituído por vários componentes: uma tampa (1) para evitar a fuga de líquidos para o exterior do tanque durante a lavagem; um tubo para posicionamento da cabeça de lavagem (2) e a cabeça de lavagem (3). O tubo de posicionamento tem como objetivo posicionar a cabeça numa cota abaixo da entrada do tanque, por forma a que os jatos colidam com todas as superfícies do tanque. O comprimento deste tubo tem em conta a configuração do tanque, a qual determina que a cabeça de lavagem não pode ser posicionada imediatamente abaixo da entrada do tanque, mas sim abaixo da câmara de expansão (Figura 15). Por fim, o último componente do sistema, a cabeça de lavagem, responsável pela ejeção de jatos que efetuam a lavagem do tanque (Figura 17).

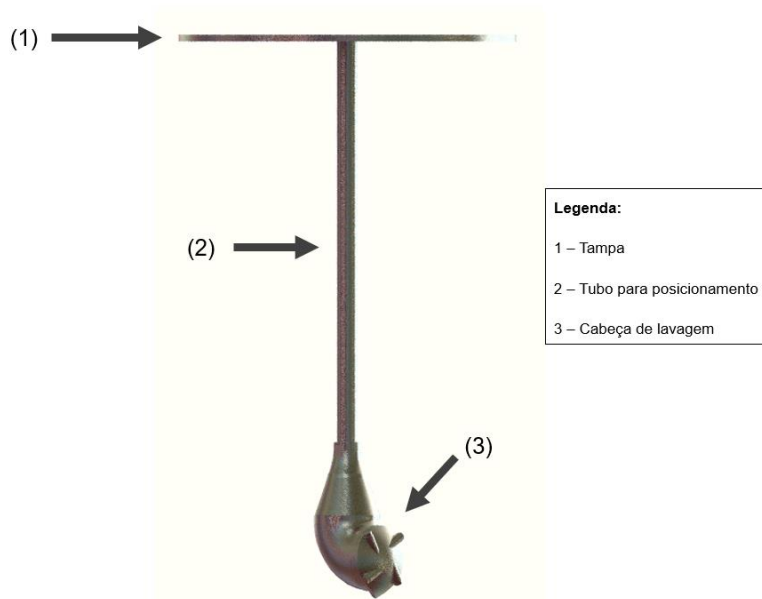


Figura 17 – Componentes do dispositivo de lavagem

Como referido anteriormente, o dispositivo de lavagem deverá conter uma tampa que vedará o compartimento e impedirá a saída dos fluidos de lavagem do tanque durante o processo de lavagem. Para dimensionar este componente, foi necessário analisar o mecanismo de abertura das tampas dos tanques, por forma a identificar constrangimentos ao dimensionamento da tampa. Verificou-se que essas tampas são aplicadas nas entradas através de encaixes que podem ser completamente desacoplados e, portanto, não existem constrangimentos no sentido de apoiar a tampa do dispositivo de lavagem à entrada. Assim a tampa deverá ser dimensionada, como ilustrado na Figura 18.

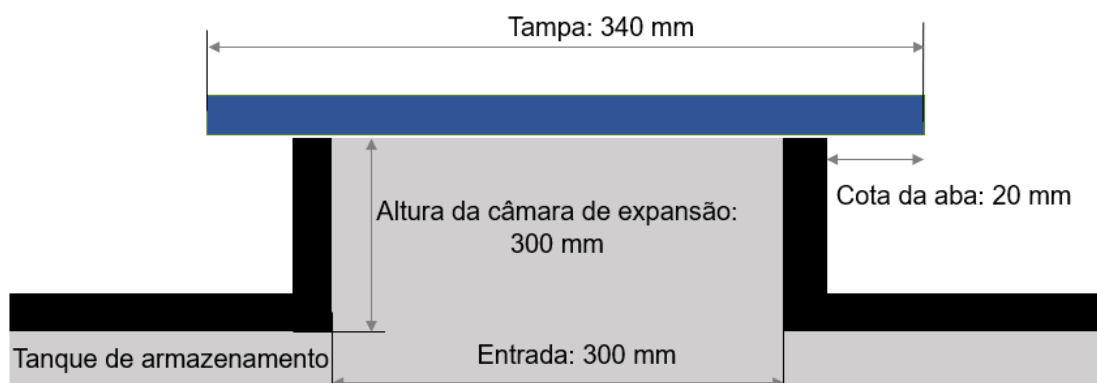


Figura 18 – Análise dos constrangimentos para definição da tampa

Uma vez que a entrada do tanque possui um diâmetro de $D = 300$ mm, definiu-se que a tampa do dispositivo de lavagem também será circular e com um diâmetro de $D_{tampa} = 340$ mm (Figura 18). O diâmetro da tampa é superior ao de entrada do tanque em 40mm, por forma a reforçar o efeito de cobertura contra a saída dos fluidos de lavagem.

3.5 Estudo do comprimento do tubo para posicionamento

Nesta secção pretende-se definir a posição de operação da cabeça de lavagem no interior do tanque de armazenamento. De acordo com os dados apresentados na secção 3.4, a cabeça de lavagem deve encontrar-se pelo menos 300 mm abaixo da entrada, de forma a ultrapassar a câmara de expansão e garantir que, durante o seu funcionamento, os jatos colidem com as paredes do tanque, em vez de ficarem confinados na zona da câmara de expansão.

Na definição da posição da cabeça de lavagem também é importante estudar a capacidade de o jato lavar as paredes dos tanques, tendo em conta a distância máxima que o irá percorrer. De facto, alguns estudos indicam que a qualidade da lavagem está relacionada com a distância entre a cabeça de lavagem e a parede. Por exemplo, o estudo de Fuchs et al., 2019 mostra que, para uma distância de aproximadamente 1 m, se obtém um raio limpo maior do que projetado a 1,6 m.

Quanto maior for a penetração da cabeça de lavagem no interior do tanque, maior terá de ser o curso do eixo vertical para a retirar do interior do tanque. Este facto poderá ter um impacto negativo, pois pode implicar que a altura do armazém não seja suficiente para conter o sistema de lavagem, nomeadamente o eixo vertical quando este está na posição superior (cabeça de lavagem fora do tanque de armazenamento).

Tendo em conta a altura mínima da cabeça de lavagem de 300 mm (altura da câmara de expansão descrita na Figura 15, é possível determinar que, no caso de ser posicionada nessa cota, a distância do ponto mais afastado do tanque é de 3162 mm (Figura 19). Este é o caso mais adverso de lavagem, pelo que é possível estabelecer como requisito para a cabeça de lavagem que esta deverá garantir lavagem para distâncias iguais ou superiores a 3162 mm.



Figura 19 – Distância de alcance dos jatos com a cabeça de lavagem na posição mais desfavorável

A Figura 20 ilustra as características do jato da cabeça de lavagem selecionada Multijet 25, onde é possível verificar que é possível garantir uma lavagem eficaz com jatos projetados a 4000 mm de distância com a configuração de operação mínima: pressão de serviço de 3 bar e *nozzle* com diâmetro de 3,9 mm. Para as restantes configurações de operação, esta distância é sempre superior a 4000 mm. Assim, é possível concluir que o jato tem capacidade de atingir e lavar todas as superfícies dos tanques em estudo, para qualquer pressão de funcionamento e diâmetro do *nozzle*.

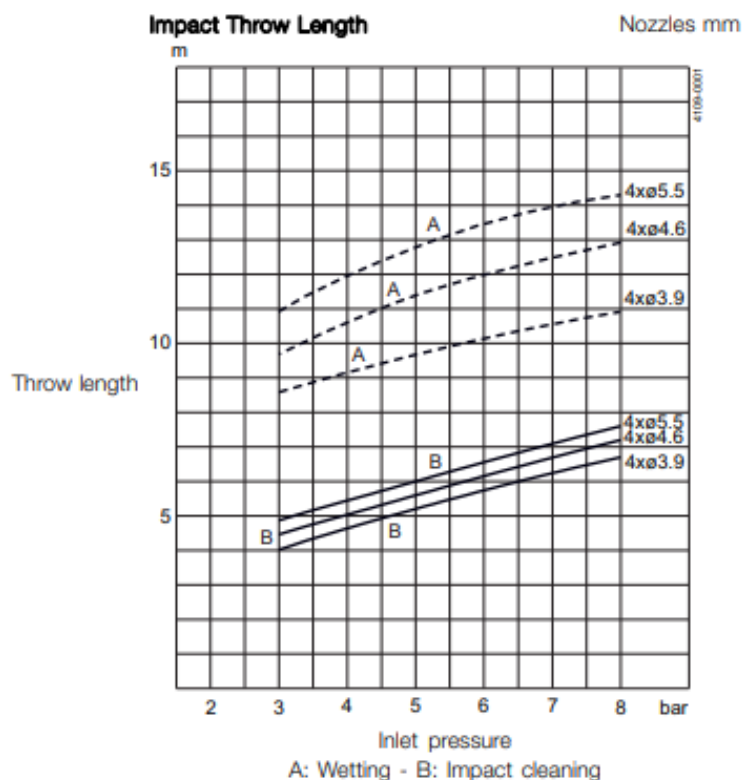


Figura 20 – Características do jato da Alfa Laval Multijet 25. Fonte: *Cleaning*, 2021

Esta análise considerou a situação limite em que a cabeça de lavagem se encontra imediatamente à saída da zona de expansão. Na prática pretende-se evitar colocar a cabeça de lavagem numa posição onde possa ainda haver interferência da câmara de expansão sobre os jatos. Nesse sentido, de forma a afastar a cabeça de lavagem da câmara de expansão definiu-se que o comprimento do tubo de posicionamento será de 400 mm. Dessa forma, a cabeça de lavagem fica posicionada a 400 mm da entrada e afastada 100 mm da câmara de expansão. Ao colocar a cabeça de lavagem numa posição mais afastada da câmara de expansão, faz com que a distância mais longa a ser percorrida pelo jato seja inferior aos 3162mm (Figura 19).

3.6 Definição das especificações dimensionais do gantry robot

Nesta secção pretende-se definir as especificações que devem ser colocadas no projeto do gantry robot por forma a cumprir os objetivos de funcionamento descritos na secção 2.2. Entre estas especificações a definir encontram-se: a forma de fixação do pórtico, a altura do pórtico e o curso necessário para os seus eixos.

O pórtico pode ser fixo ao chão ou ao teto do armazém onde se encontram os tanques de armazenamento. Contudo, Para analisar a melhor solução de fixação foram consultadas empresas responsáveis pelo projeto deste tipo de pórticos, tendo ficado claro que uma solução de fixação ao chão é mais económica que a fixação ao teto, como é patente numa comunicação pessoal da empresa Coelho & Cortesão, Lda: *“Devido à diferença de valores para uma estrutura de suporte dos eixos, fixa ao teto ou ao chão, precisamos de uma confirmação de qual o pórtico a orçamentar, sendo a nossa opinião que a de teto será substancialmente mais cara por motivos de alinhamento, montagem e mão de obra necessária.”* Analisando as informações obtidas pelas empresas de projeto de pórticos concluiu-se que a fixação ao teto apresenta maiores dificuldades de montagem e manutenção, além de impor maiores requisitos ao nível da arquitetura do local a fixar. Neste sentido, dado que não existem constrangimentos no armazém em estudo relativamente à fixação ao chão, será esta a opção adotada no projeto do sistema robótico de lavagem.

Após a definição da forma de fixação, o passo seguinte na especificação do pórtico consistiu na determinação do curso necessário para os seus eixos. De acordo com os dados apresentados na Tabela 7 e informações obtidas na herdade concluiu-se que cada tanque de armazenamento possui um diâmetro de 1990 mm e distam 300 mm entre si (Figura 21). O curso total do pórtico deverá ser suficiente para percorrer todos os tanques e adicionar uma folga nas extremidades. Definiu-se uma folga de 500 mm em cada extremidade. Desta análise, conclui-se que o pórtico deverá ter um curso útil de 14440 mm no eixo X, determinado pela soma dos diâmetros dos tanques de armazenamento, as folgas entre eles e as folgas das extremidades.

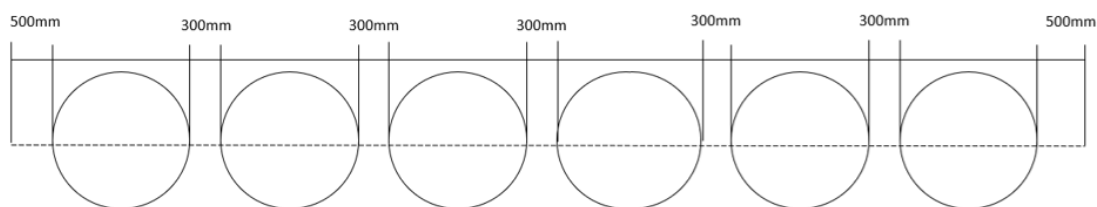


Figura 21 – Definição da folga nas extremidades e entre os tanques de armazenamento

O eixo longitudinal (eixo X) deve ser posicionado de forma que o elemento terminal (cabeça de lavagem) fique centrado com as entradas dos tanques de armazenamento (ver secção 3.8).

A altura de funcionamento da cabeça de lavagem é determinada pela altura da entrada do tanque de armazenamento. Na Tabela 8 compilam-se as especificações dimensionais a ter em conta para definir as dimensões do *gantry robot*.

Tabela 8 – Dimensões a considerar para o projeto do *gantry robot*

	Distância (mm)
Comprimento eixo X (curso)	14440
Raio do tanque de armazenamento	995
Altura do tanque de armazenamento	4000

Tal como referido anteriormente, o somatório dos diâmetros dos tanques com as folgas entre eles resulta num valor total de 14440 mm para o comprimento de uma fila (Tabela 8). Assim, foi considerado um curso útil de 14500 mm no dimensionamento do *gantry robot*, aumentando ligeiramente a folga associada.

O próximo passo passa por definir o curso útil da junta responsável pelo movimento do eixo Y. A Figura 22 ilustra a configuração do *gantry robot* com o eixo Y nas posições limite. O curso do eixo Y será definido por forma a permitir encostar a tampa do sistema de lavagem ao tanque de armazenamento (1) e retirar a cabeça de lavagem do seu interior (2). Uma vez que o sistema vai deslocar-se ao longo da fila de tanques, a esta dimensão é adicionada uma folga de 200 mm entre a cabeça de lavagem e os tanques, para que não exista risco de colisão entre estes e a cabeça de lavagem.

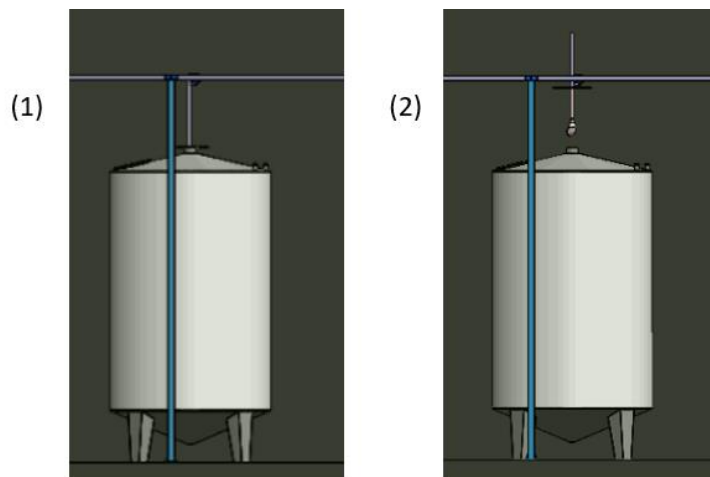


Figura 22 –Análise do curso do eixo Y: a) limite inferior; b) limite superior gantry robot

Na Figura 23 estão representadas as dimensões associadas ao sistema de lavagem que serão tidas em conta no projeto do eixo Y. A altura em a parte superior da tampa e a ligação do tubo de posicionamento à cabeça (cota 1) é de 410 mm (ver secção 3.5). De acordo com o catálogo da Alfa Laval, a altura da cabeça de lavagem é de 230 mm (cota 2) (ver Figura 16). Definindo-se uma fota de 200 mm (cota 3), conclui-se que o eixo Y deverá ter um curso útil de 840 mm por forma a inserir/recolher a cabeça de lavagem e transportá-la acima dos tanques em segurança.

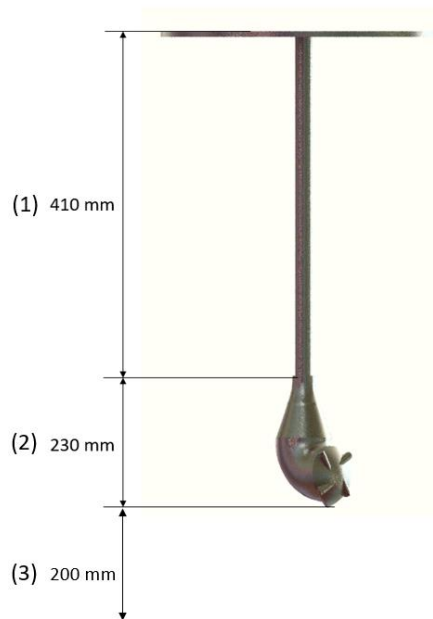


Figura 23 - Dimensões do sistema de lavagem a considerar

Tendo em conta a altura dos tanques de 4000 mm (ver Tabela 8), conclui-se também o curso do eixo Y será entre as cotas de 4000 m e 4840 m (Figura 24).

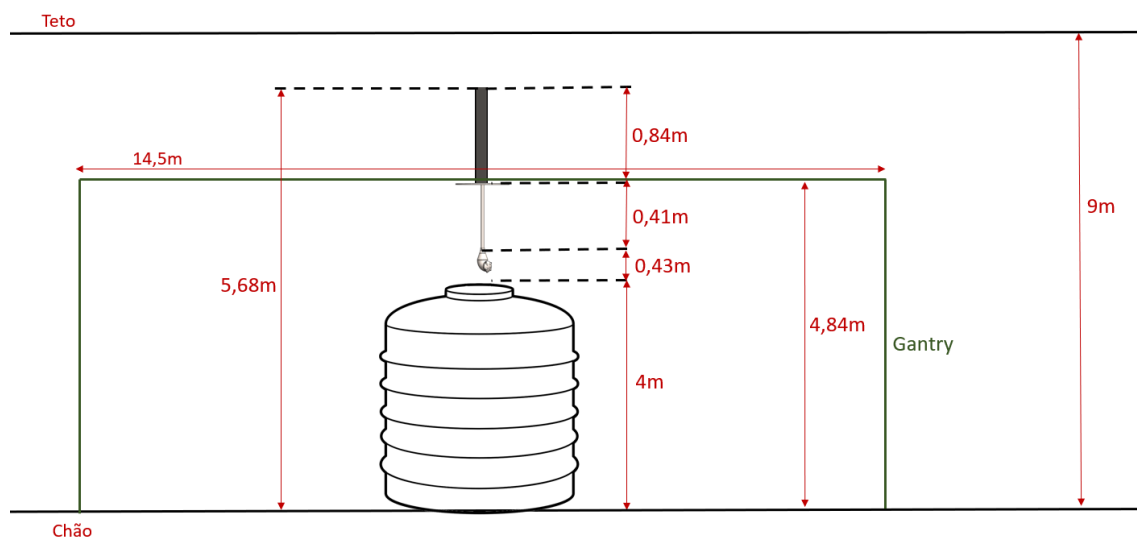


Figura 24 – Cotas do plano de trabalho do sistema de lavagem

A Tabela 9 apresenta os cursos dos eixos do sistema de posicionamento da cabeça de lavagem.

Tabela 9 - Deslocamento dos eixos do sistema de posicionamento da cabeça de lavagem

Junta no sistema	Tipo de movimento	Deslocamento
X	Linear	14 500 mm
Y	Linear	840 mm

A Figura 25 apresenta o sistema de posicionamento com o eixo Y na posição superior (situação mais desfavorável), onde é possível verificar que o sistema robótico não colide com o teto do armazém, existindo uma folga de 3320 mm.

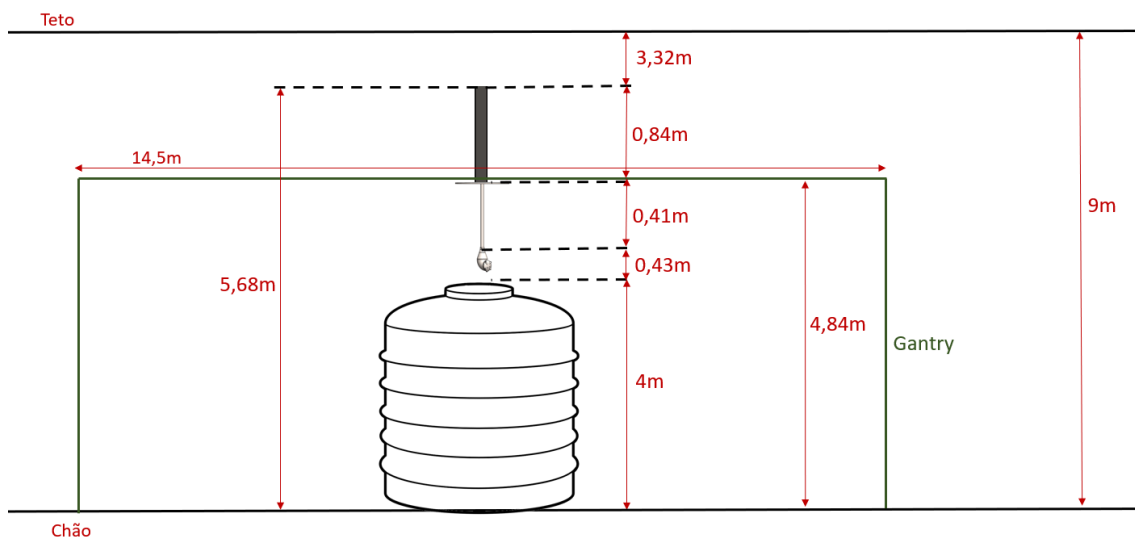


Figura 25 - Cotas do plano de trabalho do sistema de lavagem e análise da folga até ao teto.

3.7 Definição das especificações dinâmicas do gantry robot

Nesta secção serão caracterizadas a carga a ser transportada e as forças a que o gantry robot estará sujeito durante a sua operação. A carga a ser transportada consiste no conjunto “dispositivo de lavagem”, cujas características dinâmicas podem ser medidas com recurso ao software de modelação Solidworks®.

Através deste software foram determinados os esforços aplicados no ponto de ligação ao gantry robot, definido como ponto A (Figura 26). Este ponto representa também a origem do referencial onde são medidas as coordenadas do centro de massa (B). Estes resultados são apresentados na Tabela 10.

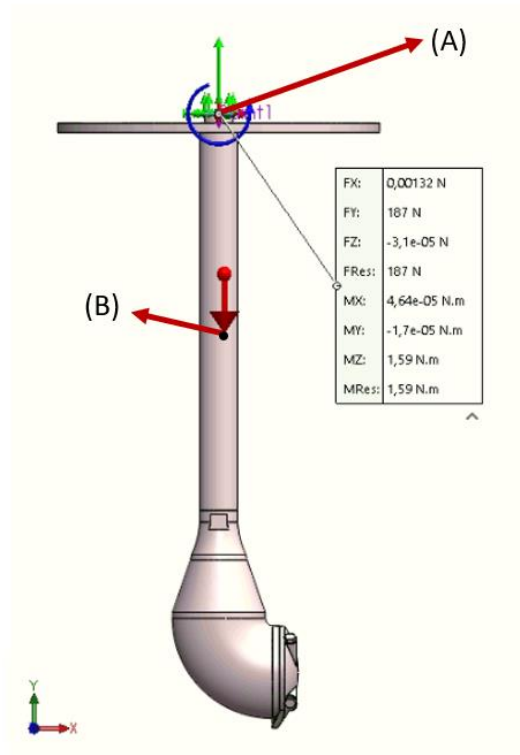


Figura 26 – Cargas aplicadas no ponto de apoio do suporte do sistema de lavagem.

Tabela 10 – Características dinâmicas da carga

	Centro de massa (mm)	Força (N)	Momento (N.m)
X	5,81	0	0
Z	-223,15	187	1,59
Y	0	0	0

Além da carga aplicada pelo dispositivo de lavagem é necessário ter em conta a influência da pressão dos fluidos de lavagem na estrutura. Por forma a avaliar os esforços daí decorrentes, foi realizado um estudo de mecânica de fluidos para calcular a força (F_a) provocada pelo escoamento na cabeça de lavagem no ponto de ligação com o *gantry robot* (ponto A da Figura 27).

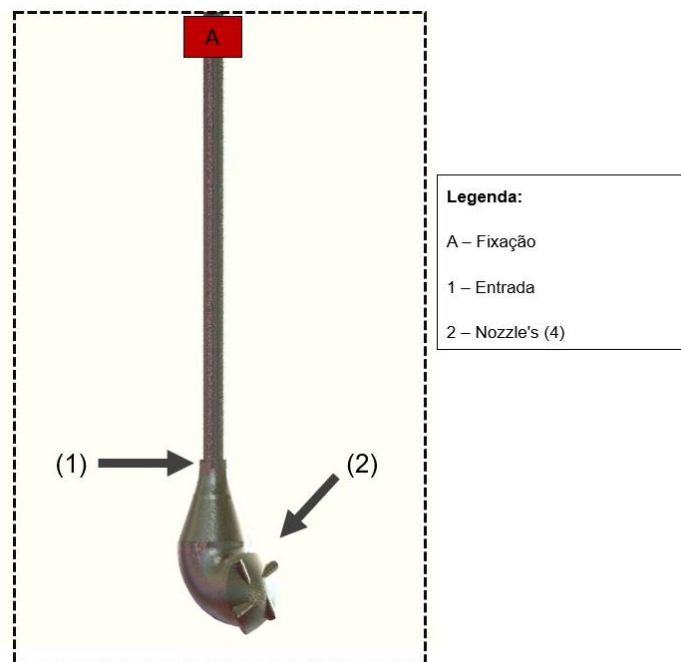


Figura 27 – Volume de controle para cálculo da pressão exercida pelo fluido.

Os escoamentos simples podem ser estudados através da equação de Bernoulli, que relaciona a pressão, a energia potencial e a velocidade de um fluido. A equação de Bernoulli é uma derivação da 2ª lei de Newton, num conjunto de condições particulares (Streeter & Wylie, 1979):

- viscosidade desprezável;
- escoamento permanente (ou estacionário);
- incompressibilidade do fluido;
- aplicação a cada linha de corrente;
- ausência de trocas de energia (por calor ou trabalho);

Mesmo com todas estas particularidades, a equação pode ser aplicada em inúmeras situações em que aqueles pressupostos podem ser admitidos com boa aproximação. Em muitas aplicações, a equação de Bernoulli tem de ser combinada com a equação da continuidade (Streeter & Wylie, 1979). Segundo esta, o volume de fluido que atravessa uma secção de área A_1 , num intervalo de tempo t , é o volume do cilindro de base A_1 e comprimento $l_1 = V_1 t$. De forma análoga, a massa de fluido que atravessa a secção é:

$$m_1 = \rho_1 \times V_1 \times A_1 \quad 3.1$$

Sendo,

- m_1 – Caudal mássico (Kg/m^2)
- ρ_1 – Densidade da água (Kg/m^3)
- V_1 – Volume de água (m^3)
- A_1 – Secção de área (m^2)

Para se calcular a força provocada pelo escoamento dos fluídos no ponto de fixação foi definido um volume do controlo delimitado por esses componentes (Figura 28). Analisando o volume de controlo (Figura 27) definiram-se os pontos de interesse do escoamento a ligação do tubo à cabeça de lavagem (0), a admissão de fluídos no tubo (1), a saída dos nozzle's (2,3,4,5).

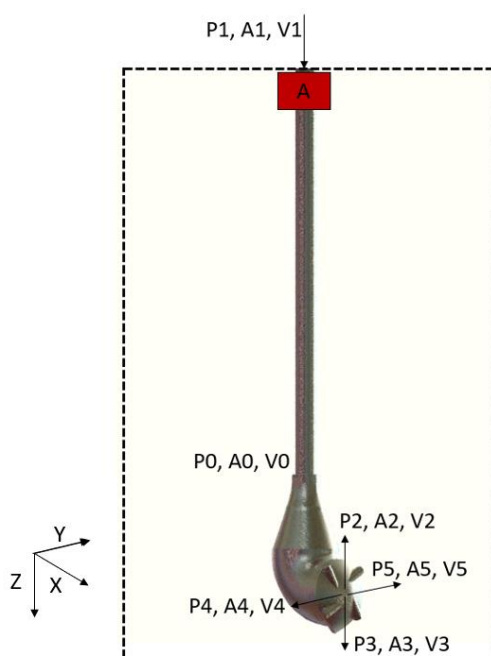


Figura 28 – Esquema de pressão e área considerado

Os dados a considerar nos pontos em estudo são os seguintes:

- Pressão de entrada na cabeça de lavagem: $P_0 = 3 \text{ bar}$;
- Área de entrada da cabeça de lavagem: $A_0 = 5,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$;
- Área de entrada no volume de controlo: $A_1 = 5,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$;
- Caudal volumétrico à entrada da cabeça de lavagem: $Q_0 = 1,5833 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$;
- Área de saída de cada *nozzle*: $A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = 23,76 \times 10^{-6} \text{ m}^2$;
- Distância entre a entrada ao ponto de apoio: $h_1 = 0,64 \text{ m}$;

Tendo em conta que a área na entrada no volume de controlo é A_0 e a velocidade do escoamento nesse ponto é v_0 , o caudal admitido o volume de controlo tubagem (Q_0) é calculado como se segue:

$$\begin{aligned} Q_0 = A_0 \times v_0 &\Leftrightarrow 1,5833 \times 10^{-3} = 5,07 \times 10^{-4} \times v_0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow v_0 = 3,12 \text{ m/s} \end{aligned} \quad 3.2$$

Como a secção da tubagem na entrada no volume de controlo (ponto 1) e na cabeça de lavagem (ponto 0) são iguais ($A_0 = A_1$) e o caudal se mantém constante ($Q_0 = Q_1$), a velocidade do escoamento nesses pontos também será igual, logo: $v_1 = v_0$.

Recorrendo à equação de Bernoulli, a pressão do fluido no ponto de fixação (P1) é calculada como se segue:

$$\begin{aligned} P_0 + \rho \times g \times h_0 + \rho \times \frac{v_0^2}{2} &= P_1 + \rho \times g \times h_1 + \rho \times \frac{v_1^2}{2} \\ 3 \times 10^5 + 1000 \times 9,81 \times 0 + 1000 \frac{3,12^2}{2} &= P_1 + 1000 \times 9,81 \times 0,64 + 1000 \frac{3,12^2}{2} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow P_1 = 2,9 \text{ bar} \end{aligned} \quad 3.3$$

A força aplicada pela pressão do fluido (Fp) no ponto de fixação (Fa) é calculada pela 2ª Lei de Newton como se segue:

$$Fa + Fp = \Sigma m_{out} \times V_{out} - \Sigma m_{in} \times V_{in} \quad 3.4$$

O cálculo da componente da força Fa segundo o eixo Z, é calculada como se segue:

$$\begin{aligned} Fa - P_1 A_1 &= m_2 v_2 - m_3 v_3 - (-m_1 v_1) \Leftrightarrow Fa = P_1 A_1 + m_1 v_1 \\ Fa &= 290000 \times 1,26 \times 10^{-4} + 1000 \times 1,5833 \times 10^{-3} \times 3,12 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Fa = 41,5 \text{ N} \end{aligned} \quad 3.5$$

O cálculo da componente da força Fa segundo o eixo Y é calculada como se segue:

$$Fa = -m_4 v_4 + m_5 v_5 = 0 \quad 3.6$$

Como não há entrada nem saída de fluido na direção X, a força nessa direção será nula. Este estudo permite concluir que, durante a operação da cabeça de lavagem, existe uma força adicional de 41,5 N no eixo Z, que deve ser adicionada aos esforços provocados pelo dispositivo de lavagem apresentados na Tabela 10. Assim, a carga total a ser considerada no dimensionamento do *gantry robot* é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11- Esforços totais aplicados no ponto de fixação do dispositivo de lavagem.

	Centro de massa (mm)	Força (N)	Momento (N.m)
X	8,89	0	0
Z	-317,8	228,5	6,11
Y	0	0	0

3.8 Projeto do *gantry robot*

Nesta secção será realizado o dimensionamento da estrutura do *gantry robot* que irá transportar o dispositivo de lavagem sobre os tanques e introduzir a cabeça de lavagem no seu interior.

O projeto do *gantry robot* iniciou-se com a definição da sua configuração e forma de fixação. Analisando o estudo realizado acerca de *gantry robots* e resumido na Tabela 5 (secção 2.2) e tendo em conta que uma das principais restrições impostas pelo responsável do armazém onde estão instalados os tanques se relaciona com a minimização da poluição visual, optou-se por um *gantry robot* com a configuração “Um eixo assente em pilares”.

Para o dimensionamento do *gantry robot* recorreu-se a um *software* disponibilizado pela empresa Lucas Robotic (France, 2021) que permite a personalização de um pórtico adequado às necessidades do utilizador. O software considera as seguintes fases para dimensionar um pórtico: 1) Especificação da carga a transportar, 2) Definição comprimento da carga a transportar, 3) Dimensão da carga a transportar, 4) Definição da posição mais baixa do braço de elevação, 5) Definição do curso útil no eixo Y, 6) Velocidade e aceleração dos eixos, 7) Definição da altura do teto disponível, 8) Definição do curso útil no eixo X, 9) Definição da distância dos pilares de fixação do *gantry robot* ao centro do eixo Y.

1) Especificação da carga a transportar

Nesta fase deve ser especificada a carga a transportar pelo pórtico. Considerando que o sistema de lavagem apenas é atuado quando o *gantry robot* se encontra parado e com o dispositivo de lavagem apoiado no tanque, a carga proveniente do estudo do efeito dos fluidos de lavagem (secção 3.7) poderia não ser contabilizada para o dimensionamento do *gantry robot*. Contudo, assumindo que numa eventual operação de manutenção poderá ser necessário testar a cabeça de lavagem fora do tanque de armazenamento, e acima de tudo para garantir a segurança do sistema, essa carga também foi contabilizada nesta especificação. Assim, analisando as cargas apresentadas na Tabela 11 foi definida a carga total a transportar de: 22,9 Kg;

2) Definição do comprimento da carga a transportar

Nesta fase deve ser definido o comprimento da carga a transportar (cota B da Figura 29), cujo parâmetro será importante para evitar a colisão entre o pilar e a carga. Como a carga a transportar pelo *gantry robot* é o dispositivo de lavagem, a dimensão a considerar nesta fase é o diâmetro da tampa, ou seja, a cota B a definir é de 340 mm;

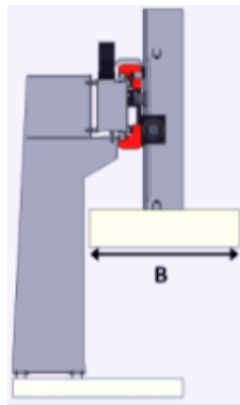


Figura 29 – Comprimento da carga

3) Dimensão da carga a transportar

Nesta fase pretende-se indicar a posição do centro de massa da carga em relação ao ponto de aplicação, para que o *software* efetue os cálculos acerca do momento fletor gerado pelo desvio existente.

- Posição do centro de massa no eixo X: 0 mm;
- Posição do centro de massa no eixo Y: 8,89 mm;
- Posição do centro de massa no eixo Z: -317,8 mm;

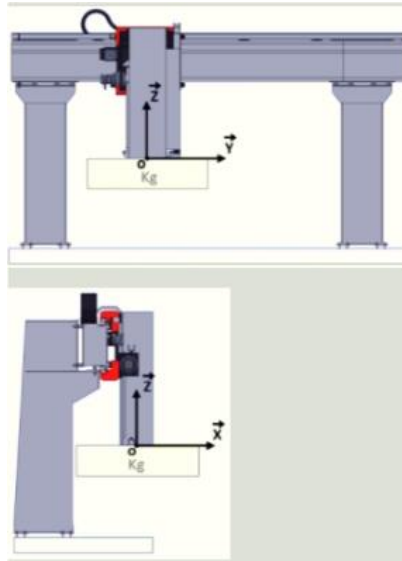


Figura 30 – Representação dos eixos utilizados na software

4) Definição da posição mais baixa do braço de elevação

Este parâmetro define a cota entre o chão e o eixo vertical, quando este se encontra na posição mais baixa. No caso de estudo, como o eixo Y irá acoplar à tampa do dispositivo de lavagem que irá ficar por cima do tanque, este parâmetro é a altura dos tanques de armazenamento: 4000 mm (Figura 31).

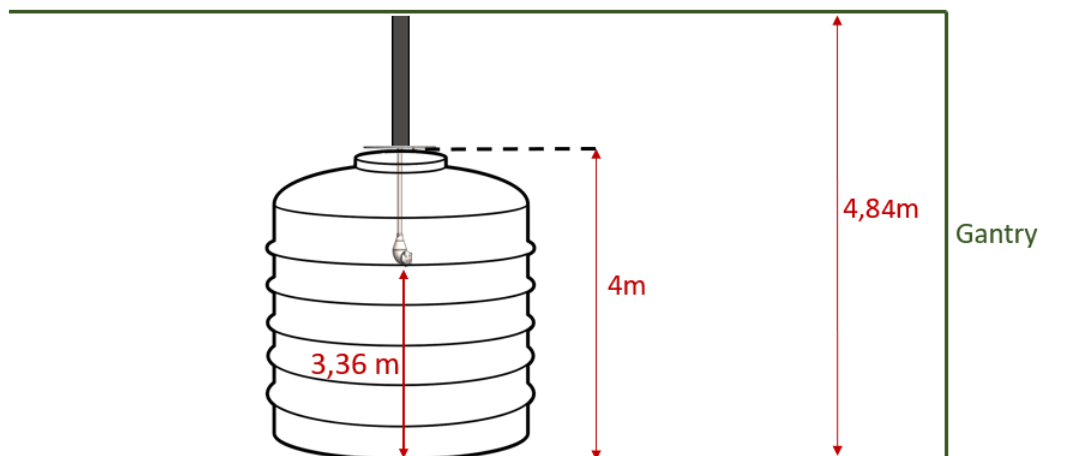


Figura 31 – Distância entre o chão e a superfície mais próxima do chão

5) Definição do curso útil no eixo Y

Este parâmetro corresponde ao deslocamento vertical do *gantry robot* ao longo do eixo Y que foi determinado na secção 3.6: 840 mm;

6) Velocidade e aceleração dos eixos;

Nesta fase são definidas as velocidades e acelerações dos eixos X e Y, considerando-se que os movimentos do sistema robótico de lavagem devem ser executados com uma velocidade e aceleração baixa. Esta decisão foi definida com base nas informações obtidas pela empresa Coelho & Cortesão, Lda: “*quanto maior a velocidade e aceleração, maior a robustez necessária do gantry robot.*” A afirmação anterior justifica-se por um lado, pela motorização necessária para atingir uma maior velocidade e, por outro lado, pela necessidade de suportar os esforços provenientes da aceleração/desaceleração em situações de emergência. Nesse sentido, os movimentos mais rápidos e acelerações mais elevadas estão associados a custos mais elevados na implementação do pórtico. Por esse motivo foram seleccionados os valores máximos de 0,5 m/s e de 0,5 m/s² para a velocidade e a aceleração, respetivamente.

7) Definição da altura ao teto disponível:

Este parâmetro refere-se ao pé direito do armazém. Este requisito de projeto foi definido na secção 3.6, sendo de 9000 mm.

8) Definição do curso útil no eixo X

Este parâmetro corresponde ao deslocamento horizontal do *gantry robot*, o qual foi definido na secção 3.6 em 14500 mm;

9) Definição da distância dos pilares de fixação do *gantry robot* ao centro do eixo Y

Este parâmetro corresponde ao espaço livre entre os pilares e o posicionamento da cabeça de lavagem (Figura 32). Na secção 3.6 foi definido que os pilares do *gantry robot* devem estar fora da zona dos tanques. Assim, a distância mínima entre os pilares e o eixo e o centro do eixo Y (distância D da Figura 32) deve ser o raio dos tanques de armazenamento, ou seja, 995 mm (os tanques têm um diâmetro de 1990 mm). Uma vez que o software apenas permite que esta distância seja no máximo de 1000 mm, teoricamente é possível que os tanques se fixem na frente dos pilares do *gantry robot*, apesar da curta folga (5 mm). Ainda assim, após ter sido obtido o modelo CAD do *gantry*

robot colocaram-se os tanques de armazenamento no mesmo espaço de trabalho do *gantry robot* e verificou-se a viabilidade das opções apresentadas.

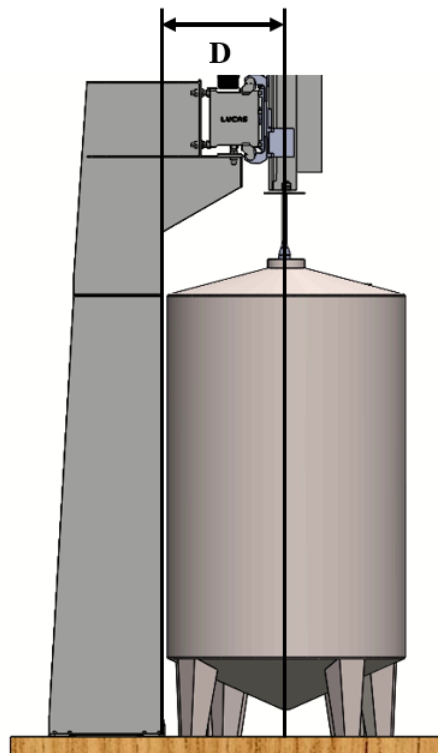


Figura 32 – Representação da distância horizontal entre o eixo da carga e o pilar

Após a introdução dos dados atrás mencionados na plataforma foi possível obter o modelo CAD (Computer Aided Design) do *gantry robot* a ser dimensionado (Figura 33).

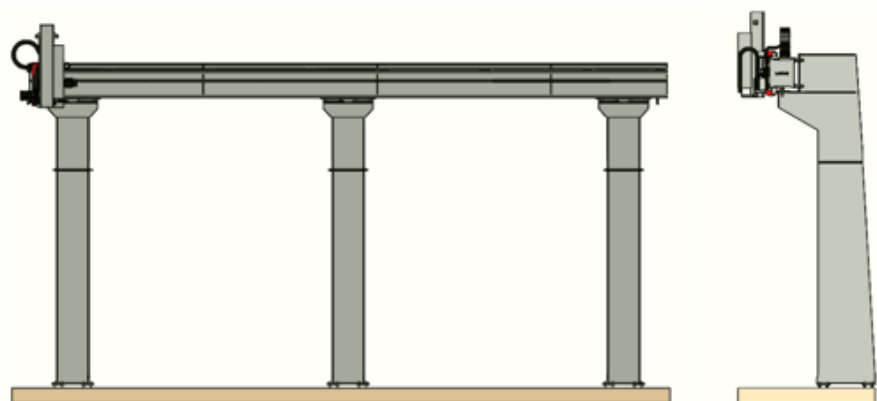


Figura 33 – Modelo 3D do gantry robot obtido através da plataforma de configuração

A Figura 34 apresenta o modelo 3D do sistema robótico de lavagem, incluindo o *gantry robot* (Figura 33), o dispositivo de lavagem (Figura 23) e os seis tanques de armazenamento pertencentes à fila para o qual o sistema foi dimensionado. Na montagem dos diversos componentes no mesmo espaço de trabalho foi tido em conta o dimensionamento elaborado ao longo do presente capítulo. A ausência de colisões entre objetos verificada neste modelo validou o projeto apresentado nesta secção.

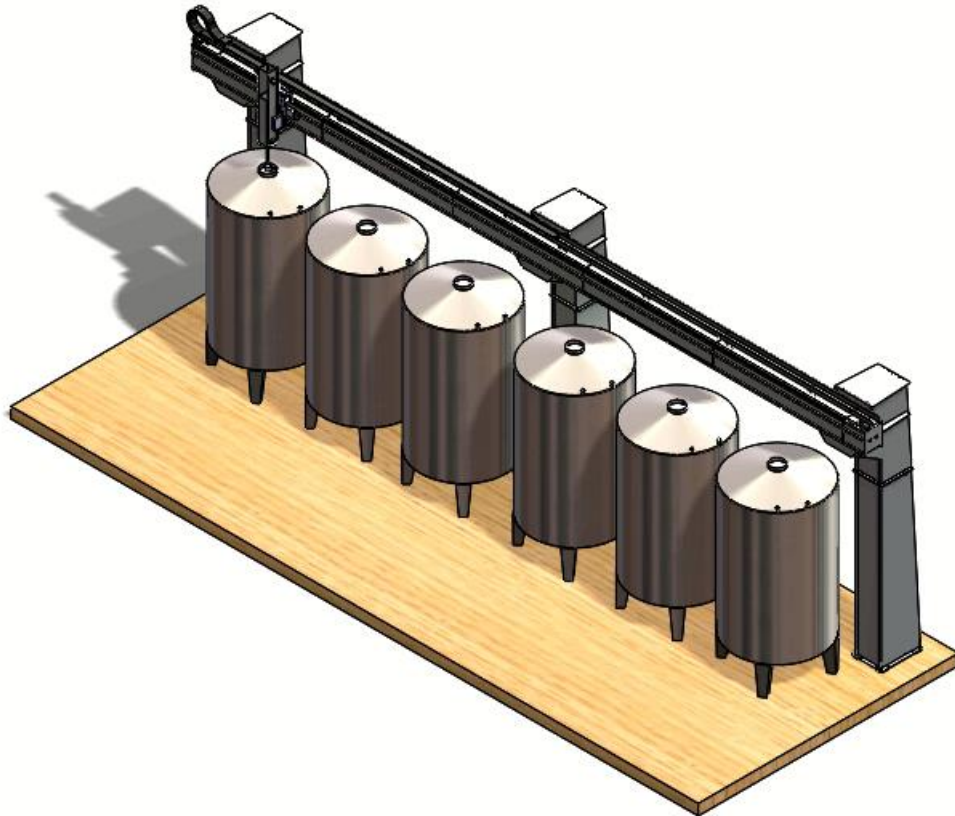


Figura 34 - Modelo 3D do sistema robótico de lavagem, gantry robot com os tanques de armazenamento

Página deixada propositadamente em branco

Capítulo 4 - Projeto do sistema de automação

O objetivo deste capítulo é o de definir os componentes e principais características do sistema de automação que comanda o *gantry robot* e o dispositivo de lavagem. Assim, definem-se, inicialmente, os componentes do sistema automático do sistema robótico. Posteriormente, é definida a sequência de movimentos que constituem o ciclo de operação para lavagem de tanques de armazenamento. Por fim, são definidos os algoritmos de comando do sistema robótico.

4.1 Componentes do sistema automático

O sistema robótico de lavagem de tanques de armazenamento (Figura 35) é composto por um dispositivo de lavagem e um *gantry robot* que o desloca vertical e longitudinalmente. Para o desenvolvimento do comando automático prevê-se uma instalação de componentes que, quando combinados por um sistema de controlo, desempenharão a função de lavagem dos tanques de armazenamento (Figura 35).

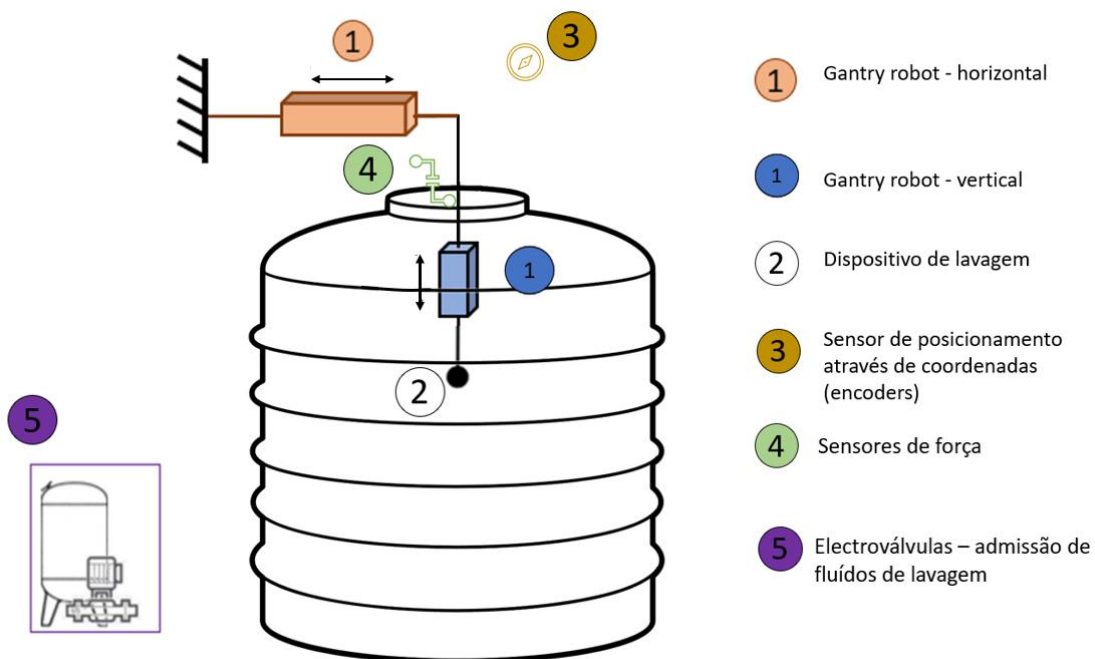


Figura 35 - Componentes do Sistema automático de lavagem a controlar

Os subsistemas nos quais se prevê dividir o robot automático de lavagem de tanques de armazenamento, são:

1. *Gantry robot*: Tem a função movimentar as duas juntas de translação horizontal e vertical (1), transportando o dispositivo de lavagem (2). O seu movimento é servo-controlado com o auxílio de sensores de posição instalados nas juntas (3).
2. Sistema de deteção do posicionamento da tampa (4): é composto por um ou mais sensores de proximidade e tem como função detetar o contato entre a tampa e a entrada do tanque.
3. Sistema de comando da lavagem: é composto por um conjunto de electroválvulas (5) e tem a função de controlar a injeção dos fluidos de lavagem.

Por forma a controlar e combinar os sistemas apresentados, propõe-se a arquitetura genérica para o sistema de controlo e monitorização das operações que se apresenta na Figura 36.

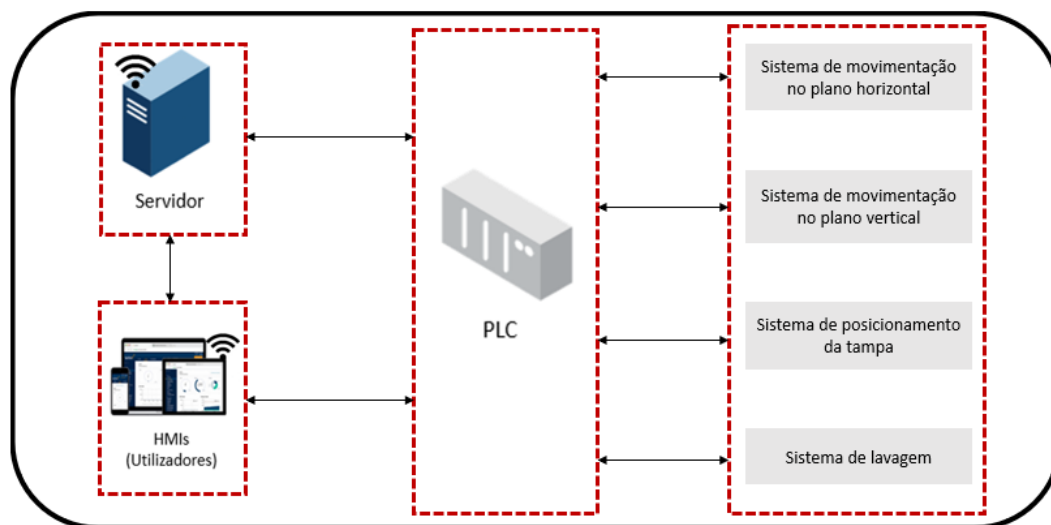


Figura 36- Arquitetura de controlo de robot automático de lavagem de tanques de armazenamento

Na arquitetura acima ilustrada, o PLC (Power Line Communication) é o componente responsável pelo controlo do sistema. Como tal, o PLC estará ligado a todos os sensores, atuadores e servo-acionamentos que integram os sistemas atrás identificados. A programação do PLC permitirá o controlo do sistema robótico, tendo em conta dois modos de operação: modo de sequência automática ou modo de seleção manual. No modo de sequência automática, a lavagem dos tanques será realizada com a lavagem de todos os tanques por ordem (do tanque 1 ao tanque 6). No modo de seleção manual, pretende-

se que seja o operador a definir qual o tanque a lavar. Nesse caso, para se iniciar a operação de lavagem, um operador selecionará os tanques (1, 2, 3, 4, 5 ou 6) que deve ser lavado, sendo que a operação termina quando a lavagem do tanque selecionado estiver concluída.

O deslocamento dos eixos que compõem o protótipo será realizado com recurso a motores elétricos. Os motores estão conectados a servo-acionamentos, de onde recebem os sinais elétricos o que os permitem atuar no processo. Cada motor tem *encoders* acoplados, cujos sinais são enviados para os servo-acionamentos para estimar a posição do eixo. Este sistema também estará munido de sensores fim-de-curso para garantir a segurança do mesmo, cujos sinais são enviados para os servo-acionamentos. O controlo de movimento de cada eixo será realizado pelo servo-acionamento correspondente com base nos sinais dos sensores. Estes estarão conectados ao PLC, sendo a comunicação entre eles realizada através de um protocolo de comunicação (ex: EtherNet/IP, EtherCAT, Profinet, Profibus DP ou outro). Além do referido na arquitetura de controlo serão conectadas interfaces HMI (*Human-Machine Interface*) ao PLC, de acordo com a Figura 37. A comunicação entre o PLC e o HMI deve também ser realizada através de um dos protocolos de comunicação referidos anteriormente. Em relação ao PC servidor e o PLC a sua comunicação é realizada através de um protocolo baseado em internet (ex: EtherNet/IP). De acordo com o estudo realizado na secção 2.3, o espaço de trabalho do sistema automático de lavagem será munido de equipamentos de segurança adicionais, com objetivo de cumprir as normativas exigidas. Nesse sentido, o espaço de trabalho do sistema automático de lavagens deverá estar isolado por barreiras físicas. As barreiras físicas têm como objetivo impedir que o operador esteja dentro do espaço de trabalho do robot durante a sua operação. Propõe-se a implementação de uma barreira física em acrílico porque dá possibilidade ao operador de visualizar o movimento do robot e reduz a poluição visual introduzida no armazém. A entrada na barreira física em acrílico efetuar-se-á através de uma porta munida com um sensor do tipo *switch*. Desta forma, a fonte elétrica do robot só é alimentada quando o sensor está acionado, ou seja, a porta se encontra fechada. Além da barreira física, foi também idealizada a instalação de botoneiras de emergência no armazém, que oferecem possibilidade de o operador parar robot a qualquer momento. Além disso, também devem ser instalados sinais sonoros e luminosos que são acionados durante a operação de lavagem. Estas medidas de segurança vão de encontro às normas de segurança atualmente em vigor (ISO 10218-1, 2006).

Na arquitetura proposta (Figura 37) prevê-se a presença de um servidor, que se considera ser uma mais-valia para aumentar eficiência da organização, no sentido de ter a capacidade de armazenar dados, como as datas que foram efetuadas as lavagens. Por outro lado, poderá ser útil caso seja implementado um software de gestão, capaz de produzir relatórios para produção do vinho. Numa última perspetiva pode também conferir uma maior segurança ao sistema (Antivírus, ou equivalente). Além do referido na arquitetura de controlo, serão ainda conectadas interfaces HMI (*Human-Machine Interface*), de acordo com a Figura 37.

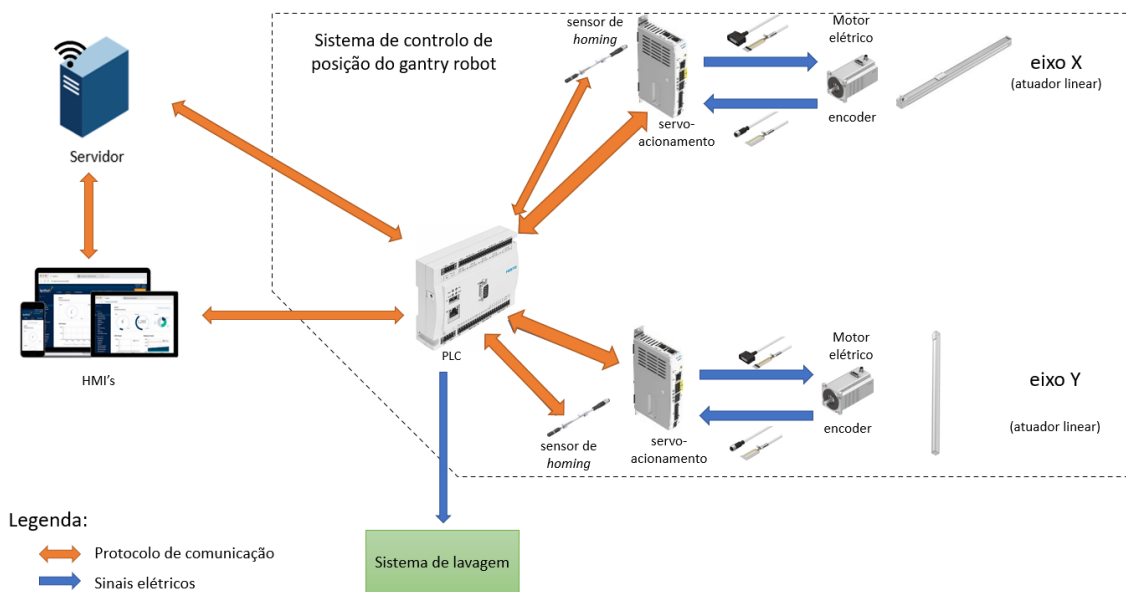


Figura 37 – Arquitetura de controlo do Sistema de lavagem

4.2 Estudo do movimento do robot para lavagem de tanques de armazenamento

Em robótica o controlo de movimento de uma junta pode ser dividido em 3 níveis como especificado na Figura 38. O primeiro nível, designado por controlo da tarefa, diz respeito à sequência de movimentos que o robot executa. O segundo nível é designado por controlo de trajetória e define o movimento que cada junta executa individualmente, por forma a criar a trajetória que permite ao robot desempenhar as tarefas indicadas no nível de controlo. Finalmente, o terceiro nível designa-se por servo controlo. Esta etapa é responsável pelo movimento das juntas do *robot*, aplicando a trajetória especificada no nível anterior.



Figura 38 – Etapas do movimento executado por uma junta

No caso presente, o controlo de movimento de uma junta é implementado com base em três componentes essenciais: o controlador, o servo-controlador e o motor equipado com encoder.

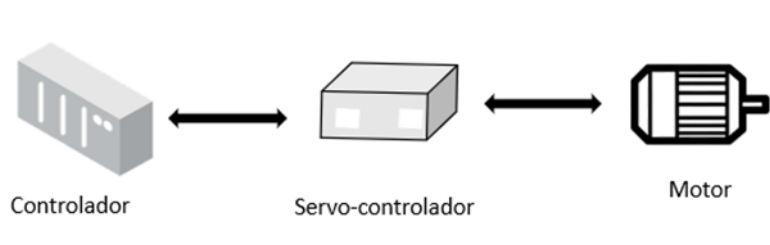


Figura 39 – Esquema do Sistema de controlo das juntas

O controlador é o componente onde é programado o controlo das tarefas a executar, que devem responder em acordo com os fluxogramas apresentados nas secções 4.5.3 e 4.5.4. O servo controlador, por sua vez, é o componente responsável pelo planeamento das trajetórias de cada uma das juntas, bem como pelo seu servo-controlo.

Relativamente aos níveis de controlo da trajetória e servo-controlo, estes estão a cargo do software do PLC e das cartas servo-drive; assim sendo, o projetista possui pouca capacidade de intervir na sua parametrização. Por outro lado, o nível da tarefa é o que está à disposição do projetista e é implementado através de um programa escrito numa linguagem de programação de autómatos que irá ser executado pelo PLC.

4.3 Modos de operação

Com o objetivo de se desenvolver os algoritmos de comando a executar no primeiro nível (Controlo de Tarefa) do diagrama representado na Figura 38, nesta secção começou-se

por especificar os modos de funcionamento do robot automático de lavagens, ilustrados na Figura 40.

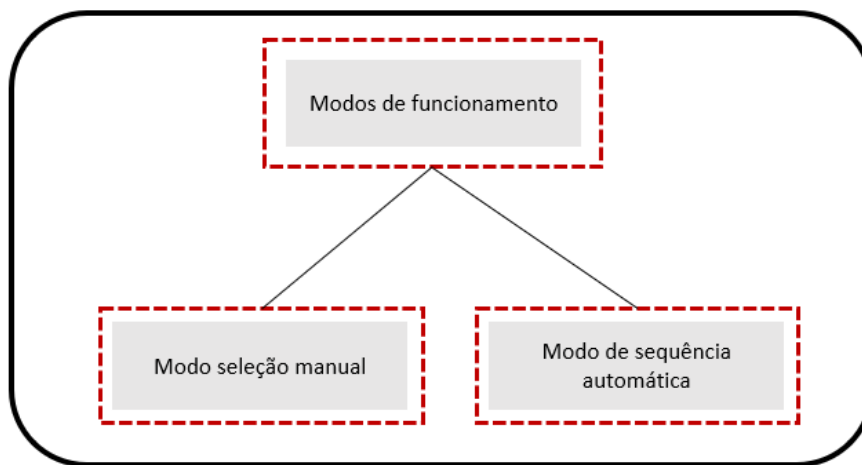


Figura 40 – Modos de funcionamento do robot para lavagem de tanques de armazenamento

Antes do início da execução dos algoritmos de funcionamento do sistema (estudados mais na secção 4.5), existem algumas pré-condições que terão de ser garantidas:

- Quando o robot não se encontra em funcionamento deve estar posicionado na posição *home* (Figura 41). Quando se liga o sistema, caso os eixos não se encontrem na posição *home*, deve ser executada a rotina que os permite mover até a encontrarem. Essa rotina deverá ser executada sempre que algum ciclo de operação for interrompido de forma abrupta pelo operador, de modo a reiniciar o sistema.

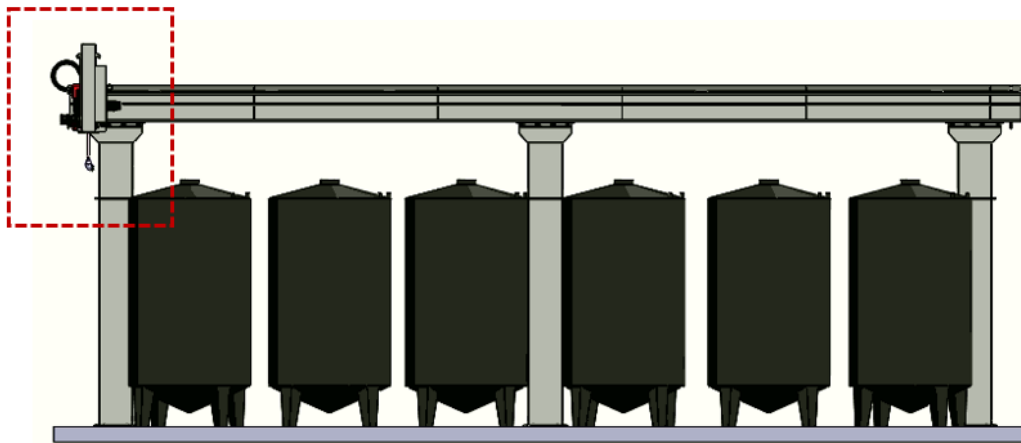


Figura 41 – Posicionamento do sistema de lavagem em condições de stand-by: posição home.

- Antes de se proceder à lavagem é necessário remover a(s) tampa(s) do(s) tanque(s). Esta tarefa será realizada pelo operador que, manualmente, fará a abertura do(s) tanque(s) que deseja lavar.

Modo de seleção manual

O modo de funcionamento de seleção do tanque manualmente deve permitir que o operador selecione o tanque a ser lavado. Neste modo, apenas é lavado o tanque selecionado pelo operador, sendo que o robot volta à posição *home*, após a execução da tarefa. Neste modo, após selecionado um dos seis tanques de armazenamento, o operador dá instrução de início através do botão “start” e tem início a lavagem. Esta inicia-se com deslocamento do dispositivo de lavagem até ao interior do tanque selecionado. Posteriormente, dá-se início ao processo de lavagem que é uma combinação programada da ejeção dos fluidos de lavagem. Finalmente, após o processo de lavagem estar concluído, o *gantry robot* desloca o dispositivo de lavagem até à posição *home*, deixando o sistema operacional para a próxima lavagem.

Modo de sequência automática

No modo de sequência automática pretende-se que, seja efetuada a lavagem de todos os tanques de armazenamento, num ato contínuo. Ou seja, o operador dá indicação que

deseja efetuar a lavagem dos tanques e numa sequência ordenada, do tanque mais próximo para o mais afastado, é realizada a lavagem dos seis tanques.

Este modo foi indicado pela gestão da herdade como sendo o mais importante, uma vez que normalmente os tanques são esvaziados em simultâneo. Contudo, para os casos em que isso não se verifica é importante que exista uma alternativa, dada pelo comando de seleção manual anteriormente descrito.

4.4 Interfaces de utilizador - HMI

Através do HMI o operário deverá encontrar uma tela inicial com indicação do modo de lavagem a selecionar: “modo de sequência automática” ou “modo de seleção manual”. Nesta tela, também deverá existir a opção “manutenção”, para permitir que o operador possa controlar os eixos através de setas com o objetivo de colocar o dispositivo de lavagem num local escolhido pelo operador para efetuar a manutenção do sistema robótico automático de lavagens (Figura 42).

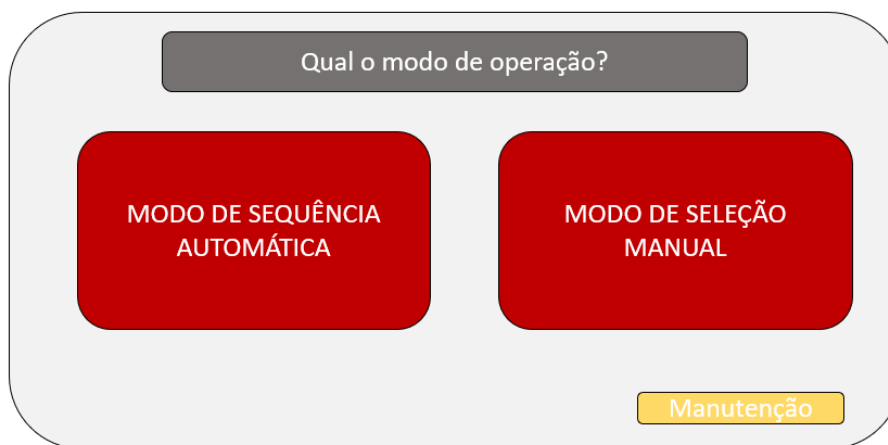


Figura 42 – HMI: layout da tela inicial do HMI - seleção do modo de operação

Quando o operador selecionar o modo de seleção manual deverá ser apresentada uma tela para a seleção do tanque a ser lavado, como se ilustra na Figura 43. Após a seleção do tanque de armazenamento que o operador deseja lavar, o operador tem à disposição o botão “START”, de forma a dar início à lavagem.

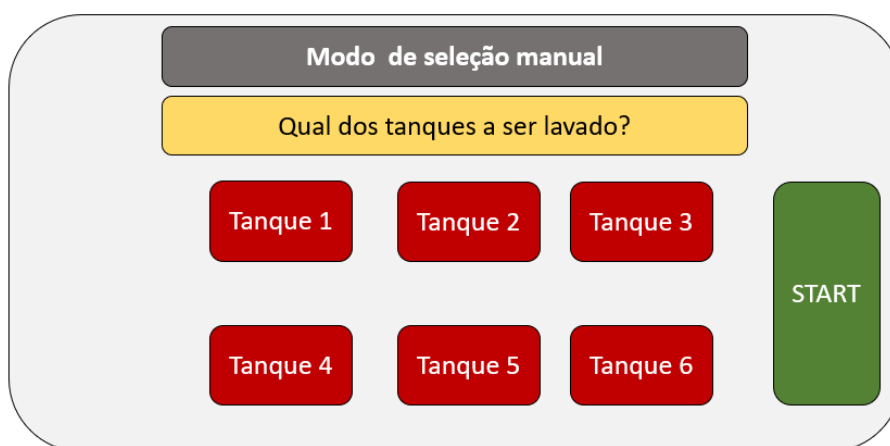


Figura 43 – Tela exemplo do modo de operação “modo de seleção manual” do HMI

No caso de o operador dar instrução que deseja efetuar a lavagem em “modo de sequência automática”, é apresentada apenas a tela com o botão de “START” (Figura 44). Quando o operador premir esse botão, será iniciado o processo de lavagem de todos os tanques, cujo algoritmo se apresenta na secção 4.5.

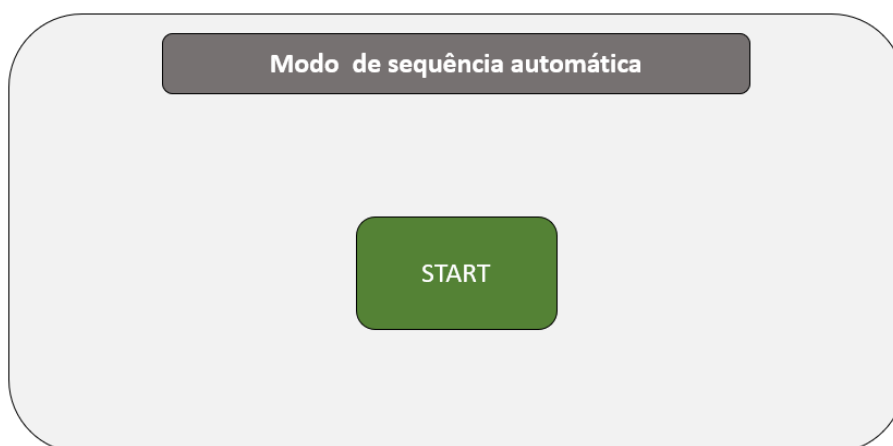


Figura 44 - Tela exemplo do modo de operação “modo de sequência automática” do HMI

No caso de o operador selecionar o modo manutenção, será exibida uma tela com quatro botões (esquerda, direita, cima e baixo), como ilustrado na Figura 45, que permitirá mover, individualmente, os eixos do robot automático em ambas as direções.

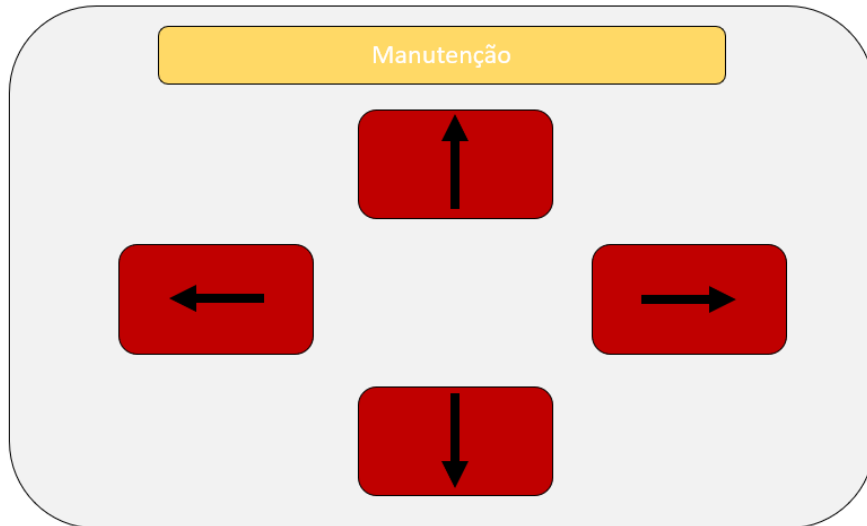


Figura 45 - Tela exemplo do modo de operação "manutenção" do HMI

4.5 Algoritmos de funcionamento

4.5.1 Definição das posições dos eixos

Na Figura 46 ilustra-se o sistema automático de lavagens, assim como a distribuição dos tanques no espaço de trabalho. Esta tarefa foi desenvolvida com o objetivo de obter as coordenadas de funcionamento do sistema.

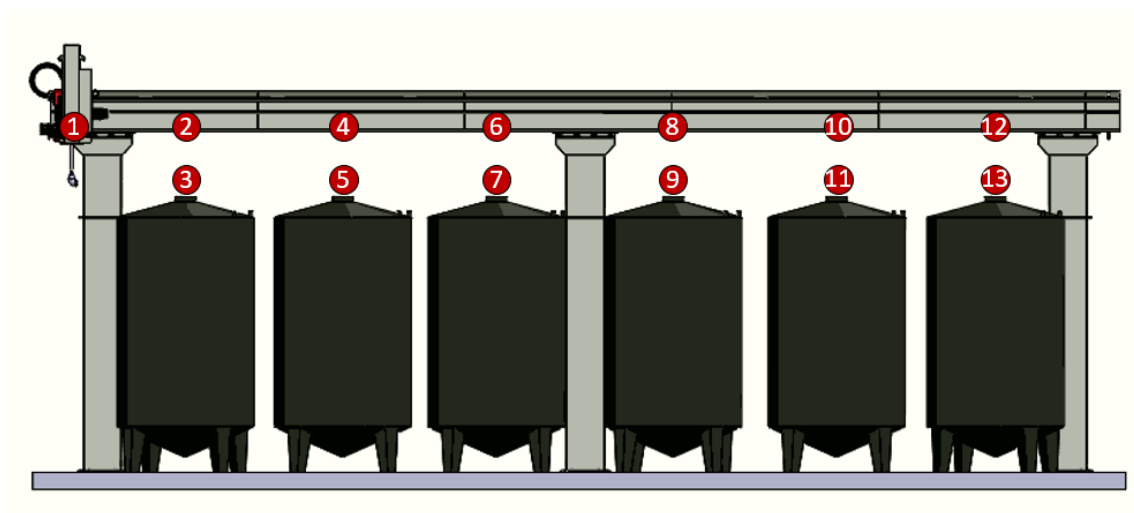


Figura 46- Definição das posições do elemento terminal do gantry robot.

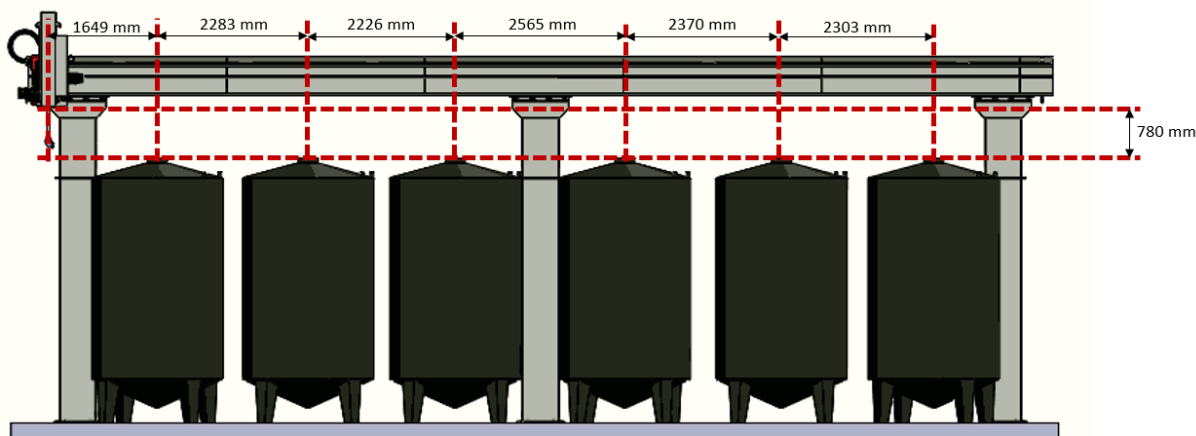


Figura 47 – Cotas dos pontos que definem as posições do elemento terminal do robot automático

A Figura 48 apresenta as distâncias entre pontos, através as quais é possível calcular as coordenadas dos pontos 1 a 13. Analisando as cotas descritas nesta figura, foi possível determinar as coordenadas absolutas desses pontos, em relação à posição home (0,0). As listas de como: $posX = [0 \ 1649 \ 3932 \ 6158 \ 8723 \ 11026 \ 13396]$ e $posY = [0 \ -780]$, respetivamente.

4.5.2 Algoritmo do modo de sequência automática

Após o operador verificar visualmente que as tampas dos tanques se encontram abertas, pode dar a instrução de início do ciclo, a partir da posição *home*. Neste ciclo (de sequência automática) o robot movimenta-se para a zona superior do 1º tanque, posição 2 (Figura 46), definida pelas coordenadas (1649,0). Assim que o dispositivo de lavagem atinge a posição 2, inicia o seu movimento descendente até à posição 3 (Figura 46) de coordenadas (1649,-780) de modo que a tampa do dispositivo de lavagem encoste à entrada do tanque. A deteção de que a tampa do dispositivo de lavagem e a entrada do tanque estão encostadas é realizada com recurso aos sensores de força (Figura 35).

Com o dispositivo de lavagem introduzido no tanque inicia-se o procedimento de lavagem. Após a conclusão do procedimento de lavagem, o dispositivo de lavagem inicia o movimento de subida e volta à posição 2 (Figura 46), coordenadas (1649,0).

Seguidamente, o dispositivo de lavagem desloca-se para a zona superior do tanque 2, posição 4 (Figura 46), definida pelas coordenadas (3932,0). Assim que chega a essa posição, inicia-se o movimento descendente até à posição 5 (Figura 46), definida pelas coordenadas (3932,780).

Com o dispositivo de lavagem introduzido no tanque inicia-se o procedimento de lavagem. Após a sua conclusão, o dispositivo de lavagem inicia o movimento de subida, e volta à posição 4 (Figura 46), nas coordenadas (3932,0).

Os procedimentos acima descritos são repetidos, consecutivamente, até todos os tanques estarem lavados. No final deste processo, o dispositivo de lavagem volta à posição *home*. Este procedimento está ilustrado no fluxograma de funcionamento Figura 48.

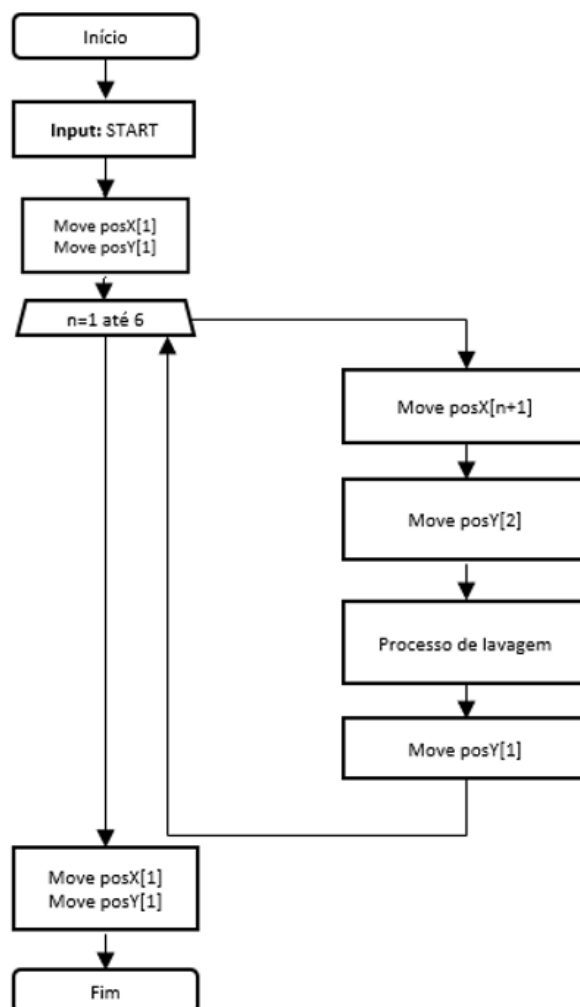


Figura 48 - Fluxograma do processo de funcionamento do modo sequência automática

4.5.3 Algoritmo do modo de seleção manual

O modo de funcionamento de seleção manual trata-se de uma parcela do fluxograma ilustrado na Figura 48. Nesse sentido, quando o modo manual se encontra selecionado (1, 2, 3, 4, 5 ou 6), indicando o tanque que é pretende lavar (Figura 49).

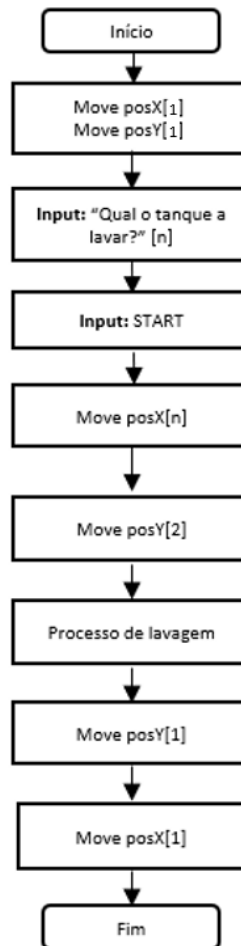


Figura 49 – Fluxograma do processo de funcionamento do modo seleção manual

4.5.4 Algoritmo do processo de lavagem

Assim que o dispositivo de lavagem de tanques de armazenamento é inserido no interior de um tanque, este desempenha um conjunto de ações anteriormente designadas por processo de lavagem. O processo de lavagem contempla 3 etapas: pré-lavagem com água, lavagem com água e detergente e enxaguamento com água. A sequência de ações necessárias para realizar este processo de lavagem estão representadas no fluxograma de funcionamento, apresentado na Figura 50 e detalhado na secção 5.1.

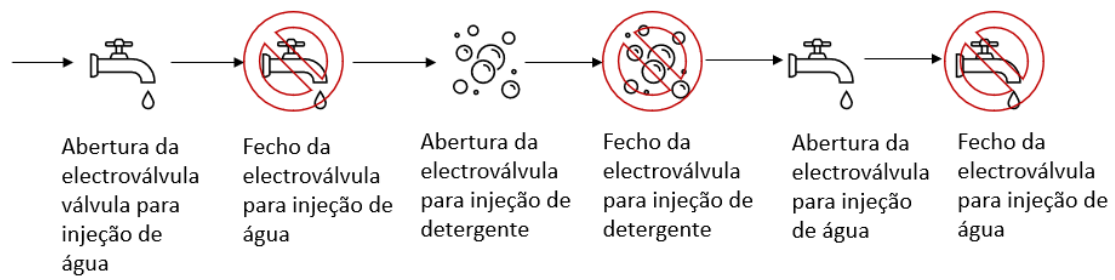


Figura 50 – Diagrama do processo de lavagem

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 50, o processo inicia-se com a abertura das electroválvulas que controlam a passagem de água, durante um determinado tempo definido para a pré-lavagem, fechando de seguida.

Após o fecho das válvulas de água, inicia-se o processo de lavagem, com a abertura das válvulas que fazem a admissão da solução de água e detergente, durante um determinado tempo, findo o qual são fechadas novamente. Finalmente, as electroválvulas que fazem a admissão de água voltam a abrir para controlar a admissão de água, durante um tempo pré-definido, fechando de seguida e dando por concluído a especificação do processo de lavagem. Os tempos de lavagem foram definidos e descrevem-se na secção 5.1.

Capítulo 5 – Projeto do sistema de lavagem

Este capítulo apresenta o projeto do sistema de lavagem e a definição dos perfis de lavagem a serem adotados. Nesse sentido, serão definidos os produtos de lavagem (água e detergente) a serem transportados e os procedimentos necessários para proceder à lavagem dos tanques de armazenamento. Posteriormente, será realizado um estudo comparativo entre o sistema de lavagem atualmente utilizado e o sistema de lavagem proposto.

5.1 Características dos fluidos de lavagem

Nesta secção serão determinados os produtos de lavagem a utilizar, assim como os parâmetros do procedimento de lavagem atual, nomeadamente: i) tempo de lavagem, ii) quantidade de detergente, iii) quantidade de água. De acordo com as informações obtidas na herdade, o processo de lavagem atual é composto por três etapas, cujos tempos de lavagem são detalhados ao longo da secção.

As principais propriedades químicas que um detergente de lavagem de tanques deverá possuir são seleccionadas com base no efeito provocado ao serem aplicadas na superfície a limpar. Assim, através do levamento destes efeitos como a emulsificação, humidificação, penetração, dispersão, suspensão e lavagem, é esperado uma compreensão do detergente selecionado, assim como do procedimento de lavagem.

De modo geral, as superfícies podem conter dois tipos de resíduos: solúveis e não solúveis na água. Devido às suas características, a água é uma substância particularmente adequada para fins de limpeza de superfícies, sendo frequentemente designada por solvente universal. Tem a capacidade de dissolver diversas substâncias, tanto inorgânicas (exemplo: minerais), como orgânicas (exemplo: vegetais e animais) (Safefood, 2012).

As superfícies com resíduos solúveis em água, como por exemplo o açúcar ou sal são facilmente lavadas, sem que haja muita dificuldade na sua remoção.

Já as superfícies cobertas por resíduos insolúveis apresentam problemáticas de grau mais elevado, quer sejam orgânicos ou inorgânicos. Os resíduos orgânicos são derivados de matéria animal ou vegetal (ex. óleo, gordura, proteínas, amido, hidratos de carbono) e

transformam-se em depósitos carbonizados, de difícil remoção, quando sujeitos à presença de calor em excesso (SafeFood, 2012). Os resíduos inorgânicos são derivados da crosta terrestre (ex. calcário).

Os resíduos podem ser ácidos ou alcalinos (básicos), sendo o seu valor definido entre 0 e 14, na escala de pH (Andrade, 2018). De acordo com esta escala (Figura 51), o valor 7 indica uma a presença de uma substância neutra (nem ácido, nem alcalina). Quando menor o valor do pH, mais ácida é a substância e será mais alcalina, à medida que o valor de pH for aumentando (Atkins et al., 2021).

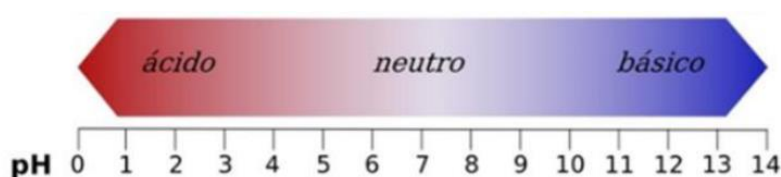


Figura 51 – Escala de pH.

Fonte: Antunes et al., 2018, adaptado

As substâncias ácidas mais comuns são: vinagre (ácido acético), ácido sulfúrico e ácido cítrico. Por outro lado, a soda cáustica (hidróxido de sódio) e carbonato de sódio são as substâncias básicas mais comuns. Independentemente do produto a ser lavado, os detergentes a utilizar nas lavagens devem possuir características, que se descrevem de seguida:

- **Emulsificação:** trata-se de uma ação mecânica de quebrar as ligações das gorduras e óleos e transformá-las em pequenas partículas, que são uniformemente misturadas com a água utilizada na lavagem (Barros et al., 2007);
- **Humidificação:** esta ação é utilizada na limpeza de superfícies sólidas, quando a solução aquosa entra em contacto com a superfície a limpar. A humificação da superfície permite diminuir a tensão superficial existente entre o resíduo e a superfície;
- **Penetração:** esta ação permite que a solução penetre em materiais porosos, fendas ou pequenos canais, tornando a lavagem mais eficaz;
- **Dispersão:** trata-se da ação de separar agregados em menores partículas, que são facilmente suspensas e eliminadas do equipamento a lavar;

- **Suspensão:** ação de reter partículas insolúveis numa solução e impedi-las de se depositarem de novo na superfície a lavar;
- **Lavagem:** trata-se de uma característica que permite reduzir as moléculas de proteínas insolúveis em moléculas menores e solúveis.

Para um detergente conter as propriedades atrás mencionadas deverá ser composto por uma mistura de substâncias (Figura 52) que se descrevem de seguida:

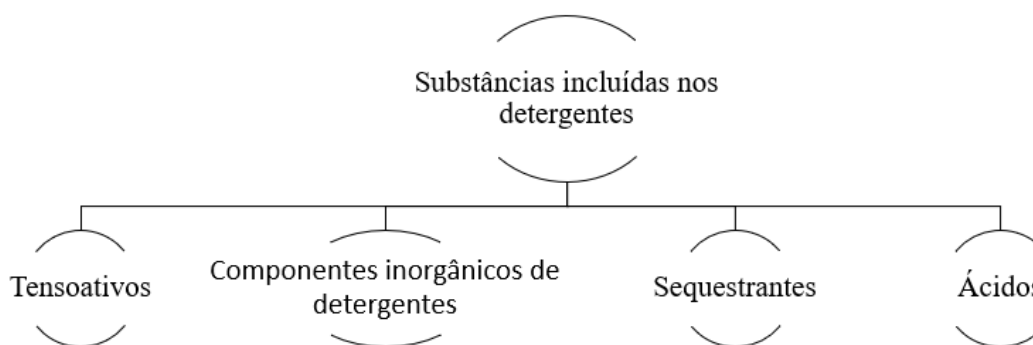


Figura 52 – Principais substâncias incluídas num detergente eficaz (Sansebastiano et al., 2007)

Tensoativos

A sua principal função das substâncias tensoativas é dissolver na água os depósitos oleosos e insolúveis em água (moléculas encontradas na maioria das superfícies a limpar). A molécula de um tensoativo tem duas partes distintas: um grupo hidrofílico, que permite dissolver-se na água e um grupo hidrofóbico insolúvel. Quando uma solução aquosa de um tensoativo está em contato com uma superfície de óleo (ou outra substância insolúvel), a parte hidrofóbica da molécula dissolve-se no óleo. Assim, o tensoativo retira o resíduo da superfície, usando a porção hidrofílica, tornando-o solúvel em água (Daltin, 2011).

O sabão é o agente tensoativo mais utilizado, contudo tem algumas desvantagens: a mais significativa, é porque reage fortemente com os sais de cálcio e magnésio dissolvidos em água, formando insolúveis. Esses compostos precipitam na forma de uma espuma, o que os torna muito difíceis de remover da superfície a limpar. O sabão tem ainda outra desvantagem por devido à sua natureza. Por ser uma substância alcalina, quando se mistura com soluções ácidas é neutralizado e perde sua propriedade ativa (Daltin, 2011).

Componentes inorgânicos dos detergentes

A componente inorgânica dos detergentes, na prática, é uma variedade de sais de sódio alcalino. A mistura de materiais alcalinos com aditivos resulta no que é, denominado, um detergente incorporado (Tamine, 2009). Sendo que os mais utilizados são a soda cáustica, carbonato de sódio e os silicatos.

A soda cáustica (hidróxido de sódio) tem um pH elevado (substância alcalina muito forte), sendo uma das substâncias químicas mais utilizadas, devido ao seu baixo custo e elevada resistência. Esta substância também é conhecida pela sua extrema ação corrosiva em muitas superfícies. Apesar de ser uma substância altamente tóxica e corrosiva, a soda cáustica é amplamente utilizada na limpeza de aplicações onde as soluções devem ser aplicadas por circulação de jatos, devido à sua rápida reatividade com muitos solos orgânicos (Gésan-Guiziu et al., 2007).

O carbonato de sódio é outra das substâncias mais presentes na composição de um detergente. Esta substância fornece alta alcalinidade e amolece a água pela precipitação de carbonatos de cálcio e magnésio.

Os silicatos também são bastante comuns nos detergentes e utilizados para lhes conferir propriedades específicas. Por exemplo, os silicatos suavizam a água pela formação de precipitados, que podem ser facilmente retirados pela água e tendem a não se depositar no fundo da superfície a ser limpa, a menos que esta seja aquecida. Os silicatos também são capazes de suspender os resíduos e evitar sua re-deposição (Gésan-Guiziu et al., 2007).

Sequestrantes

Nos compostos de um detergente, os sequestrantes são usados principalmente para evitar a precipitação de compostos geralmente incluídos na água, como o calcário. Quando utilizados em quantidades suficientes e nas condições certas, estes também têm um efeito de limpeza, pois ajudam na remoção de sujidade mais complexa (Bohrer, 2018).

Ácidos

Os ácidos mais comuns encontrados na limpeza são os ácidos inorgânicos, como o fosfórico ácido e ácido nítrico, ou os ácidos orgânicos, como o ácido cítrico. A introdução dos ácidos na limpeza foi um importante avanço pois permitiu a substituição da limpeza cáustica nas linhas de produtos alimentares (White & Rabe, 1970).

Foi solicitado a indicação do produto utilizado na herdade para a lavagem dos tanques de armazenamento (Figura 53), o produto em causa possui designação comercial de Carclin Shampoo Poly Fresh. Analisando os dados da Figura 53 é possível verificar a existência de hidróxido de potássio, sendo esta a base utilizada no detergente. Existe também a presença de Sodium-p-cumenesulphonate, aminoéтанol, silicato de sódio, entre outras substâncias.

Nome	Identificador do produto	%	Classificação de acordo com o regulamento (CE) n° 1272/2008 [CLP]
Potassium hydroxide	(n° CAS) 1310-58-3 (n° CE) 215-181-3 (Número de índice) 019-002-00-8 (N° REACH) 01-2119487136-33	<5	Acute Tox. 4 (Oral), H302 Skin Corr. 1A, H314 Met. Corr. 1, H290
Sodium-p-cumenesulphonate	(n° CAS) 15763-76-5 (n° CE) 239-854-6 (N° REACH) 01-2119489411-37	<5	Eye Irrit. 2, H319
2-Aminoethanol	(n° CAS) 141-43-5 (n° CE) 205-483-3 (N° REACH) 01-2119486455-28	<5	Acute Tox. 4 (Oral), H302 Acute Tox. 4 (Dermal), H312 Acute Tox. 4 (Inhalation), H332 Skin Corr. 1B, H314 STOT SE 3, H335 Aquatic Chronic 3, H412
Sodium metasilicate pentahydrate	(n° CAS) 10213-79-3 (n° CE) 229-912-9 (N° REACH) 01-2119449811-37	<5	Met. Corr. 1, H290 Acute Tox. 4 (Oral), H302 Skin Corr. 1B, H314 Eye Dam. 1, H318 STOT SE 3, H335
Poly(oxy-1,2-ethanediyl), ,alpha.-tridecyl-.omega.-hydroxy-, branched	(n° CAS) 69011-36-5 (N° REACH) Polymer	<5	Eye Irrit. 2, H319 Aquatic Chronic 3, H412
Amine, C12-C14 alkyl, ethoxylated	(n° CAS) 61791-14-8 (N° REACH) Polymer	<5	Acute Tox. 4 (Oral), H302 Eye Dam. 1, H318

Figura 53 – Caraterísticas do produto utilizado para efetuar a lavagem do tanques Fonte: Synerlogic & Barroso, 2020.

O detergente acima ilustrado foi validado pela empresa que fabrica a cabeça de lavagem a ser utilizada (Alfa Laval) e que possui uma vasta experiência no ramo da lavagem de tanques de armazenamento. Além disso, foi consultada uma empresa com grande experiência na lavagem de cisternas rodoviárias (alimentares e não-alimentares), a

Carmona SA (Sociedade Anónima), tendo se constatado que utilizavam um detergente com as mesmas características na lavagem das cisternas que transportam vinho. Uma vez que a Carmona SA já utiliza cabeças rotativas para efetuar a lavagem de cisternas com transporte de vinho, com elevado grau de certeza, foi possível concluir que este detergente pode ser utilizado com a nova solução proposta (lavagem com cabeça rotativa).

Além das substâncias que podem estar incluídas na composição de um determinado detergente, também é importante realizar uma análise aos fatores que podem afetar o seu desempenho. Por outras palavras, devem ser analisados os processos de lavagem e averiguar as consequências na qualidade da mesma. Na Figura 54 estão ilustrados alguns dos fatores que também devem ser ditos em consideração durante o planeamento de um procedimento de lavagem.

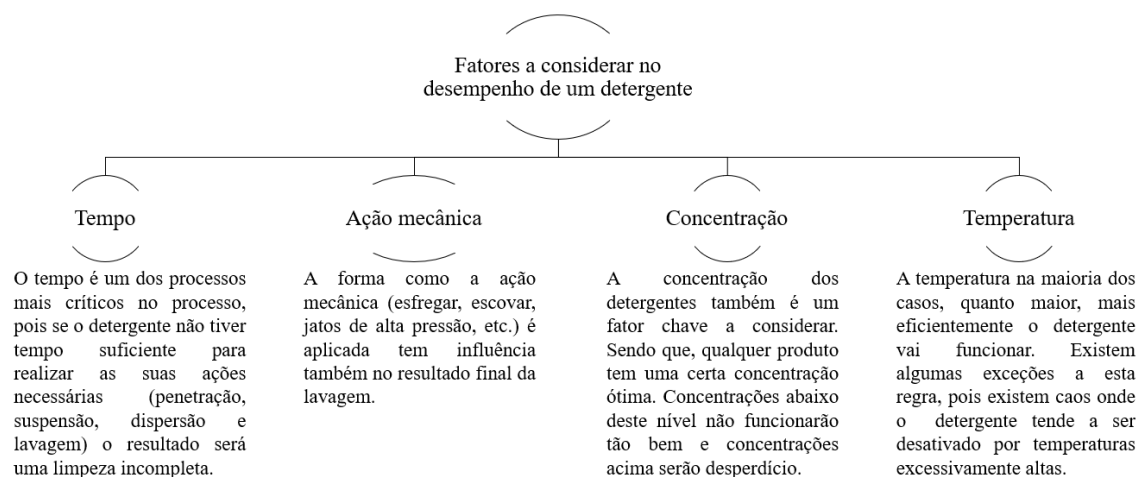


Figura 54 – Fatores a considerar no desempenho de um detergente de lavagem.

FONTE: adaptado de (Tamine, 2009).

Desta forma, para uma maior eficácia de um processo de limpeza é necessário otimizar a combinação dos processos anteriores. De modo geral, quando uma variável for alterada, as outras três também terão de ser, de modo a compensar a alteração da primeira. Por exemplo, se a temperatura da água não for suficiente alta para um determinado procedimento de lavagem, o tempo, a concentração química ou a ação mecânica terão que ser alterados (aumentados). Contudo, existem parâmetros mínimos que terão sempre de ser cumpridos, pois caso contrário, a compensação através dos restantes parâmetros poderá não ser traduzida numa lavagem eficiente (Technologies, 2021).

Dependendo do tipo de elemento terminal a ser utilizado, o contributo de cada um dos fatores terá uma ponderação diferente, em relação ao contributo global de todos os fatores.

A aplicação de produtos químicos ou agentes de lavagem corretos, assim como a temperatura ideal na superfície do tanque, enfraquece a ligação entre a sujidade e a superfície. Isto revela-se importante pois a força desta ligação traduz-se também na força necessária para remover a sujidade. O tempo, a concentração química e a temperatura podem ser obviamente ser controlados.

Qualquer tecnologia de lavagem aplica força (ação mecânica) à superfície do tanque. Contudo, esta pode ser aplicada de diferentes formas e graus de eficiência. O nível de eficiência para as diferentes tecnologias é determinado pela força de impacto (força mecânica) e força de corte, que diferem significativamente entre as tecnologias (Technologies, 2021).

Um outro fator que muitas vezes é esquecido no planeamento de um procedimento de lavagem é a proporção entre detergente e sujidade. Assim, é necessário garantir que existe uma solução com detergente suficiente para fazer a lavagem. Ou seja, quanto maior o volume de sujidade, maior será a quantidade de detergente necessária (Nangpal, 2000).

Funcionamento de um detergente

De acordo com (Tamine, 2009) existem quatro abordagens para remover a sujidade de uma superfície a lavar: reação química, limpeza com solvente, limpeza abrasiva e dispersão-suspensão. Nesse sentido a:

- Reação química torna possível alterar quimicamente a estrutura de alguns tipos de substâncias insolúveis para que estas se tornem solúveis em água e, portanto, facilmente removidas. O exemplo mais comum deste tipo de limpeza é a remoção de calcário dos elementos de aquecimento em tanques de limpeza. Nestes casos, é normalmente utilizado um tipo de detergente ácido que reage com os depósitos de calcário para formar subprodutos solúveis em água, que são facilmente lavados.
- Limpeza com solvente tem como melhor exemplo a remoção do açúcar através da passagem de água. Por exemplo, na indústria do transporte, solventes de limpeza

à base de petróleo são usados para limpeza de motores, caixas de velocidade, etc. Nestes casos, o princípio de lavagem é o mesmo.

- Limpeza abrasiva refere-se ao uso de abrasivos para limpeza representando uma ação mecânica em vez da aplicação de um produto químico. Os exemplos de abrasivo podem ser o jato de areia, que é muito eficaz, ou a utilização de detergentes domésticos em pó.
- Limpeza dispersão – suspensão é uma técnica onde a natureza química do resíduo não é alterada pois, a lavagem efetua-se com uma solução à base de água. Esta é usada para remover resíduos insolúveis em água. Se a camada de resíduos for muito espessa, esta deve ser penetrada através da utilização de produtos químicos que reduzem a tensão superficial da água, de modo que esta se possa rapidamente penetrar pela camada de resíduos. Assim, a solução detergente também deve levantar os resíduos e, uma vez removidos da superfície, estes devem ser suspensos na solução de limpeza. Não devendo haver re-deposição no local já limpo ou no fundo do tanque.

Nas instalações da herdade alvo de estudo é, atualmente, utilizado um detergente alcalino (Figura 53) para a lavagem dos tanques de armazenamento de vinho e um procedimento de lavagem que se apresenta na Tabela 12.

Tabela 12 – Procedimento de lavagem atual

Etapa	Produto	Tempo (min)
1º	Água potável (70º)	2
2º	Detergente	2
3º	Água potável (70º)	2

As etapas do procedimento de lavagem que a herdade da Malhadinha Nova pratica foram validadas pela empresa que fabrica a cabeça de lavagem a ser utilizada e que possui uma vasta experiência no ramo da lavagem de tanques. Além disso, na Carmona SA, também se verificou que as etapas do processo de lavagem utilizadas para a lavagem dos camiões que transportam vinho são as mesmas que as utilizadas na herdade da Malhadinha Nova. Por estes motivos, considerou-se válido manter as etapas do procedimento de lavagem atualmente em funcionamento. Contudo, em relação aos tempos de lavagem existem ajustes que devem ser realizados tendo em conta a nova solução para o elemento terminal (cabeça de lavagem rotativa).

No caso da cabeça de lavagem selecionada (Alfa Laval Multijet 25) o padrão de lavagem repete-se aproximada em cada 8 minutos de lavagem, embora esse tempo possa variar ligeiramente, dependendo da pressão debitada pela bomba e do diâmetro do *nozzle* selecionado. A experiência da Alfa Laval sugeriu que meio padrão de lavagem (4 minutos) seria suficiente para que as paredes dos tanques de armazenamento de vinho ficassem cobertas de água e detergente, de forma a garantir uma limpeza eficaz. Seguindo as indicações da Alfa Laval, o tempo total de lavagem de um tanque será de 12 minutos (4 minutos de pré-lavagem com água, 4 minutos de lavagem com água e detergente e 4 minutos de enxaguamento com água). Desta forma, o tempo utilizado para a lavagem de cada tanque passa de 6 minutos para 12 minutos. Contudo, segundo os estudos descritos na secção 2.1.2, o tempo de lavagem diminui quando comparada uma lavagem com recurso a uma cabeça de lavagem rotativa em relação a uma lavagem com recurso a uma bola fixa. Nesse sentido, questionou-se a Alfa Laval sobre a problemática em questão, sendo que foi justificado de que os 4 minutos por etapa seria um resultado dado por excesso. Contudo, seria importante que após a implementação do elemento terminal, fossem efetuados testes, com a previsão de ser possível reduzir o tempo por etapa do procedimento de lavagem. Ainda assim, para efeitos de calculo, uma vez que ainda não foram realizados nenhuns testes à cabeça de lavagem, foram utilizados 4 minutos por etapa no procedimento de lavagem.

Nos 4 minutos de funcionamento da cabeça de lavagem, os jatos realizarão o padrão ilustrado na Figura 55. Este padrão foi obtido com o apoio da Alfa Laval de acordo com as dimensões de um tanque da herdade da Malhadinha Nova, através de um software da própria organização.

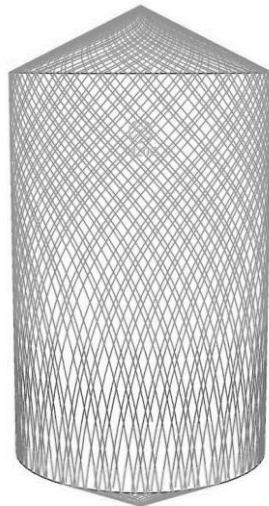


Figura 55- Padrão formado pelos jatos na superfície do tanque durante 4 minutos de funcionamento

5.2 Cálculo da perda de carga na rede dos fluidos de lavagem

A limpeza dos tanques envolve a projeção de água e detergentes líquidos sobre as superfícies interiores com resíduos. Assim para a limpeza ocorrer é necessário projetar o líquido contra a superfície dos tanques a limpar. Portanto, é importante compreender os princípios da estática dos fluidos e, principalmente, da dinâmica dos fluidos. Desta forma, para se realizar o dimensionamento da bomba adequada será necessário determinar a pressão e o caudal que esta terá de debitar. A pressão a debitar terá de compensar todas as perdas de carga ao longo da rede e ser suficiente para garantir os requisitos de funcionamento do elemento terminal (cabeça de lavagem rotativa). Neste contexto, será necessário calcular a perda de carga, tendo em conta as características da rede. Na Figura 56 está ilustrado o diagrama representativo do sistema a dimensionar, onde estão representados os tanques de água e detergente, as bombas, a tubagem e os restantes componentes da rede. O conjunto no interior do retângulo vermelho apresenta os componentes a serem dimensionados no atual documento.

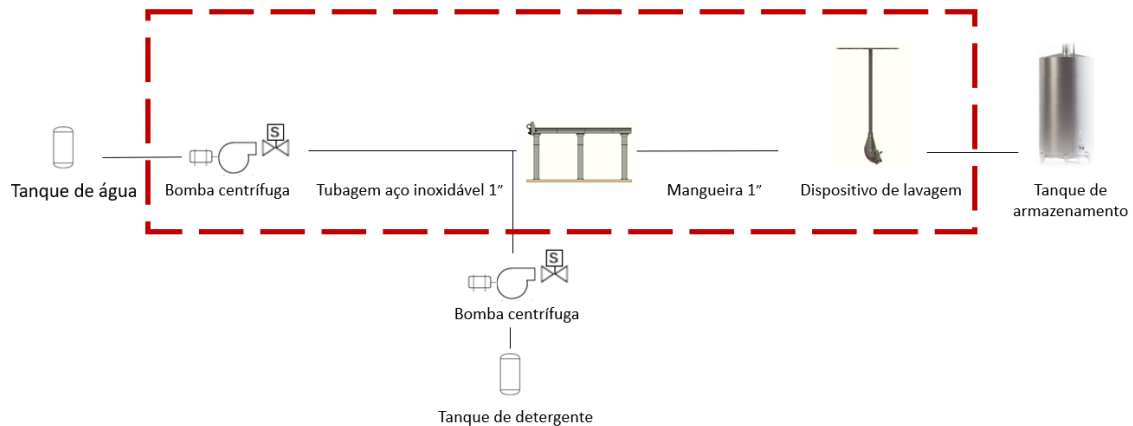


Figura 56 – Diagrama do sistema para efetuar a lavagem dos tanques de armazenamento

Tal como referido anteriormente, uma boa limpeza dos tanques depende também da qualidade do jato projetado pela cabeça de lavagem. As características deste jato dependem de a bomba fornecer o caudal e a pressão desejada, tendo em conta as perdas de carga associadas ao sistema. Durante o armazenamento de um produto, irão formar-se depósitos do mesmo. A sua remoção eficaz é essencial para garantir a segurança e qualidade dos produtos armazenados.

Na análise das perdas de carga do circuito de lavagem, desde a bomba até à cabeça de lavagem, assume-se que a cabeça de lavagem garante uma boa lavagem com uma pressão de 3 bar e um caudal de 5,7 m³/h (estudo efetuado na secção 3.5).

O transporte de um fluido ao longo de um tubo ou através de um componente (ex: válvulas, curvas, derivações, entre outros) implica a existência de uma perda de pressão (L. A. Oliveira, 2020). Assim a diferença de pressão entre um ponto 1 (P_1) e um ponto 2 (P_2) existentes na rede é determinada pela equação abaixo:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad 5.1$$

A pressão pode ser expressas em metros de coluna de água (altura), traduzindo-se na equação abaixo:

$$\frac{\Delta P}{\rho \times g} = \Delta h \quad 5.2$$

Sendo,

- ρ – Densidade da água (Kg/m^3)
- g – Aceleração gravítica (m/s^2)
- h – Altura de coluna de água (m)

Existem fatores que terão de ser tidos em conta no dimensionamento da bomba relacionados com o fluido a ser utilizado como: temperatura, caudal volúmico, densidade, gravidade específica, viscosidade (L. A. Oliveira, 2020). Estes fatores têm influência no cálculo da perda de carga, que, por sua vez, tem influência no dimensionamento da bomba.

Dado que os fluídos de lavagem são estudados como incompressíveis, o caudal volúmico mantém-se constante ao longo da rede do circuito de lavagem. Assim, a alteração da secção por onde circula o fluido de lavagem implica uma variação na velocidade do escoamento, inversamente proporcional, dada pela seguinte expressão:

$$v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 \quad 5.3$$

Onde,

- v – Velocidade do escoamento (m/s)
- A – Área da secção transversal do escoamento (m^2)

Mais uma vez, para o desenvolvimento da problemática em questão será realizado o cálculo com recurso à equação de Bernoulli, tal como ocorreu aquando da análise da força provocada pelos fluídos de lavagem, realizada na secção 3.8.

A bomba de circulação encontra-se afastada do espaço dos tanques, para onde está a ser projetado o sistema robótico. Nesse sentido, foi definido que o fluido de lavagem passa por uma tubagem em aço inoxidável ao longo das paredes do armazém das instalações e, nas proximidades do sistema robótico, passará a circular numa mangueira, que o levará até à cabeça de lavagem. A ligação entre a tubagem rígida e a mangueira será realizada por acessórios a serem definidos na Secção 5.2. Assim, o percurso a ser realizado deve ter em consideração, tal como sugerido na Figura 57, que:

- O troço da tubagem em aço inoxidável com diâmetro $d_A = 1"$, inicia-se na bomba, ao nível do piso (cota $Z_1 = 0 \text{ m}$), e termina numa das extremidades do *gantry robot*, numa altura $Z_2 = 6,2 \text{ m}$;

- A mangueira que transporta os fluidos ao longo do sistema robótico tem diâmetro $d_m = 1''$;
- A mangueira deve ter o comprimento necessário para estender-se até à outra extremidade do *gantry robot* e seguir até ao elemento terminal de lavagem, que se encontra na cota $Z_3 = 4\text{ m}$;
- O deslocamento máximo longitudinal do *gantry robot* é de 12 m ;
- A ligação da tubagem em aço inox à mangueira encontra-se a 2 m do *gantry robot*;

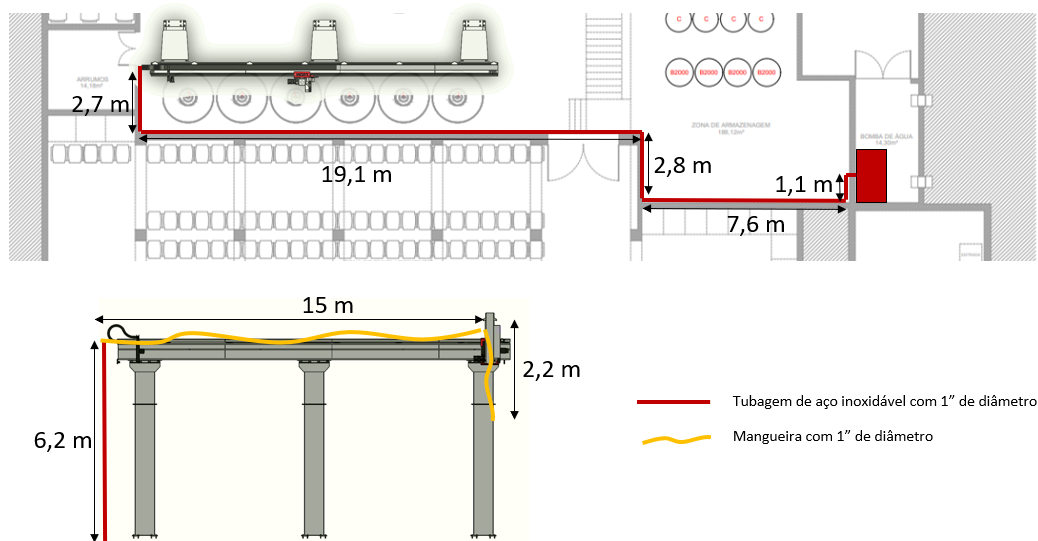


Figura 57 - Representação esquemática do circuito de lavagem.

O cálculo da perda de carga será realizado considerando os seguintes requisitos de projeto:

- Caudal debitado pela cabeça de lavagem: $Q = 5,7\text{ m}^3/\text{h}$;
- Pressão do fluido (água) na cabeça de lavagem: $P = 3\text{ bar}$;
- Temperatura do fluido (água): $T = 70\text{ }^\circ\text{C}$;

Dado que o circuito da rede de fluidos é constituído por dois troços de tubagens diferentes foi calculado o comprimento total de cada um deles como se segue:

$$L_A = 1,1 + 7,6 + 2,8 + 19,1 + 2,7 + 6,2 = 39,5\text{ m}$$

$$L_M = 15 + 2,2 = 17,2\text{ m}$$

5. 4

Onde,

- L_A – Comprimento total da tubagem de aço inoxidável (m)
- L_M – Comprimento total da tubagem de mangueira (m)

O fluido de lavagem, composto por uma solução de água e detergente, tem propriedades muito específicas que seriam possíveis de verificar com testes em laboratório. Assim, uma vez que o fluido de lavagem é composto maioritariamente por água, assume-se que as propriedades do fluido de lavagem se assemelham às da água, desprezando-se a influência provocada pela adição do detergente. Assim, considerando-se que os fluidos de lavagem se encontram à temperatura de 70°C, com recurso a uma aplicação online, “*Engineering ToolBox*” (*Engineering ToolBox*, 2001), obtiveram-se os valores de densidade e viscosidade são respetivamente $\rho = 971,79 \text{ Kg/m}^3$ e $\mu = 0,000355 \text{ Ns/m}^2$.

5.2.1 Cálculo do número de Reynolds

Quando um fluido se desloca ao longo de um tubo, o fluxo pode ser laminar ou turbulento (L. A. Oliveira, 2020). O tipo de fluxo pode ser distinguido através de uma grandeza adimensional designada como número de Reynolds (Re), que representa a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas que atuam sobre o fluido. Quando as forças inerciais são predominantes, o fluxo designa-se turbulento. Por outro lado, quando predominam as forças viscosas, o fluxo é laminar. O cálculo é efetuado através da seguinte expressão:

$$Re = \frac{\rho \times d \times v}{\mu} \quad 5.5$$

Onde,

- ρ – Densidade (Kg/m^3);
- d – Diâmetro (m);
- v – Velocidade do escoamento (m/s);
- μ – Viscosidade dinâmica do fluido em (Ns/m^2).

Se o número de Reynolds for inferior 2000, o fluxo é laminar, caso seja superior a 4100, o fluxo designa-se por turbulento.

Tendo em conta que a tubagem em aço inox e a mangueira têm o mesmo diâmetro, a área da secção do escoamento (A) é igual em ambas. Assim, de acordo com a equação da continuidade do movimento, a velocidade do escoamento na tubagem em aço inoxidável, v_a , e na mangueira, v_m é igual ($v_a = v_m$) e calculada como se segue:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{5,7}{\pi \times \left(\frac{25,4 \times 10^{-3}}{2}\right)^2 \times 3600} = 3,1 \text{ m/s} \quad 5.6$$

Assim, tendo em conta a velocidade de escoamento (v) obtida a partir da equação 5. 6), o número de Reynolds em ambas as tubagens se mantêm iguais, sendo é calculado pela equação 5. 7), como se segue:

$$Re = \frac{\rho \times d_t \times v}{\mu} = \frac{971,79 \times 25,4 \times 10^{-3} \times 3,1}{0,000355} = 217266,5 \quad 5.7$$

5.2.2 Cálculo do fator de atrito

O cálculo da perda de carga nas tubagens provocada pelo atrito do fluido ao passar pelas paredes internas do tubo necessita da determinação do fator de atrito (Moura, 2014).

O fator de atrito pode ser determinado através de um método gráfico, diagrama de Moody, com base no número de Reynolds e na rugosidade relativa da tubagem. Dado que este método não permite retirar um valor de elevado rigor, foi utilizado uma metodologia analítica.

Segundo (Ćojbašić & Brkić, 2013), a equação de Colebrook-White tem como objetivo o cálculo do fator de atrito de forma precisa, sendo referenciada enumeras vezes e utilizada para determinar o seu valor no regime turbulento do diagrama de Moody (Muzzo et al., 2019). Assim, a equação de Colebrook-White é válida para um vasto leque de valores no número de Reynolds (2320 a 10^8) e rugosidades relativas (10^{-6} a 0,05).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \times d} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right) \quad 5.8$$

A determinação do fator de atrito através da equação de Colebrook-White é realizada através de um processo iterativo, porque a grandeza está presente nos dois membros da

equação, sem a possibilidade de ser explicitada em relação às demais grandezas, através de uma expressão numérica. Neste sentido, foram considerados os coeficientes de rugosidade da tubagem da tabela que se apresenta na Figura 58, onde se obteve um coeficiente de rugosidade de $\varepsilon_t = 0,002$ para o tubo e de $\varepsilon_m = 0,01$ para a mangueira.

Material	Roughness, ε	
	ft	mm
Glass, plastic	0	0
Concrete	0.003–0.03	0.9–9
Wood stave	0.0016	0.5
Rubber, smoothed	0.000033	0.01
Copper or brass tubing	0.000005	0.0015
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Wrought iron	0.00015	0.046
Stainless steel	0.000007	0.002
Commercial steel	0.00015	0.045

Figura 58 - Coeficientes de rugosidade para diferentes materiais (Wikibooks, 2017)

Uma vez calculado o número de Reynolds e determinadas as rugosidades da tubagem, determinaram-se os fatores de atrito no tubo de aço inoxidável e na mangueira que verificam a equação de Colebrook-White. Os fatores de atrito foram determinados de forma iterativa, com recurso ao *software* de cálculo Maple[®], sendo os resultados de cada troço da rede ilustrados na Tabela 13.

Tabela 13- Resultados obtidos para o fator de atrito

Troço	Reynolds	Diâmetro [mm]	Rugosidade [mm]	Fator de atrito
Tubagem em aço inox	217266,5	25,4	0,002	0,018
Mangueira	217266,5	25,4	0,01	0,020

O cálculo da perda de carga é realizado seguido o princípio de Bernoulli, definido na equação 5. 9).

Dado que se trata de um escoamento real, torna-se relevante adicionar a soma das perdas de carga, identificadas na equação por λ . A equação de Bernoulli com a adição das perdas de carga toma a seguinte forma:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \sum \lambda \quad 5.9$$

Onde:

- P – Pressão (Pa)
- z – Altura em relação ao solo (m)
- ρ – Densidade do fluido (Kg/m^3)
- g – Gravidade (m/s^2)
- $\sum \lambda$ – Soma das perdas de carga existentes na tubagem (Pa)

Sendo que a soma das perdas de carga na tubagem, $\sum \lambda$, contabiliza as distribuídas ao longo da tubagem e as localizadas, provocadas pelos restantes componentes do circuito.

5.2.3 Cálculo da perda de carga linear

A perda de carga linear, ΔP_{linear} , representa a perda de pressão por fricção de um escoamento numa tubagem com comprimento L e diâmetro d e velocidade v , (Moura, 2014), sendo calculada pela seguinte equação:

$$\Delta P_{linear} = f \times \frac{L}{d} \times \frac{\rho \times v^2}{2}. \quad 5.10$$

Aplicando a equação (5. 10), determina-se uma perda de carga linear de 0,2627 bar na tubagem em aço e de 0,1133 bar na mangueira.

5.2.4 Cálculo da perda de carga localizada

A perda de carga localizada, $\Delta P_{localizada}$, representa a perda de pressão existente quando um fluido de densidade ρ , e velocidade de escoamento v , atravessa um componente com um coeficiente de perda de carga k , sendo calculada, através da seguinte equação 5. 11.

$$\Delta P_{localizada} = \frac{k \times \rho \times v^2}{2} \quad 5.11$$

Assim, para determinar as perdas localizadas nos vários componentes da rede é necessário determinar o coeficiente k de cada um deles. Analisando a rede de fluidos, com base na planta do edifício, os componentes que terão de ser contabilizados são os seguintes:

- 2 válvulas de solenoide (que serão usadas para controlar a admissão de água e dos produtos de lavagem,), considerando-as como comporta aberta;
- 7 curvas a 90°;
- 2 medidores de caudal;
- 2 medidores de pressão;

Os coeficientes de perda de carga localizada destes componentes são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Coeficientes de perda de carga em componentes (Dandara, 2019)

PEÇAS QUE OCASIONAM A PERDA	K
Ampliação gradual	0,30
Bocais	2,75
Comporta aberta	2,50
Controlador de vazão	2,50
Cotovelo de 90°	0,90
Cotovelo de 45°	0,75
Crivo	0,40
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Curva de 22,5°	0,10
Entrada normal em canalização	0,50
Entrada de borda	1,00
Pequena derivação	0,03
Junção	0,40
Medidor Venturi	2,50
Redução gradual	0,15
Registro de ângulo aberto	5,00
Registro de gaveta aberto	0,20
Registro de globo aberto	10,0
Tê, passagem direta	0,60
Tê, passagem de lado	1,30
Tê, saída de lado	1,30
Tê, saída bilateral	1,80
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,50
Velocidade	1,00

Para a mangueira foram contabilizados 2 acopladores rápidos nas extremidades da mangueira. Para determinar a perda de carga nos acopladores rápidos foi utilizado o gráfico ilustrado na Figura 59, obtido a partir do catálogo do fabricante (Parker, 2021).

Uma vez que o gráfico foi elaborado com unidades imperiais, para determinar a perda de carga é necessário efetuar a conversão do caudal para essas unidades: $Q = 5,7 \frac{m^3}{h} = 25,1 \text{ US gpm}$. Tendo em conta que a mangueira tem um diâmetro $d_m = 1''$, analisando o gráfico da Figura 59, obtém-se uma perda de carga de 7 PSID = 0,48 bar (aproximadamente). Como existem 2 acopladores rápidos na mangueira, a perda de carga total é de 0,96 bar.

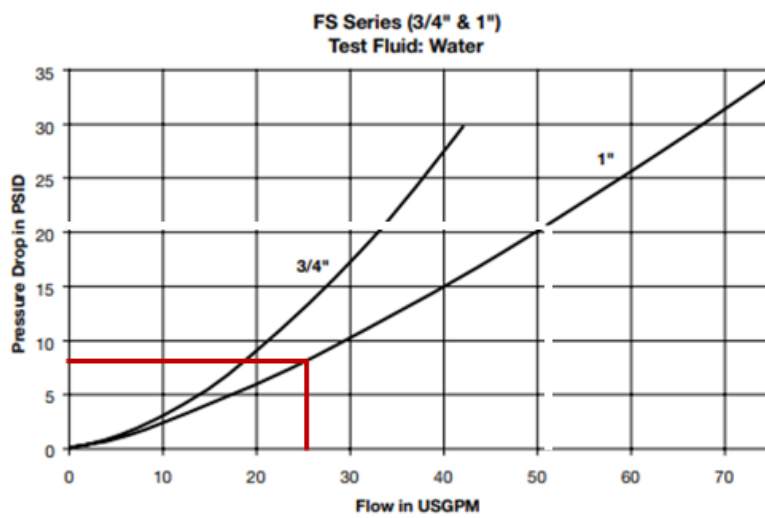


Figura 59 - Perda de carga nos ligadores rápidos (Parker, 2021)

Assim, conhecendo os coeficientes de perda de carga de todos os componentes da tubagem, é possível determinar o coeficiente de perda de carga total através da expressão 5. 12.

$$k_{tubagem} = 7 \times 0,4 + 2,5 \times 2 + 2,5 \times 2 + 2,5 \times 2 = 17,8 \quad 5. 12$$

Através do cálculo anterior foi possível determinar a perda de carga localizada, aplicando a equação 5. 11. Para isso, foi considerando as velocidades obtidas na equação 5. 6, os coeficientes de perda de carga obtidos na equação 5. 12 e a perda de carga dos acopladores rápidos de 0,96 bar. Assim sendo, a soma das perdas de carga localizada é de: $\Delta P_{lt} = 0,18 \text{ bar}$ e $\Delta P_{lm} = 0,15 + 0,96 \text{ bar} = 1,11 \text{ bar}$

5.2.5 Cálculo da perda de carga total ao longo da tubagem

Tal como referido anteriormente, a perda de carga ao longo de uma tubagem é obtida pela soma das perdas de carga distribuídas e localizadas a adicionar à perda de pressão determinada pela equação de Bernoulli como indica a expressão 5. 13.

$$\Delta P = \rho \times g(z' - z) + \Delta P_{linear} + \Delta P_{localizada}$$

$$\Delta P = \rho \times g(z' - z) + f \times \frac{L \times \rho \times v^2}{D} + \frac{k \times \rho \times v^2}{2} \quad 5. 13$$

O resultado da perda de carga nos dois troços (aço inoxidável e mangueira) é detalhado na Tabela 15, onde se verifica que a perda de carga total do circuito é de, aproximadamente, 4 bar. O detalhe dos cálculos encontra-se no (Anexo II).

Tabela 15 - Resultados detalhados do cálculo de perdas de carga

Troço	Δz [m]	f	L [m]	D [m]	v [m/s]	k	ΔP ΔZ [bar]	ΔP linear [bar]	ΔP localizada [bar]	ΔP total [bar]
Tubo de aço inoxidável	6,2	0,016	39,5	$25,4 \times 10^{-3}$	3,12	17,8	0,59	1,18	0,84	2,61
Mangueira	4	0,018	17,2	$25,4 \times 10^{-3}$	3,12	0,15	-0,21	0,58	0,07	0,44
Ligadores	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96	0,96
Total										4,01

Como descrito anteriormente, a motivação do cálculo da perda de carga tem como base o dimensionamento da bomba a fazer parte do sistema. Nesse sentido, atendendo à pressão de funcionamento da cabeça de lavagem de 3 bar, a bomba a seleccionar deverá debitar um caudal de $5,7 \text{ m}^3/\text{h}$, com uma pressão mínima de 7 bar.

5.3 Seleção da bomba da água de lavagem

O estudo realizado previamente sobre o cálculo da perda de carga do sistema teve como objetivo a determinação da seleção da bomba do sistema de lavagem. Concluiu-se que a bomba a seleccionar deve debitar água com um caudal de $5,7 \text{ m}^3/\text{h}$ a uma pressão de 7,1 bar, necessária para projetar a água de acordo com as condições de operação da cabeça de lavagem descrita na secção 3.3.

Para a seleção a bomba foi realizado um estudo de mercado com o objetivo de selecionar uma organização com capacidade de fornecimento de bombas. Entre as várias empresas abordadas foi evidente um bom feedback acerca da empresa Efaflu[®], que rapidamente se demonstrou disponível para marcar uma reunião no sentido de dar a conhecer a sua gama de produtos, assim como partilhar conhecimento acerca do software de dimensionamento. Nesse sentido, o dimensionamento da bomba foi efetuado com recurso a um software que esta organização disponibiliza numa plataforma online (Efaflu, 2021).

Nesta aplicação considerou-se que a bomba a seleccionar teria uma aplicação de pressurização, sendo necessário, como requisitos, um caudal de 5,7 m³/h a uma pressão de 7,1 bar. Através da plataforma online da Efaflu[®] foi possível obter uma lista com as bombas disponíveis que satisfazem os requisitos de caudal e pressão (Figura 60).

EQUIPAMENTO	CAUDAL	PRESSÃO	RENDIMENTO GLOBAL	POTÊNCIA MOTOR	NPSH	VER	VER
BMVE 4-12 (2900 rpm)	5.88 m ³ /h	75.57 m	52 %	2.2 kW	1.3 m		
BMVE 4-14 (2900 rpm)	6.20 m ³ /h	83.89 m	52 %	3 kW	1.4 m		
BMVE 4-16 (2900 rpm)	6.48 m ³ /h	91.87 m	52 %	3 kW	1.5 m		
BMVE 4-19 (2900 rpm)	6.79 m ³ /h	100.89 m	51 %	4 kW	1.6 m		
BMVE 4-22 (2900 rpm)	7.04 m ³ /h	108.20 m	49 %	4 kW	1.6 m		

Figura 60 - Gama de produtos que respondem aos critérios de seleção da Efaflu[®]

A Figura 60 apresenta os equipamentos que correspondem aos critérios de seleção pré-indicados (caudal e pressão). Uma vez que no âmbito do presente projeto a poupança de recursos energéticos, é uma questão relevante, na Figura 60 distribuiu-se as bombas por ordem crescente relativamente à potência do motor. Assim, procurou-se seleccionar a bomba que possui o ponto de funcionamento mais próximo do ponto de funcionamento requerido (caudal e pressão) e com a potência de motor mais baixa. Assim, seleccionou-se a bomba BMVE 4-12, que possui um ponto de funcionamento com débito de 5,88 m³/h de caudal e 75,57 m de altura manométrica, cuja curva característica e ponto de funcionamento são apresentados na Figura 61. O peso da bomba é de 38 Kg e pode funcionar com fluído a uma temperatura máxima de 120°C, valor bastante acima da temperatura máxima prevista para a água de lavagem (70°C).

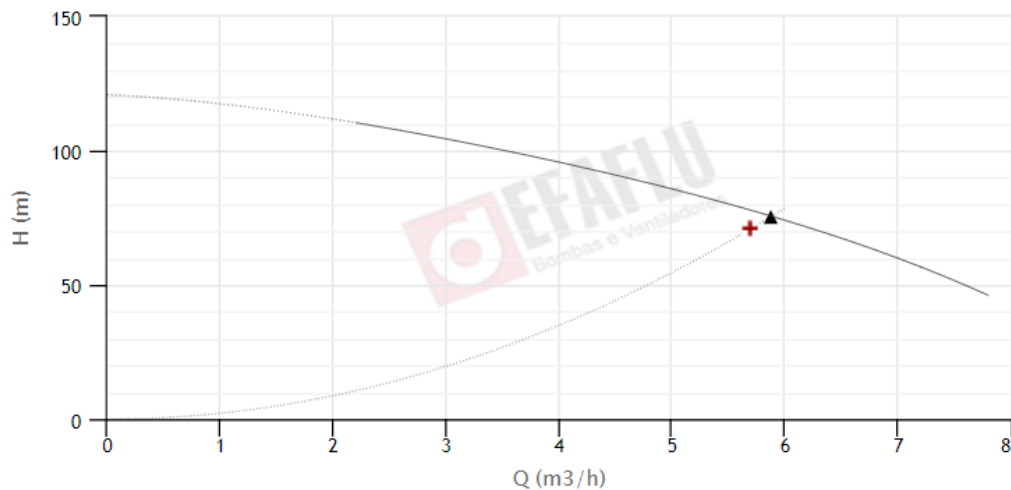


Figura 61 - Curva característica da bomba selecionada

5.4 Estudo energético acerca do elemento terminal de lavagem.

Atualmente as entidades governamentais estão cada vez mais consciencializadas da importância de se regerem por políticas sustentáveis. Segundo (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987), “o desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades”. Nesse sentido, é importante garantir que são realizados esforços, pessoais e nas empresas que vão de encontro a este paradigma.

Em Portugal existem apoios para empresas associadas na jornada para a sustentabilidade, promovendo o impacto positivo para *stakeholders*, para a sociedade e para o ambiente. O BCSD (*Business Council for Sustainable Development*) Portugal incentiva e apoia os seus membros na sua jornada para a sustentabilidade, inspirando-os e ajudando-os a construir organizações e modelos de negócio que sejam competitivos, inovadores e sustentáveis.

Ainda no passado ano de 2019, aquando de uma greve dos motoristas de transportadoras de matérias perigosas, que provocaram um racionamento de gasolina nas estações de serviço, foram observadas filas e amplas angústias na busca aos produtos petrolíferos. Desta forma, é possível concluir que de uma forma geral as diferentes formas de energia têm consequências económicas, ambientais e sociais. Por este motivo, quando se fala dos grandes desafios da humanidade, o que acontece com redobrada frequência, num mundo finito cuja população e os aumentos aumentam constantemente, a energia surge como um

dos tópicos incontornáveis (Vasconcelos, 2019). Por isso, deve ser garantido o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos.

No caso específico da herdade onde se está a desenvolver o atual projeto, a lavagem dos tanques é efetuada com recurso a bolas de lavagem fixas e sem a necessidade de os operadores entrarem no seu interior para realizar a operação. Esta secção apresenta um estudo de eficiência energética, comparando o sistema de lavagem utilizado atualmente (bola de lavagem fixa) e o sistema que se propõe no âmbito deste trabalho (com recurso a uma cabeça de lavagem rotativa). Este estudo é relevante pois sustenta um dos propósitos do atual projeto, relacionado com o desenvolvimento de uma solução mais sustentável do ponto de vista ambiental. Assim, após a sua conclusão será possível verificar a percentagem de energia poupada anualmente, com a substituição de uma bola de lavagem fixa por uma cabeça de lavagem rotativa.

Para o desenvolvimento do estudo de eficiência foram considerados os procedimentos de lavagem definidos na secção 5.1, incluindo o tempo despendido em cada etapa e a temperatura dos fluídos de lavagem. Este estudo teve de ser realizado com valores estimados, pois a solução de utilização da cabeça de lavagem rotativa ainda é uma proposta a ser implementada e, como tal, não existem dados obtidos pela via experimental na instalação da herdade. Contudo, foi solicitado apoio à Alfa Laval, fabricante da cabeça de lavagem rotativa proposta. Sendo esta uma organização com bastante experiência sobre o mercado da lavagem de tanques de armazenamento, os dados fornecidos permitem aproximar este estudo a uma situação próxima da realidade.

Com o objetivo de estimar as vantagens económicas da nova solução é importante começar por definir o custo de aquecimento da água para os 70°C, que é a temperatura de serviço no processo de lavagem. Quando a água se encontra com essa temperatura a sua densidade (ρ_a) é 977,8 Kg/m³ (*The Engineering ToolBox*, 2001).

No estudo de termodinâmica, é necessário determinar-se o calor específico da água para se quantificar a energia necessária para a aquecer. O calor específico traduz-se na quantidade de energia que deve ser transferida a 1 grama de uma substância para que a sua temperatura seja elevada em 1°C (Nascimento & Melnyk, 2019). O calor específico da água é de 1 Cal/g.°C ou $1,1622 \times 10^{-6}$ kWh/g°C (*The Engineering ToolBox*, 2001).

Uma vez considerando que em média a água estará a 20°C, para ser aquecida até aos 70°C será necessário elevar a sua temperatura em 50°C. Assim, para se determinar a energia necessária para se elevar a temperatura de 50°C em 1 m³ de água é necessário determinar a massa de água presente, através da seguinte equação:

$$\rho_a = \frac{M}{V} \Leftrightarrow 977,8 = \frac{M}{1} \Leftrightarrow M = 977,8 \text{ Kg} \quad 5.14$$

Onde,

- *M* – Massa (Kg)
- *V* – Volume (m³)

A quantidade de energia (E) utilizada para elevar a temperatura de 1 m³ de água em 50°C, é dada por:

$$E = c \times \Delta T \times M \quad 5.15$$

$$E = 1,1622 \times 10^{-6} \times 50 \times 977800 = 56,82 \text{ kWh}$$

Onde,

- *c* – calor específico ($\frac{\text{kWh}}{\text{g}} \text{ } ^\circ\text{C}$)
- ΔT – Diferencial de temperatura (°C)

Assumindo um custo por unidade de energia de 0,1445 €/kW.h (Selectra, 2021), o custo do aquecimento de 1 m³ de água para a temperatura de 70°C é dado por:

$$\text{Custo} = 56,82 \times 0,1445 = 8,21 \text{ €} \quad 5.16$$

De seguida compara-se o consumo de água e detergente com o sistema implementado atualmente com bola fixa e o sistema proposto com a cabeça de lavagem rotativa Alfa Laval Multijet 25. A lavagem com uma bola fixa requer uma pressão de funcionamento de 2 bar e um caudal de 17m³/h, enquanto a cabeça de lavagem rotativa funciona com uma pressão de 3 bar e um caudal de 5,7 m³/h. O processo de lavagem e respetivos consumos (por lavagem) praticados atualmente na herdade, assim como os propostos com a substituição do elemento terminal são resumidos na Tabela 16.

Tabela 16 - Processo de lavagem e consumos praticados na herdade da Malhadinha Nova

Etapa	Produto	Bola fixa		Cabeça rotativa	
		Tempo (min)	Quantidade (L)	Tempo (min)	Quantidade (L)
Pré-lavagem	Água	2	566,7	4	380
Lavagem	Detergente	2	5,7 (detergente)	4	3,8 (detergente)
	Água		510 (água)		376,2 (água)
Enxaguamento	Água	2	566,7	4	380

De acordo com as informações fornecidas pela herdade, existem períodos do ano em que não se efetuam lavagens e outros em que um tanque tem 2 ou 3 lavagens de tanques por semana. Assim, no presente estudo considerou-se que se efetuava, em média, a lavagem de 1 tanque de armazenamento por semana, totalizando 52 lavagens anuais. A Tabela 17 apresenta o volume de água consumida e os custos de energia para a totalidade de lavagens realizadas anualmente. Sendo que os custos energéticos contabilizados se referem ao custo associado ao aquecimento de água. Uma vez que a água de lavagem provém de um furo de captação de água, a sua quantidade não foi contabilizada no custo total. Neste estudo considerou-se um custo de 2,76€/L para o detergente, seguindo as informações fornecidas pela herdade acerca do detergente utilizado atualmente.

Tabela 17 – Cálculo do volume anual de água e detergente e custos associados

Item	Bola fixa		Cabeça rotativa		Poupança (volume de água e detergentes)
	Volume (L/ano)	Custo	Volume (L/ano)	Custo	
Água	85 456,8	701,6 €	59 082,4	485,1 €	31%
Detergente	294,7	813,3 €	197,6	545,4 €	33%
Total	85 966,8	1514,9 €	59 280	1030,5€	32%

Analisando os dados da Tabela 17, conclui-se que a alteração do sistema de uma bola fixa e uma cabeça de lavagem rotativa permite uma redução no consumo de água e detergente na lavagem dos tanques. Verifica-se ainda que esta redução tem implicação na redução dos custos anuais, numa poupança quantificável em cerca de 30%.

Na secção 5.1 verificou-se que o tempo de lavagem com uma cabeça de lavagem rotativa é superior ao tempo de lavagem efetuado com uma bola de lavagem fixa (apesar da última alternativa gastar mais recursos, tal como verificado na Tabela 17). Por este motivo, torna-se importante referir que o tempo de utilização da bomba selecionada irá aumentar proporcionalmente relativamente ao aumento do tempo de lavagem, ou seja, quanto mais tempo demorar a realização de uma lavagem, mais tempo a bomba estará acionada. Assim é relevante calcular o custo energético e financeiro anual que surge do aumento do tempo de lavagem por cada tanque.

Nesse sentido, é possível verificar (secção 5.3) que a bomba selecionada tem uma potência de 2,2 kW. A pressão de funcionamento de uma bola fixa e de uma cabeça de lavagem rotativa é de cerca de 2 e 3 bar, respetivamente. Verificou-se que é necessária uma bomba com características semelhantes (potência) para funcionar com os dois elementos terminais. Assumindo mais uma vez, um custo por unidade de energia de 0,1445 €/kW.h (Selectra, 2021), é possível calcular o custo anual da lavagem com recurso a uma bola de lavagem fixa e a uma cabeça de lavagem rotativa. Nesse sentido, o custo anual para uma bola de lavagem fixa provém do seguinte cálculo:

$$Custo_{anual}(\text{€}) = E_{consumida}(\text{kWh}) \times Custo_{Por\ unidade\ de\ energia} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \quad 5.17$$

$$Custo_{anual} = 2,2\text{ kW} \times 5,2\text{h} \times 0,1445 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1,65\text{ €}$$

Para o caso do custo anual da lavagem com recurso a uma cabeça de lavagem rotativa o cálculo é o seguinte:

$$Custo_{anual} = 2,2 \text{ kW} \times 10,4 \text{ h} \times 0,1445 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 3,31 \text{ €} \quad 5.18$$

Atendendo aos resultados obtidos é possível verificar que a diferença dos encargos financeiros anuais, devido ao tempo excedente que a bomba terá de funcionar para o caso da cabeça de lavagem rotativa é cerca de 1,66€ por ano.

5.5 Período de payback

Esta secção pretende realizar determinar o tempo necessário, em anos, para a recuperação do investimento realizado em trocar a bola fixa pela cabeça de lavagem rotativa, usualmente denominado por período de payback. Dado que todo o projeto desenvolvido em relação ao *gantry robot* pode ser viabilizado mantendo o elemento terminal atual (bola de lavagem fixa). Na presente secção apenas se pretende evidenciar as consequências financeiras pela substituição da bola de lavagem fixa pela cabeça de lavagem rotativa. Para tal, foi desconsiderado todos os custos associados à implementação do sistema automático de lavagens, considerando apenas os custos do elemento terminal e os respetivos consumos.

De modo geral o período de payback é um indicador que permite comparar projetos com diferentes investimentos (diferentes pontos de partida) e receitas, como é o caso do presente estudo. Desejavelmente, o período de Payback de um projeto deve ser reduzido, de forma a minimizar o risco do investimento inicial. Pelo contrário, quando for maior o período de payback de um investimento, maior é o risco associado (Lime et al., 2016).

A Tabela 18 sintetiza os custos associados às duas soluções de lavagem: bola fixa e cabeça rotativa, ao longo dos anos. Considerou-se que os custos do ano 0 se referem apenas ao investimento inicial dos componentes de lavagem, sendo o custo de uma bola fixa de 50€ e o de uma cabeça de lavagem rotativa de 3678 €. Nas linhas seguintes são apresentados os custos acumulados anuais para cada uma das soluções que se pretende analisar. O cálculo desses custos corresponde à soma do investimento inicial com os custos anuais de operação (1514,9 € para a bola fixa e 1032,2 € (1030,5 €+1,66 €) para a cabeça de

lavagem rotativa). Como o custo da cabeça rotativa é mais elevado do que o da bola fixa, durante os primeiros 7 anos, o custo dessa solução é mais dispendioso. No 8º ano, o custo acumulado da solução com a cabeça de lavagem rotativa passa a ser inferior ao custo acumulado da solução com a bola fixa, sendo esse o período de payback do investimento da cabeça de lavagem rotativa.

Tabela 18 – Custos anuais acumulados para cada uma das soluções (bola fixa e cabeça rotativa)

Ano	Bola fixa	Cabeça rotativa
0	50 €	3678 €
1	1564,9 €	4710,2 €
2	3079,8 €	5742,4 €
3	4594,7 €	6774,6 €
4	6109,6 €	7806,8 €
5	7624,5 €	8839 €
6	9139,4 €	9871,2 €
7	10654,3 €	10903,4 €
8	12169,2 €	11935,6 €
9	13684,1 €	12967,8 €
10	15199 €	14000 €

A Figura 62 apresenta o gráfico de evolução dos custos anuais acumulados das duas soluções em estudo (bola fixa e cabeça rotativa), representando os dados na Tabela 18 de forma gráfica.

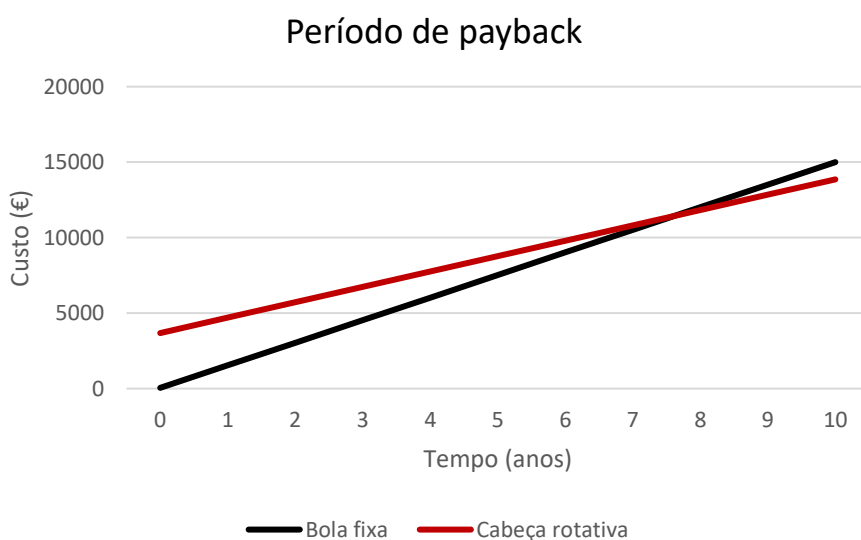


Figura 62 – Gráfico correspondente ao período de payback que compara o investimento da bola fixa com a cabeça rotativa

Analisando a Tabela 18 e o gráfico da Figura 64 é possível verificar que a linha associada à cabeça rotativa tem um custo inicial superior ao da bola fixa, mas possui uma inclinação inferior. Isto significa que, os custos anuais associados à solução da cabeça de lavagem rotativa são inferiores aos da bola fixa e que, elas se irão cruzar. O ponto de cruzamento das linhas define o ponto de retorno do investimento da solução com maior investimento inicial. Também se verifica que esse ponto de cruzamento ocorre no sétimo ano após a compra da solução proposta (cabeça de lavagem rotativa).

Página deixada propositadamente em branco

Capítulo 6 - Conclusões e trabalho futuro

Neste trabalho de final de mestrado desenvolveu-se o conceito de um sistema robótico de lavagem de tanques de armazenamento alimentar, com enfoque no armazenamento de vinho. Para a realização deste projeto foi consultada uma herdade, a Herdade da Malhadinha Nova, permitindo fazer todo o desenvolvimento, considerando a aplicação a um caso real. O sistema projetado é composto por um *gantry robot* que transporta um dispositivo de lavagem. Para se desenvolver este conceito, realizou-se um estudo prévio sobre os sistemas de lavagens existentes para lavagens de tanques, sistemas robóticos para manipulação no espaço cartesiano e normativas homem-máquina. Após a definição do conceito e dimensionamento dos principais componentes, foi realizada uma análise sobre os equipamentos que compõem o sistema automático, assim como os algoritmos de funcionamento do sistema. Adicionalmente ao projeto do sistema robótico de lavagem, foi realizado um estudo sobre o sistema de lavagem, no qual se calculou a perda de carga da rede com o objetivo de selecionar a bomba mais adequada. Este trabalho propôs a lavagem dos tanques com um cabeça rotativa, ao invés da bola da lavagem utilizada atualmente na herdade para o mesmo fim. Para fundamentar a substituição do elemento de lavagem, conclui-se o trabalho final de mestrado com a realização de um estudo de eficiência, comparando a solução a utilização da bola de lavagem com a cabeça rotativa.

O projeto do sistema robotizado de lavagem de tanques de armazenamento, incluiu a seleção da cabeça de lavagem, levantamento das características dimensionais de componentes relevantes e dimensionamento do *gantry robot*. O sistema robótico foi projetado de acordo com os constrangimentos fornecidos pela herdade da Malhadinha Nova tais como: a distribuição dos tanques de armazenamento pelo armazém e as características dos mesmos (altura, diâmetro, etc.). Através da planta do armazém foi possível averiguar em relação à área de trabalho, comprimento necessário de tubagem para dimensionar a rede de fluídos e o pé direito do espaço. Desta forma foi possível concluir o estudo com a seleção da cabeça de lavagem da Alfa Laval (multijet25), que é deslocada por um *gantry robot* dimensionado para as características da herdade da Malhadinha Nova. No caso de se ter de instalar este sistema noutra espaço, será necessário efetuar uma revisão, de modo que a estrutura se adeque aos novos constrangimentos dimensionais. Por exemplo, no caso de se instalar o sistema num local

com o pé direito que limite o deslocamento do eixo vertical (eixo Y), poderá haver a necessidade de este ser mais compacto. Neste caso, poderá ser necessário implementar um eixo com um mecanismo telescópico, ou um sistema com vários eixos verticais com curso mais curto. No caso do armazém da Malhadinha Nova, o pé direito é suficientemente elevado e, por isso, não existiu a necessidade de recorrer a uma solução telescópica, que acarretaria custos superiores.

Neste âmbito foram definidos dois modos de operação para o sistema de lavagem: “o modo de seleção manual” e “modo de sequência automática”. Estes modos de operação foram elaborados para o operador selecionar através de um HMI o modo que pretende utilizar para realizar a lavagem do(s) tanque(s) de armazenamento. Assim, com o objetivo de supervisionar todos os processos, o sistema de controlo foi idealizado de forma a integrar um sistema de supervisão e aquisição de dados (supervisory control and data acquisition - SCADA). Neste caso, os interfaces homem-máquina conectados ao PLC deverão exibir os sinópticos para a supervisão do processo de lavagem tanques.

No caso de se pretender implementar o sistema proposto em contextos com tanques de armazenamento móveis terá de se considerar a inclusão de um sistema que permita detetar a entrada do tanque. A perceção poderá ser implementada com recurso a visão, com uma câmara ligada ao PLC. A entrada do tanque poderá ser detetada através algoritmos de processamento de imagem e o PLC poderá usar a informação visual para posicionar o eixo vertical por cima da entrada do tanque.

Poderá ainda ser implementada uma câmara para realizar a inspeção visual do interior do tanque que foi lavado. Assim, através das HMI, o operador deverá ter a possibilidade de visualizar em tempo real as imagens provenientes da câmara presentes no dispositivo de lavagem, desempenhando a tarefa de inspeção da qualidade da lavagem.

Os dados obtidos no estudo sobre o sistema proposto para a herdade da Malhadinha Nova comprovam o pressuposto de que a solução de uma cabeça de lavagem rotativa fornece uma combinação melhorada em relação ao consumo de produtos químicos e água. Este facto traduz-se numa lavagem mais eficiente quando comparada com a solução de uma lavagem realizada através de uma bola de lavagem fixa (EHEDG, 2016). Os dados indicam que serão gastos menos produtos químicos e água. Como consequência, cada lavagem terá um custo inferior e, portanto, trata-se de uma proposta que visa poupar

recursos humanos (trabalhadores) ambientais (água e detergentes) e financeiros (custo por lavagem).

O estudo da eficiência da lavagem foi realizado com base nas informações do fabricante da cabeça de lavagem. Quando comparados os casos de estudo do fabricante, que apresentaram poupanças de recursos na ordem de 30% (Tabela 17) e o estudo do sistema proposto, onde se atingiu também uma poupança de cerca de 30%, é possível concluir que os estudos apresentados pelo fabricante e os resultados obtidos estão em concordância. Contudo, dado que os cálculos realizados assentaram nalguns pressupostos, é importante a aferição destes valores com dados reais, devendo ser realizada a comparação entre a solução anterior (bola fixa) e a solução proposta (cabeça rotativa) no momento em que o sistema estiver implementado.

A análise dos custos de lavagem permitiu determinar o período de retorno do investimento necessário para implementação do sistema com uma cabeça rotativa de lavagem, quando comparado com o da bola fixa. Concluiu-se que o período payback do investimento da cabeça rotativa é de aproximadamente 7 anos, o que torna o investimento proposto pouco atrativo a nível financeiro, uma vez que os investimentos na sua generalidade procuram atingir o seu retorno em períodos entre 3 e 5 anos. Contudo, no sistema da herdade da Malhadinha Nova, o gasto de água (custo) não foi contabilizado uma vez que esta provém de um furo. No caso da implementação deste sistema num local onde a água seja um recurso a contabilizar, o período de payback será mais baixo, o que se traduz numa maior rapidez no retorno do investimento. Além disso, é importante realizar testes quando o novo sistema estiver implementado, no sentido de verificar se continuará a ser necessário aquecer a água para uma temperatura de serviço de 70°C. Isto deve-se ao fato de que ao longo do presente documento, nomeadamente na secção 2.1.2, foi ilustrado um estudo que corrobora a ideia de que quando uma lavagem é realizada com uma força de impacto superior, é possível reduzir a temperatura de serviço, mantendo a qualidade da lavagem (Technologies, 2021). Nesse sentido, se for validada a hipótese de se obter uma lavagem eficaz com uma temperatura de serviço mais baixa, a implementação da cabeça de lavagem rotativa passará a utilizar ainda menos recursos (energia) do que os calculados neste trabalho, dado que a variação de temperatura necessária (atualmente de 50°C) será inferior.

Por fim, é importante salientar que o sistema robótico de lavagem de tanques foi idealizado para servir as necessidades da herdade da Malhadinha Nova. Trata-se de uma herdade com um número relativamente baixo de lavagens anuais de tanques de armazenamento, quando comparada com outras empresas. Segundo uma consulta à empresa fornecedora de sistemas de lavagem, Alfa Laval, assim como uma empresa de lavagem de tanques rodoviários, a Carmona SA, concluiu-se que a lavagem de tanques de vinho, são lavagens pouco complexas quando comparadas outros produtos, como tanques de fermentação de cerveja, queijo ou outros equivalentes. Por estas duas razões, é possível concluir que o sistema desenvolvido, quando implementado em armazéns maiores e para lavagens mais complexas, as suas vantagens possam ser potencializadas, nomeadamente em relação aos recursos utilizados (água e detergentes) e tempo de lavagem despendido em cada tanque. Dessa forma, reduzir-se-á o período de payback, tornando o investimento mais atrativo. Assim, a implementação deste sistema de lavagem contribui para a redução do consumo de água e detergentes e, portanto, viabiliza um menor impacto na pegada ecológica.

Referências bibliográficas

- Alfa Laval. (2021). *A healthy injection for your business*.
- Andrade, J. C. de. (2018). Química analítica básica: os conceitos acido-base e a escala de pH. *Revista Chemkeys*, 1, 1–6. <https://doi.org/10.20396/chemkeys.v0i1.9642>
- Antunes, M., Adamatii, D., Pacheco, M., & Giovanela, M. (2018). Ácidos e bases: pH e indicadores. *Laboratório de Química*, 93–102.
- Atkins, P., Jones, L., & Laverman, L. (2021). *Ácidos e Bases fortes* (pp. 6–8).
- Barros, F. F. C., De Quadros, C. P., Maróstica, M. R., & Pastore, G. M. (2007). Surfactina: Propriedades químicas, tecnológicas e funcionais para aplicações em alimentos. *Química Nova*, 30(2), 409–414. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200031>
- Bohrer, B. M. (2018). Sequestrants as a food ingredient. In *Encyclopedia of Food Chemistry* (Vol. 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21610-7>
- Claro, P. B. de O., & Claro, D. P. (2014). Sustentabilidade estratégica: existe retorno no longo prazo? *Revista de Administração*, 49(2), 291–306. <https://doi.org/10.5700/rausp1147>
- Cleaning, E. I. (2021). *Alfa Laval MultiJet 25*.
- Ćojbašić, Ž., & Brkić, D. (2013). Very accurate explicit approximations for calculation of the Colebrook friction factor. *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.11.017>
- Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. (1987). *Brundtland Report*.
- Daltin, D. (2011). *Tensoativos* (E. Blücher Ltda. (ed.); 1ª Edição).
- Dandara, V. (2019). *Perda de carga: entenda o que é*. <https://www.guiadaengenharia.com/perda-carga/>
- Decreto-Lei n.º 103/2008 do Ministério de Planeamento e das Infraestruturas, 31 (2008).
- Efaflu. (2021). *Pump selection online*. <http://pso.efafllu.pt/>

- EHEDG. (2016). Rotary jet head ‘burst’ cleaning technology delivers significant savings in cleaning costs. *EHEDG Yearbook 2015/2016*, 96–98.
- Engineering ToolBox*. (2001). <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- Forni, R. (2007). *Projeto Mecânico de um Sistema de Higienização CIP*.
- France, L. (2021). *Lucas-robotic*. <https://lucas-robotic-embedded.partcommunity.com/3d-cad-models/lucas-france?info=lucas&cwid=1785>
- Fuchs, E., Kricke, S., Schöhl, E., & Majschak, J. P. (2019). Effect of industrial scale stand-off distance on water jet break-up, cleaning and forces imposed on soil layers. *Food and Bioprocess Technology*, 113, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.11.008>
- Gésan-Guiziu, G., Alvarez, N., Jacob, D., & Daufin, G. (2007). Cleaning-in-place coupled with membrane regeneration for re-using caustic soda solutions. *Separation and Purification Technology*, 54(3), 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.10.007>
- Gloucester, D. (2004). *The big cheese in tank cleaning efficiency Toftejorg rotary spray head tank cleaning machines*.
- Gonzalez, R. V. D., & Martins, M. F. (2000). Melhoria contínua no ambiente. *Produção*, 17(3), 592–603.
- Governo - República Portuguesa. (2020). *Linha de crédito superior a 300 milhões para impulsionar agricultura - XXII*.
- Hansen, J. H., & Manager, G. (2003). *ASME 2003 Citrus Engineering Conference CEC2003 March 20, 2003, Lake Alfred, Florida, USA*.
- ISO 10218-1. (2006). *Robots for industrial environments-Safety requirements*.
- Laval, A. (2021). *Optimización sostenible en equipos de limpieza y mezcla*.
- Lime, J., Scheitt, L., Boshi, T., Silva, N., Meira, A., & Dias, G. (2016). *Propostas de ajuste no cálculo do payback de projetos de investimentos financiados. October 2013*. https://www.researchgate.net/profile/Jose_Donizetti_De_Lima/publication/289730

444_Proposals_of_adjustment_for_the_payback_calculation_of_funded_investme
nt_projects/links/56cd988a08aeb52500c33421/Proposals-of-adjustment-for-the-
payback-calculation-of-funde

- Mehlmann, M., Sannum, M., & Benaim, A. (2015). Learning for Sustainability. *Responsible Living*, 41–55. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15305-6_4
- Miguel, P., & Tavares, S. (2015). *Planeamento de trajetórias em Manipuladores em ambientes industriais*.
- Moura, J. P. S. P. C. (2014). Test bench of head losses in incompressible flow. <https://Fenix.Tecnico.Ulisboa.Pt/DownloadFile/563345090413227/Resumo.Pdf>, 1–10.
- Muzzo, L. E., de Pinho, D. M. D., Lima, L. E. M., & Ribeiro, L. M. F. (2019). Análise comparativa de correlações para o fator de atrito em condutas. *2ª Escola de Verão e Simpósio de Dupla Diplomação (DD)*, Pap:1–Pap:1.
- Nangpal, A. (2000). *CIP Systems: Design and Functions*. 65–90. <https://doi.org/10.1115/cec2000-4606>
- Nascimento, L., & Melnyk, A. (2019). Medição Experimental do Calor Específico da Água. *Revista Multidisciplinar Pey Këyo Científico-ISSN 2525-8508*, 5(1), 92–96.
- Notícias, D. de. (2020). *Portugal será 3.º maior produtor mundial de azeite numa década*.
- Oliveira, B. Q. de F., Ferreira, J. L., Costa, R. K. P., Lopes, T. A. de O., Oliveira, I. N. de, & Filho, A. C. (2017). Tipos e aplicações de sensores na robótica. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS*, 223–229.
- Oliveira, L. A. (2020). *Mecânica dos Fluidos* (LIDEL (Ed.); 6ª Edição).
- Osmjorkin, D. (2015). *Feasibility study of a tank cleaning station*.
- Parker. (2021). *Hydraulic Quick Couplings Hydraulic*.
- Pedersen, M. R., Nalpantidis, L., Andersen, R. S., Schou, C., Bøgh, S., Krüger, V., & Madsen, O. (2016). Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37(February), 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.002>

- Pérez, L., Rodríguez, Í., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., & García, D. F. (2016). *Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review*. <https://doi.org/10.3390/s16030335>
- Portuguesa, R. (2019). Agricultura com resultado positivo Dados relativos ao Comércio Internacional mostram aumento das exportações. *Ineg Gpp*.
- Público. (2020). *Portugal tem cinco produtores de vinho no “top” 100 mundial | Vinhos* /.
/.
- Ribeiro, I. (2014). *Uma Viagem ao Mundo dos Robots*.
<https://www.researchgate.net/publication/255652137>
- Romano, V. F. (2002). *Robótica Industrial: aplicação na industria de manufatura e de processos* (E. Blucher (Ed.); 1st ed.).
- Rombão, M. (2019). *Terão os robôs capacidade para substituir o ser humanos ?* 1–66.
- Rosário, J. M. (2005). *Princípios de mecatrônica*.
- Safefood. (2012). Cleaning and Disinfection in Food Processing Operations. *Safefood 360, Inc.*, 16.
- Sansebastiano, G., Zoni, R., & Bigliardi, L. (2007). Cleaning and disinfection procedures in the food industry general aspects and practical applications. *Food Safety: A Practical and Case Study Approach*, 253–280. https://doi.org/10.1007/978-0-387-33957-3_13
- Selborne, Lord. (2001). *A ética do uso da água doce*.
- Selectra. (2021). *kWh Portugal*. <https://selectra.pt/energia/info/faq/kwh-preco>
- Severino, I. (2020). *Validação da desinfeção e otimização de um sistema Clean-In-Place numa indústria alimentar*.
- Silva, V. H. C. da, Kieckbusch, R. E., & Santos, A. C. dos. (2019). *Segurança na Indústria 4.0: requisitos técnicos para robôs colaborativos*. November, 674–687. <https://doi.org/10.5151/cbgdp2019-50>
- Sneard, K. (2015). *Brewery toasts water savings Toftejorg rotary jet head tank cleaning machine*.

- Standard, B. (2021). Food processing machinery. In *Management* (Vol. 3).
- Stories, T. O. P., For, S. C., Tending, C. M., Stories, T., For, S. C., & Handling, C. M. (2019). *A Guide to Collaborative Robot Safety*. 1–5.
- Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1979). *Fluid mechanics (seventh ed.)*.
- Synerlogic, B. V., & Barroso, R. A. (2020). *Carclin Shampoo Fresh* (Vol. 2006).
- Tamine, A. (2009). Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Technologies, T. cleaning. (2021). *Optimización en la limpieza de tanques de vino*.
- The Engineering ToolBox*. (2001). <https://www.engineeringtoolbox.com>
- Turismo de Portugal. (2019). *Portuguese Wine Tourism - Programa de ação para o Enoturismo 2019-2021*. 71.
- Vasconcelos, J. (2019). *A energia em Portugal* (F. F. M. dos Santos (Ed.); 1ª Edição).
- Vieira, H. (2020). *Vieirinox*.
- White, J. C., & Rabe, G. O. (1970). Evaluating the Use of Nitric Acid As a Detergent in Dairy Cleaned-in-Place Systems1. *Journal of Milk and Food Technology*, 33(1), 25–28. <https://doi.org/10.4315/0022-2747-33.1.25>
- Wikibooks. (2017). *Mecânica dos fluidos*. https://pt.wikibooks.org/wiki/Mecânica_dos_fluidos/Cálculo_da_perda_de_carga_em_tubulações

Página deixada propositadamente em branco

Anexos

Página deixada propositadamente em branco

Anexo I – Cabeça de lavagem rotativa (Alfa Laval Multijet 25)

Página deixada propositadamente em branco



Instruction Manual

Alfa Laval Toftejorg™ MultiJet 25 Rotary Jet Head



Covering: Standard Machines
Machines delivered with ATEX/IECEX Certification in accordance with Directive 2014/34/EU
TE91A615. First published: 2007-06

ESE02750-EN7 2019-05

Original manual

Table of contents

The information herein is correct at the time of issue but may be subject to change without prior notice

1. EC/EU Declaration of Conformity	4
2. Safety	5
2.1. Important information	5
2.2. Warning signs	5
3. Introduction	6
3.1. Introduction	6
3.2. Intended use	6
3.3. Patents and trademarks	7
3.4. Marking	7
3.5. ATEX/IECEx marking	8
3.6. ATEX/IECEx temperature class and code	9
3.7. Quality system	9
4. Installation	10
4.1. General description	10
4.2. Functioning	10
4.3. General safety and installation instructions	12
4.4. Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification	13
5. Operation	16
5.1. Normal operation	16
5.2. Safety precautions	17
6. Maintenance	18
6.1. Preventive maintenance	18
6.2. Service and repair of ATEX/IECEx certified machines	19
6.3. Maintenance intervals and service kits	19
6.4. General assembly/disassembly recommendations	21
6.5. Tools	21
6.6. Disassembly	22
6.7. Reassembly	24
6.8. Replacement of ball races	25
7. Trouble shooting guide	26
8. Technical data	27
8.1. Technical data	27
9. Product programme	31
9.1. Standard configurations	31
9.2. Available add-ons	31
9.3. Available welding connections	33
10. Parts list and drawing, service kits and tools	34
10.1. Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25	34
10.2. Tools	36
11. General information	37
11.1. Service and Repair	37
11.2. How to Order Spare Parts	37
11.3. How to contact Alfa Laval Kolding A/S	37

1 EC/EU Declaration of Conformity

The Designated Company

Alfa Laval Kolding A/S
Company Name

Albuen 31, DK-6000 Kolding, Denmark
Address

+45 79 32 22 00
Phone No.

hereby declare that


Tank Cleaning Machine
Designation

Alfa Laval Toftebjerg MultiJet 25
Type
From serial number 2018-0001 to 2030-99999

is in conformity with Machinery Directive 2006/42/EC and the following harmonized standard is used:
DS/EN ISO 12100:2011 Safety of Machinery - Risk Assessment

is in conformity with (Ex / ATEX) Directive 2014/34/EU and the following harmonized standards are used:
EN ISO 80079-36:2016, EN ISO 80079-37:2016, DS/EN ISO/IEC 80079-34:2011, Annex A, paragraph A.5.3 Rotating machines

EC Type Examination Certificate no. Baseefa04ATEX0358X and IECEx BAS 18.0067X

Marking:  II 1G Ex h IIC 85°C... 175°C Ga
II 1D Ex h IIC T85°C... T140°C Da

The QAN (Quality Assurance Notification) is carried out by SGS Fimko Oy, Särkiniementie 3, Helsinki 00211, Finland. Notified Body No. 0598.

EU Type Examination Certification is carried out by SGS Fimko Oy, Särkiniementie 3, Helsinki 00211, Finland. Notified Body no. 0598.
IECEx Certificate of Conformity is carried out by Baseefa Ltd., Rockhead Business Park, Staden Lane, Buxton, Derbyshire SK17 9RZ, United Kingdom. IECEx Accepted Certification Body (ExCB).

The person authorised to compile the technical file is the signer of this document.

Global Product Quality Manager
Pumps, Valves, Fittings and Tank Equipment
Title

Lars Kruse Andersen
Name


Signature

Kolding
Place

2019-05-01
Date (YYYY-MM-DD)

This Declaration of Conformity replaces Declaration of Conformity dated 2016-07-01



MultiJet 25

*Unsafe practices and other important information are emphasized in this manual.
Warnings are emphasized by means of special signs.
Always read the manual before using the tank cleaning machine!*

2.1 Important information

WARNING

Indicates that special procedures must be followed to avoid serious personal injury.

CAUTION

Indicates that special procedures must be followed to avoid damage to the tank cleaning machine.

NOTE

Indicates important information to simplify or clarify procedures.

2.2 Warning signs

General warning:



ATEX/IECEx warning:



3 Introduction

MultiJet 25

3.1 Introduction

Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 Rotary Jet Head has been developed to meet the highest demands for efficiency, reliability within industrial industry

This manual has been prepared as a guide for installing, operating and maintaining your Alfa Laval Toftejorg tank cleaning machine. Should you require further assistance, our Technical Sales Support department and worldwide net of sales offices are pleased to help you. Please quote the type, article and serial numbers with all of your enquiries; this helps us to help you. The type and serial number are placed on the body of the tank cleaning machine.

Get the best and most economical performance from your tank cleaning machine. Insufficient preventive maintenance means poor performance, unscheduled stops, shorter lifetime and extra costs. On the contrary, good preventive maintenance means good performance, no unscheduled stops and superior total economy

If the Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 stops rotating unintentionally within the warranty period, please return the machine to Alfa Laval. Please do not try to fix any mechanical problems before shipping.

Warning:



Before installing the machine and setting it into operation, carefully read the General safety and installation instructions (page 12) and the specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEX Directive 2014/34/EU (page 13) and take all necessary precautions according to your application and local regulations.

NOTE

The illustrations and specifications contained in this manual were effective at the date of printing. However, as continuous improvements are our policy, we reserve the right to alter or modify any unit specification on any product without prior notice or any obligation.

The English version of the instruction manual is the original manual. We make reservations in regard to possible mistranslations in language versions of the instruction manual. In case of doubt, the English version of the instruction manual applies.

3.2 Intended use

The end-user should verify:

- that the tank cleaning machine is in conformity with respect to tank, vessel or container size in which it is used.
- that the construction materials (both metallic and non-metallic) are compatibility with product, flushing media, cleaning media, temperatures and pressure under the intended use.

The tank cleaning machine/rotary jet mixer is intended for use in closed tank, vessel or container. If used in open environment see 4.3 General safety and installation instructions.

To ensure the self cleanability and drainability the machine must be installed in vertical position.

3.3 Patents and trademarks

This Instruction Manual is published by Alfa Laval without any warranty. Improvements and changes to this Instruction Manual may at any time be made by Alfa Laval without prior notice. Such changes will, however, be incorporated in new editions of this Instruction Manual.

Alfa Laval Kolding A/S. All rights reserved.

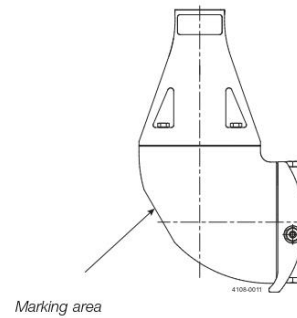
The Alfa Laval logotype is a trademark or a registered trademark of Alfa Laval Corporate AB. "Toftejorg" is a trademark or registered trademark of Alfa Laval. The Alfa Laval Toftejorg™ MultiJet 25 product has patents in the EPO member states (EP 0 560 778), in the US (5333630) and in other countries and has a new patent pending (PCT/DK/2007/000062). Other products or company names mentioned herein may be the trademarks of their respective owners. Any rights not expressly granted herein are reserved.

3.4 Marking

Alfa Laval tank cleaning machines are all marked to allow for recognition of type of machine, machine name, serial number and manufacturing address. The marking is placed on the body of the tank cleaning machine.

Rotary Jet Head
MJ25
s/n.: yyyy-xxxxx
Alfa Laval, DK-6000 Kolding, Albuen 31
CE

Serial number explanation
Machines supplied with or without standard documentation:
yyyy-xxxxx: serial number
yyyy: year
xxxxx: 5 digit sequential number



3 Introduction

MultiJet 25

3.5 ATEX/IECEX marking

The Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 is certified as category I component. The ATEX certification is carried out by the Notified Body SGS Fimko Oy, who has issued the certificate no. Baseefa04ATEX0358X.

The IECEX certification is carried out by the Certification Body SGS Baseefa Ltd., who has issued the certificate no. IECEX BAS 18.0067X.

Note


Explosion protection type is constructional safety "c".

The marking on the ATEX/IECEX certified Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 is as follows (for information on marking position see section 3.4 Marking):

Rotary Jet Head

MJ25

s/n.: yyyy-xxxxx

 Alfa Laval, DK-6000 Kolding, Albuen 31
II 1G Ex h IIC 85°C...175°C Ga
II 1D Ex h IIC T85°C...T140°C Da
0598 Baseefa 04ATEX0358X IECEX BAS 18.0067X

Serial number explanation:

Machines supplied with or without standard documentation:

yyyy-xxxxx: serial number

yyyy: year

xxxxx: 5 digit sequential number

3.6 ATEX/IECEx temperature class and code

The maximum surface temperature depends mainly on operating conditions which are the temperature of the cleaning fluid and the ambient temperature.

Group II EPL Ga

The gas temperature class is corrected with a safety margin of 80% due to a requirement for Group II EPL Ga equipment. The gas temperature class depends on the cleaning fluid temperature or the ambient temperature, whichever of the two is the highest.

Table for determining temperature class (gas atmospheres)		
Temperature Class	Cleaning fluid Temperature, T_p (°C)	Ambient temperature, T_{amb} (°C)
85°C (T6)	≤ +68°C	≤ +68°C
100°C (T5)	≤ +80°C	≤ +80°C
135°C (T4)	≤ +108°C	≤ +108°C
175°C	≤ +140°C	≤ +140°C

Group III EPL Da

The dust temperature class depends on the cleaning fluid temperature or the ambient temperature, whichever of the two is the highest. No dust layer is considered.

Table for determining temperature class (dust atmospheres)		
Temperature code	Cleaning fluid temperature, T_p (°C)	Ambient temperature, T_{amb} (°C)
T85°C	≤ +85°C	≤ +85°C
T100°C	≤ +100°C	≤ +100°C
T135°C	≤ +135°C	≤ +135°C
T140°C	≤ +140°C	≤ +140°C

Example of gas class determination

Cleaning fluid temperature is 67°C and ambient temperature is 75°C.
Gas class = T5

ATEX/IECEx marking on the equipment:

 II 1G Ex h IIC 85°C...175°C Ga
 II 1D Ex h IIIC T85°C...T140°C Da

3.7 Quality system

The Alfa Laval Toftebjerg MultiJet 25 is designed in accordance with the EHEDG design guidelines for sanitary design of processing equipment. It is produced according to Alfa Laval Kolding's ISO-9001 international Standard certified quality system. All parts are made from certified material and all non-metal parts are made from FDA compliant materials.

4 Installation

MultJet 25

4.1 General description

The Alfa Laval Tofteborg tank cleaning machine is a media driven and media lubricated tank cleaning machine. No lubricating substances such as oil, grease etc. are used. All materials comply with FDA 21CFR§177 and for polymers also EU 10/2011. The machine is self-cleaning i.e. all internal and external surfaces are cleaned during normal operation.

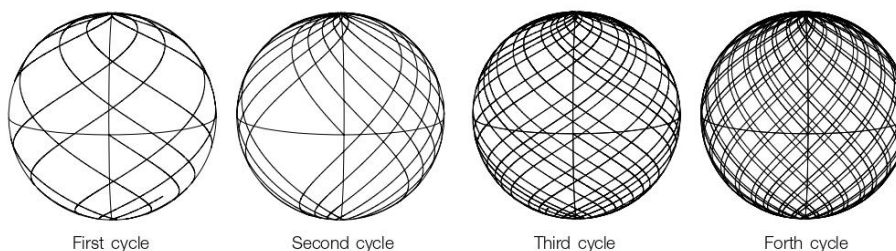
For use in explosive hazard zones the ATEX/IECEx version can be used, provided it is installed according to safety instructions in local regulations.

4.2 Functioning

The flow of cleaning fluid into the machine passes through a turbine, which accordingly is set into rotation. Through a gear set and a driver tube, the turbine rotation is transmitted to the Cleaner Head.

The combined motion of the machine Body and the Nozzles ensures a fully indexed tank cleaning coverage. After 5 5/8 revolutions of the Hub cover with Nozzles (5 3/8 revolutions of the machine Body), one coarse cleaning pattern is laid out on the tank surface and the first cycle has been made. During the following cycles, this pattern is repeated 7 times, each of which is displaced, and the pattern gradually becomes more dense. Finally, after 8 cycles - a total of 45 revolutions of the Hub Cover with Nozzles (43 revolutions of the machine Body), a complete cleaning pattern has been laid out, and the first pattern is repeated.

This is illustrated below for a spherical tank with the machine placed in the centre:

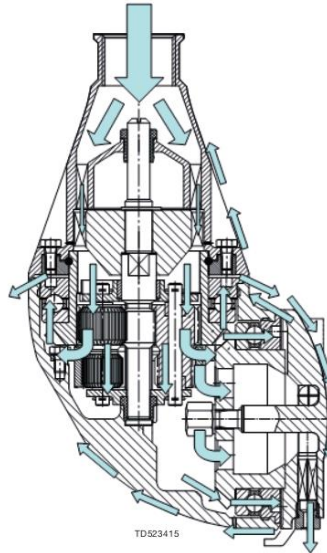


The number of cycles needed to perform a proper cleaning depends on type of soilage, position of the tank cleaning machine, cleaning procedure, cleaning temperature and cleaning agent.

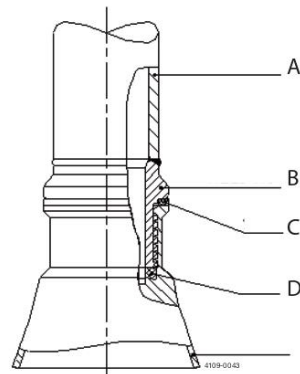
For substances that are easily mobilised, i.e. are easy to remove, one cycle could be sufficient while in cases of more heavy soilage (high viscous, sticky substances, etc.) a more dense pattern/more cycles are needed.

The rotation speed of the turbine depends on the flow rate through the machine. The higher the flow rate, the higher the speed of rotation. In order to control the RPM of the machine for a wide range of flow rates, the machine has different turbines according to the Nozzle size.

Apart from the main flow flushing the gear and the Hub, and thereafter forming the jets through the Nozzles, fluid is flushed through all internal areas, through Bevel gear, Ball bearings and gaps between moving parts and finally also used for cleaning of the outside surfaces of the machine. The areas behind the Screws on the Cone are cleaned through small spray holes behind the Screws. In the bottom of the Body, a drainage hole is present to ensure self-draining. This self-draining is only ensured, if the machine is installed in upright position.



For all versions:
For devices with tapered thread connections to the down pipe, it is recommended that you secure the connection in a manner appropriate for the application. Subject to the intended use environment and any inhouse user requirements or policies, an adhesive such as Loctite No. 243 or equivalent could be used. Other methods could be acceptable and subject to customer preference.



- A: Down pipe
- B: Welding adapter
- C: Seal PTFE
- D: Seal EPDM

4 Installation

MultiJet 25

4.3 General safety and installation instructions

The tank cleaning machine should be installed in vertical position (upright or upside down). It is recommended to install a filter in the supply line in order to avoid large particles, scale etc. to clog inside the machine. It is essential to avoid fine solid particles (e.g. fine sand) in cleaning fluid as they increase wear considerably.

In general, a filter with 3 mm holes is recommended in the supply line. In case of fine solid particles below 500 µm in the cleaning fluid, choose filter size accordingly.

In order to separate the CIP system from the process it is recommended to install a shutoff valve close to the machine inlet. This also prevents back-flow of liquid from the tank through the machine in case the cleaner head is submerged and there is an over-pressure inside the tank. The installation and operation shall be made in such a way that the self-draining of the machine is ensured.

It is recommended that the fluid valve fitted is of a type that **prevents hydraulic shocks**, which may cause severe damage to the Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 and/or the entire installation. Ideally, a frequency controlled pump with a ramp function for start-up is used for supplying the cleaning liquid.

Before connecting the machine onto the system, **all supply lines and valves should be flushed** in order to remove foreign particles.

The machine should be screwed tightly onto its supporting supply line using a 36 mm flat jawed spanner (tool No. TE81B040) on the flats machined on the inlet Cone.

During handling and installation handle the machine with care in order not to damage the surface finishes of the machine.

The Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 machine has been tested at the factory before shipping. You can check that the machine is in operating condition by blowing compressed air into the inlet, while holding the machine by the cone and verify that the rest of the machine rotates evenly. If resistance is recognised, the machine should be disassembled in order to localise the cause or returned to the nearest Alfa Laval Service Centre.

Upon arrival check that the machine is in operation condition by inserting a flathead Screwdriver in top of turbine shaft and easily turn Turbine shaft anti-clockwise. If any resistance is recognised, the machine should be disassembled in order to localise the cause.

For devices with tapered thread connections to the down pipe, it is recommended that you secure the connection in a manner appropriate for the application. Subject to the intended use environment and any inhouse user requirements or policies, an adhesive such as Loctite No. 243 or equivalent could be used. Other methods could be acceptable and subject to customer preference.

NOTE

Do not try to turn the nozzle head by hand, since this may damage the Gear. The Nozzle head can be turned by blowing compressed air through the inlet connection.

NOTE

The machine shall be installed in accordance with national regulations for safety and other relevant regulations and standards. In EU-countries the complete system must fulfil the EU-machine Directive and depending of application, the EU-Pressure Equipment Directive, the EU-ATEX/IECEx Directive and other relevant Directives and shall be CE-marked before it is set into operation.

Warning:



Precautions shall be made to prevent starting of the cleaning/mixing operation, while personnel are inside the tank or otherwise can be hit by jets from the nozzles.


For information on use in potential explosive atmospheres see paragraph 4.4 Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification page 13.

4.4 Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification

Directive 2014/34/EU


NOTE


Explosion protection type is constructional safety "c".


Warning: Operated in a hazardous area
 The unit may be operated in a hazardous area only when completely filled with cleaning fluid/steam. If a medium other than the cleaning fluid/steam is passed through the equipment the flow must not be high enough to cause the equipment to operate.

Warning: Operating guidance
 The unit shall be operated in line with guidance provided by IEC/TS 60079-32-1 for tank cleaning.

Warning: Temperature class and ambient temperature range
 The maximum surface temperature depends mainly on operations conditions which is the temperature of the cleaning fluid and ambient temperature. The temperature class and ambient temperature range are shown in paragraph 3.6 ATEX/IECEx temperature class and code, page 9.

Warning: Max. permitted temperature
 When working:
 The maximum permitted cleaning fluid temperature and ambient temperature is 95°C.
 When not working:
 The maximum permitted ambient temperature is 140°C.

Warning: Draining using compressed air
 Draining using compressed air must not be done in ex classified zone. Draining using compressed air is possible in non ex classified zones (see page 16).

Warning: Earthing
 All metal and other conductive or dissipative material should be connected to earth with the exception of very small items. For further information see IEC/TS 60079-32-1:2013 Explosive atmospheres – Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance. With focus on clause 6.2.3, 7.2.1, 7.3, 7.9.2, 13.

Warning: Earthed when in use
 The unit must be effectively earthed at all times when in use.

4 Installation

MultJet 25

4.4 Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification

Warning: Max. permitted steaming temperature

The maximum permitted steam temperature through the machine and ambient temperature is 140°C.



Warning: Steaming tanks larger than 100 m³

Tanks with capacities larger than 100 m³ that could contain a flammable atmosphere should not be steam cleaned, as steam cleaning tanks produces an electrostatically charged mist. Tanks smaller than 100 m³ may be steam cleaned.



For further information see IEC/TS 60079-32-1:2013 Explosive atmospheres – Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance. With focus on clause 7.10 and 8.5.

Tank size information

The tank cleaning machine has been certified by accredited notified body and can operate in tanks having an enclosed volume up to 100 m³ as long as all ATEX/IECEx warnings in the instruction manual are complied with.

General guidelines for tanks larger than 100 m³:

Tanks larger than 100 m³ must not be steam cleaned – See guide IEC/TS 60079-32-1:2013 clause 7.10.5 and 8.5
To use the unit in tanks larger than 100m³ is possible under certain conditions.

It is necessary to know the current factors such as tank size, cleaning solvent and product.

Additives can be used in the cleaning solvent, or, for example, the tank can be filled with nitrogen. The basic guidelines are described in the guide IEC/TS 60079-32-1:2013.

It must be ensured that the equipolently bonding of all conductive metal objects is in accordance with national regulations for use.

The cleaning fluid conductivity must correspond to the products in the group "High conductivity", cf. IEC/TS 60079-32-1:2013 clause 7.1 and 7.2.

High conductivity	> 10 000 pS/m
Medium conductivity	between 25 × ϵ_r pS/m and 10 000 pS/m
Low conductivity	< 25 × ϵ_r pS/m

For liquids with a dielectric constant of around 2, (e.g. hydrocarbons), these classifications reduce to:

High conductivity	> 10 000 pS/m
Medium conductivity	between 50 pS/m and 10 000 pS/m
Low conductivity	< 50 pS/m


Following a guidance document such as IEC/TS 60079-32-1:2013 to establish safe use of machinery and process is the users own responsibility and is not covered by the ATEX/IECEx certification for this unit except for tanks up to 100 m³. For further information see IEC/TS 60079-32-1:2013 Explosive atmospheres – Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance with focus on clause 7.1.3, 7.1.4, 7.2.1, 7.2.4.

4.4 Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification


Warning: Process generated electrostatic
 The user must address the electrostatic hazards generated from the process of the equipment in accordance with guidance document IEC/TS 60079-32-1:2013.



Warning: Electrostatically charged liquid
 Liquids can become electrostatically charged when they move relative to contacting solids or the spraying of liquids can also create a highly charged mist or spray. The liquid must be made electrically conductive by additives or otherwise.
 For further information see IEC/TS 60079-32-1:2013 Explosive atmospheres – Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance. With focus on clause 7.1.3, 7.1.4, 7.2.1, 7.2.4.



Warning: Appropriate cleaning fluid
 The cleaning fluid should be appropriate for the application (e.g. so no chemical reaction can take place between the cleaning fluid and the residue of process fluid/powder/compound which can generate heat or a hybrid mixture).
 Chemical reactions in Zone 20 - Hybrid mixtures:
 End-user must ensure that the cleaning fluid used does not create a hybrid mixture according to IEC 60079-10-1:2015 Annex I.1 in connection with powder / dust residues in the tank in zone 20.
 This should ensure that the atmosphere does not change to a classification that lies outside the machine's certified scope. When the machine is used for cleaning tanks containing potentially flammable dust atmospheres, and a potentially flammable fluid is used as the cleaning fluid then an assessment of the hybrid mixture shall be undertaken by the user, prior to operation.
 For further information see IEC 60079-10-1:2015 Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres. With focus on clause 3.6.6 and Annex I – Hybrid mixtures.



Warning: Fluid pressure
 The maximum permitted cleaning fluid pressure is 8 bar.



In addition to the above mentioned precautions relating to Directive 2014/34/EU, the Safety Precautions on page 12 must be observed.

5 Operation

MultJet 25

5.1 Normal operation

Cleaning Media

Use only media compatible with Stainless Steel AISI 316L, SAF 2205, PVDF or PEEK, PFA HP and EPDM. Normal detergents, moderate solutions of acids and alkalis are acceptable. Aggressive chemicals excessive concentrations of chemicals at elevated temperatures, as well as certain hypochlorides should be avoided. If in doubt, contact your local Alfa Laval sales office.

NOTE

Do not try to turn the hub with nozzles by hand, since this may damage the gear. The hub with nozzles can be turned by blowing compressed air through the inlet connection or by using a socket wrench on top of the turbine shaft.

PEEK is not resistant to concentrated sulphuric acid.

Product

In cases where the machine is submerged in, or in other ways exposed to, product the compatibility between stainless steel AISI 316L, SAF 2205, PVDF or PEEK, PFA and EPDM and the product must be considered carefully.

NOTE

EPDM swells significantly exposed to fatty materials.

Pressure

Avoid hydraulic shocks. Increase pressure gradually. Do not exceed 8 bar inlet pressure. Recommended inlet pressure: 5-7 bar. High pressure in combination with high flow rate increase consumption of wear parts. High pressure also reduces the cleaning effect.

Draining using compressed air

If the machine is drained using compressed air, then the compressed air pressure must not cause the machine body rotation to exceed 4.5 rpm (corresponding to approx. 13 sec. per rev of the body) in order to avoid risk of machine breakdown.

Draining should always be done inside the tank.

See paragraph 4.4 Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification (page 13).

Steam cleaning

If steam cleaning is done through the machine, the steam pressure must not cause the machine body rotation to exceed 12 rpm (corresponding to approx. 5 sec. per rev of the body) in order to avoid risk of machine breakdown. See paragraph 4.4 Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification (page 13).

Temperature

The maximum recommended cleaning fluid is 95°C. The maximum recommended steam temperature is 140°C. The maximum ambient temperature is 140°C.

See paragraph 4.4 Specific conditions for safe use in accordance with ATEX/IECEx certification (page 13).

After use cleaning

After use flush the machine with fresh water. Cleaning media should never allow to dry or settle in the system due to possible "salting out" or "scaling" of the cleaning media. If cleaning media contains volatile chloride solvents, it is recommended **not to flush with water** after use, as this might create hydrochloric acid.

5.2 Safety precautions

The machine is intended for use inside a tank only. As peak velocity of main jets reaches 40 m/sec., The Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 must not be operated in open air or when tank is open.



Warning: Hot chemicals and steam under pressure may be used for cleaning and sterilising. Protect against scalding and burning. Never tamper with or try to open clamps or other connections while system is in operation. Make sure that system is depressurised and drained before disassembly.

The cleaning jets impinging the tank surface are a source of noise. Depending on pressure and distance to the tank walls, noise level may reach up to 85 dB.



Warning: Tanks may contain poisonous/hazardous products or products which represent an environmental or safety risk. Never open tank and dismount the machine without checking previous tank contents and necessary precautions.

See also 3.6 ATEX/IECEx temperature class and code, page 9.

6 Maintenance

MultiJet 25

6.1 Preventive maintenance

Following the Alfa Laval Preventive Maintenance Guidelines and using the Alfa Laval Service Kits ensures the availability of your equipment at all times and enables you to plan your operating budget and your downtime. The risk of unscheduled breakdowns due to component failure is virtually eliminated and in the long term your operating costs are reduced.

Alfa Laval Tank Cleaning Equipment Service Kits contain all you need. They comprise genuine Alfa Laval spare parts, manufactured to the original specifications.

The recommended preventive maintenance program is based on tank cleaning machines working in average conditions. However, a tank cleaning machine, exposed to heavy soiling and recirculation CIP liquid containing abrasives and/or particulates, needs more frequent attention than one exposed to light/no soiling and recirculation with ordinary CIP liquid. Alfa Laval Kolding A/S recommends you to adjust the maintenance program to suit the cleaning task in hand. Contact your local Alfa Laval sales office for discussion.

For further information regarding Alfa Laval Service Kits and service intervals, see paragraph 6.3 Maintenance intervals and service kits on page 19 of this manual or the Spare Parts Manual.

NOTE

Handle the Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 with care. Take proper action to protect surfaces from being damaged. Always use only proper tools and the Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 standard tool kit (page 21). Never use force, hammer or pry components together or apart. Always perform all assembly/disassembly steps in the order described in this manual. Clean all surfaces prior to assembling. Especially take care of the mating surfaces. Work in a clear well-lighted work area.


According to "Regulation (EC) No 1935/2004 - Article 17" effective from 27th of October 2006, producers of food shall ensure traceability of the materials and articles intended to come into contact with foodstuffs. It is recommended that a traceability system is setup for replacement of wear parts and spare parts. This makes it possible to identify into which machine a given wear part or spare part has been inserted.

MultiJet 25

The items (#) refer to section 10 Parts list and drawing, service kits and tools and illustrations in section 6.6 Disassembly

6.2 Service and repair of ATEX/IECEX certified machines

Warning: All service and repair of ATEX/IECEX certified machines can be performed by Alfa Laval Kolding A/S, Denmark, or by an Alfa Laval service center approved by Alfa Laval Kolding A/S.



Changes to the machine are not allowed without approval by the person responsible for the ATEX/IECEX certification at Alfa Laval. If changes are made – or spare parts other than Alfa Laval original spare parts are used - the EC Type Examination certification (the ATEX/IECEX Directive) is no longer valid.

In order to ensure compliance with the ATEX/IECEX regulations and keep the machine ATEX/IECEX certification valid, the service or repair must be performed by an authorized person with knowledge of the ATEX/IECEX requirements and regulations. All spare parts must be original Alfa Laval spare parts and the repair or service must be done according to the instructions in this manual.

If a customer wishes to carry out service or repair himself, it is the responsibility of the repair shop to ensure that the ATEX/IECEX requirements are met in any way possible. After performing service or repair, the repair shop thus carries the full responsibility for traceability of all relevant documents in order to ensuring the retention of the ATEX/IECEX certification of the machine.

6.3 Maintenance intervals and service kits

It is recommended that the wear parts are check every 500 working hours for machine working under normal conditions. There is a Minor and a Major service kit for the Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 (see the following pages).

Service intervals



Every 500 working hours

1. Disassemble machine as described on the following pages.
2. Clean material build-up and deposits from internal parts with Scotch-brite, S-Ultra-fine, eventually chemical media and fine abrasive cloth.
3. Check Slide bearing (14) for wear. If end face of Slide bearing is worn more than 1 mm into Slide bearing, it should be replaced.
4. Check bearing for Turbine shaft top (24) in Cone and Body. If holes are worn oval to a max. diameter of more than 10.4 mm, Bearings should be replaced. Thickness of collar is to be min. 3.5 mm for Bearing in Body. If the Bearings are loose in a horizontal direction, the bearings should be replaced.
5. Check Carrier bearing (15.3). If worn oval to a max. diameter of more than 15.8 mm, it should be replaced.

6 Maintenance

MultiJet 25

The items (#) refer to section 10 Parts list and drawing, service kits and tools and illustrations in section 6.6 Disassembly

NOTE

Timely replacement of Slide bearings and bearings for Turbine shaft prevents costly damage to the gearbox.

6. Check Planet wheels (15.4 and 15.5) while still mounted in planet gear carrier (15.6). They must rotate easily on Shafts. If restriction or much clearance on Shafts is felt, Planet wheels should be dismantled for inspection of bearing bushes and Shafts for Planet wheel (15.2). Max diameter of holes: 6.2 mm. Check tooth wear. **If replacement is necessary, Planet wheels must be replaced as a pair.**
7. Check unrestricted rotation of Ball bearings. Inspect for build-up of foreign material on Stem nut (9) and Hub nut (18), in Ball retainers (10) and Ball races.
8. Inspect the nozzle vanes for foreign objects (e.g. product pulp, threads, etc.) and if necessary clean with care – damaging nozzles (or fouled nozzles) will decrease the throw length of the machine. Clean using compressed air or tweezers.
9. Replace washer (22)
10. Assemble machines as described in the following pages.
11. Check that the machine is in operating condition by inserting flathead Screwdriver in top of Turbine shaft, and easily turn Turbine shaft anti-clockwise. If any resistance is recognised, the machine should be disassembled in order to localise the cause.
12. If Ball races (16.2 and 17.2) on Stem and Hub as well as Stem/Hub nut w. Ball race (9 and 18) and Washer (22) are heavily worn, they should be replaced. Also the Ball retainer w. balls (10) should be replaced if heavily worn.

Apart from the parts specifically mentioned above, all the remaining wear parts should regularly be inspected for wear. Which parts that are wear parts appear from the Spare Part Manual, available from the on-line Alfa Laval product catalogue Anytime or the Close at hand spare part catalogue.

6 Maintenance

MultiJet 25

The items (#) refer to section 10 Parts list and drawing, service kits and tools and illustrations in section 6.6 Disassembly

6.4 General assembly/disassembly recommendations

- Always read the instruction and maintenance manuals carefully before service.
- Always replace all parts included in the Service Kit.
- Prior to assembly/disassembly clean all tools and fixtures to ensure that scratches and marks and trace of soil/corrosion from tools are avoided.
- Do not scratch or damage the surfaces of the machine.
 - Always place components on soft material

Check surfaces for product residues and clean all parts before assembly. Assembly of the machine is described on the following pages.

6.5 Tools

Disassembly Tools needed for Maintenance and Repair
(For tool kit see page 36).

Besides the standard toolkit for the Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 and the Torque wrench toolkit, additional tools are needed:

- Flathead screwdriver (size 5/32')
 - Slip joint pliers
 - Rubber hammer
 - Drift punch (size ø5 mm)
 - Bench vice (large enough to secure the body of the MultiJet 25)
 - 11 mm open ended spanner
 - Support ring (only for changing Ball races) - e.g. a piece of pipe with an inner diameter of ø84
-

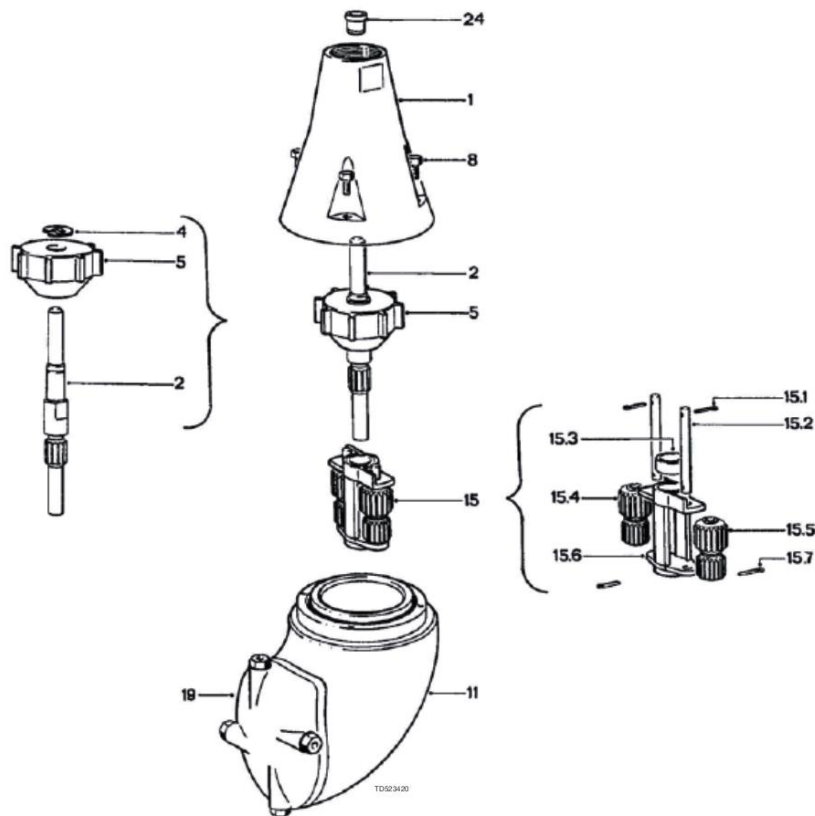
6 Maintenance

MultiJet 25

The items (#) refer to section 10 Parts list and drawing, service kits and tools and illustrations in section 6.6 Disassembly

6.6 Disassembly

1. Remove the 4 Screws (8) using a socket wrench (tool No. TE462A).
2. Lift off Cone (1).
3. Withdraw Turbine shaft (2) with Impeller. If necessary, turn Turbine shaft left and right.
4. Remove Circlip (4) using a flathead Screwdriver and pull off Impeller (5).
5. Withdraw Carrier assembly (15) while turning/rocking carrier left and right.
6. Remove Cotter pins (15.7) using a slip joint plier, pull out Shafts (15.2) and remove Planet wheels (15.4 and 15.5). If necessary, push out Carrier bearing (15.3)
7. If necessary, push out Bearing for Turbine shaft top (24) from Cone (1) using tool no. TE462A.



8. Remove Retainer spring (6). Use flathead Screwdriver to lift Retainer spring out of groove in Stem (16). Lift off Retaining ring (7).
9. Hold Body against table and unscrew Stem nut w. ball race (9) with Caliper (tool No. TE369) – see page 21. If the Stem Nut with Ball Race is difficult to loosen use rubber hammer on Caliper. Withdraw Stem (16) together with Ball retainer w. balls (10).
10. Remove the 3 Screws (12) with a socket wrench (tool No. TE462A) and draw out Internal gear (13).

6 Maintenance

MultiJet 25

The items (#) refer to section 10 Parts list and drawing, service kits and tools and illustrations in section 6.6 Disassembly

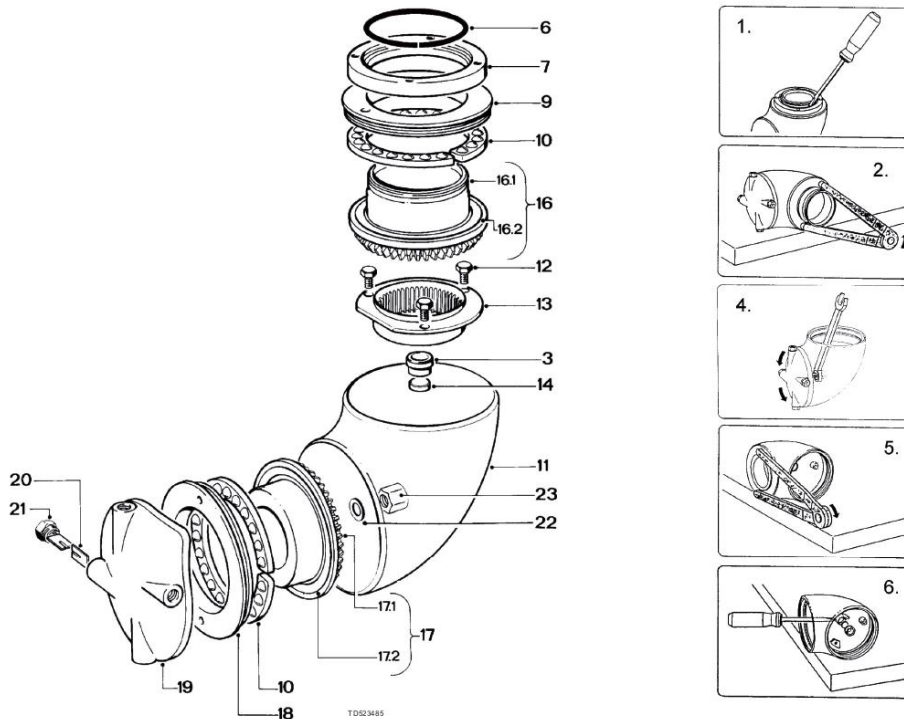
11. Secure the body in Bench vice (NB!!: use cloth between jaws and body to avoid making scratches and imperfections in body surface) so that the hub cover is secured. Insert a 13 mm spanner (tool No. TE81B041) onto cap nut (23) and unscrew the Cap nut (23). Remove Washer (22). IMPORTANT: Inserting drift punch into nozzle (21), instead of using the bench vice, to apply resistance for unscrewing Cap nut (23), damages the nozzle and the nozzle vane.
12. Hold Body against table and unscrew Hub nut w. ball race (18) with Caliper (tool No. TE369) – see drawing below. If the Stem nut w. Ball race is difficult to loosen use rubber hammer on Caliper.

NOTE

Left-hand thread

Withdraw Hub (17) together with Ball retainer w. balls (10).

13. With flathead screwdriver lift Slide bearing (14) and Bearing for Turbine shaft bottom (3) out of Body – see drawing below.
14. Unscrew Nozzles (21) with 11 mm spanner. Be careful not to damage Nozzle vanes (20) as this will severely reduce Nozzle performance. Nozzle vanes should not be removed unless they need to be replaced.



6 Maintenance

MultiJet 25

The items (#) refer to section 10 Parts list and drawing, service kits and tools and illustrations in section 6.6 Disassembly

6.7 Reassembly

Before reassembly, make sure that all parts are clean without deposits or build-up of foreign matter.

Inspect the nozzle vanes for foreign objects (e.g. product pulp, threads, etc.) and if necessary clean with care – damaging nozzles (or fouled nozzles) will decrease the throw length of the machine. Clean using compressed air or tweezers.

1. Insert Bearing for Turbine shaft top (24) in top of Cone (1). (Use drift punch to align and make the initial pressure-by-hand into the hole for the bearing. Then push it all the way in using the reverse end of the socket wrench (if needed use rubber hammer to apply pressure).

NOTE

The two Planet wheels are different: on Planet wheel 1, teeth of upper and lower gearing are aligned, while they are displaced ½ tooth on Planet wheel 2.

2. Insert Carrier bearing (15.3) and push with thumb. Insert Planet wheels (15.4 and 15.5) and Shafts (15.2) and secure with Cotter pins (15.7) – lock the Cotter pins by bending the ends around the Shafts (15.2). Check free rotation of Planet wheels.
3. Insert Carrier Assembly (15), into Body: Hold Body in one hand and use the other to turn Hub Cover (19) left and right with small rocking movements until carrier falls through Internal gear (13). Check that carrier is fully home on Bearing for Turbine shaft bottom (3) in Body: Rotate Carrier Assembly by hand a few rotations to check correct position and function. (Hub cover (19) is now locked and can only rotate by moving the Carrier assembly).
4. Mount Impeller (5) on Turbine shaft (2) and secure with Circlip (4) using flathead Screwdriver.
5. Insert Turbine shaft with Impeller through Carrier Assembly. Rotate Impeller to ensure correct insertion into Bearing for Turbine shaft (3) in Body. Check unrestricted rotation.
6. Mount Cone (1) over Turbine shaft and Retaining ring. Mount and tighten the 4 Screws (8) with Socket wrench (tool No. TE462A).
7. Place Slide bearing (14) in Body and push in Bearing for Turbine shaft (3) with thumb (or end of Socket Wrench). Make sure that Bearing is fully home.
8. Insert Hub (17) together with Ball retainer w. balls (10). Mount Hub nut w. Ball race (18) with Caliper (tool No. TE369) and tighten. The Hub nut w. Ball race should be tightened so much that it cannot be loosened by hand (e.g. use rubber hammer a few times on Caliper to increase torque). **Note: Left-hand thread.**
9. Insert Hub cover (19) into centre hole of Hub (17).
10. Place Washer (22) on threaded pin on Hub cover (19) and mount Cap nut (23). Insert spanner (tool No. TE81B041) into Body, hold Cap Nut (23) and by hand screw on Hub cover (19) and tighten to a torque of 25 Nm using torque wrench toolkit (tool. No. TE81087). Check free rotation of Hub.

Warning:



Tightening torque: 25 Nm
Use torque tool kit or alike

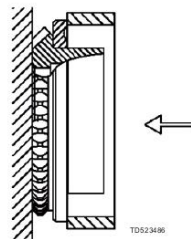
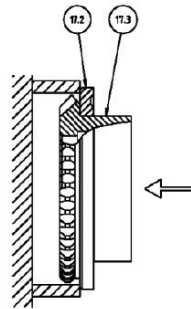
11. Insert Internal gear (13), mount Screws (12) and tighten with Socket wrench (tool No. TE462A).
12. Insert Stem (16) together with Ball retainer w. balls (10). Mount Stem nut w. ball race (9) with Caliper (tool No. TE369) and tighten. Turn Hub cover (19) and check unrestricted rotation.
13. Place Retaining ring (7) over Stem (16) and push on Retainer spring (6) and "click" into groove in Stem. Check free rotation.

MultiJet 25

The items (#) refer to section 10 Parts list and drawing, service kits and tools and illustrations in section 6.6 Disassembly

6.8 Replacement of ball races

1. Place Stem or Hub completely (16 or 17) in a support ring (e.g. a piece of pipe with an inner diameter of $\varnothing 84$) and press off Ball race. Press parallel. Be careful not to damage teeth and opposite end face of Stem.
2. With the support ring (e.g. a piece of pipe with an inner diameter of $\varnothing 84$) press Ball race fully home. Press parallel. Be careful not to damage surface of Ball race.



7 Trouble shooting guide

MultJet 25

Symptom: Slow rotation or failure of the machine to rotate:	Fault finding
Possible Causes	Check that the torque of the Cap nut (23) is at least 25 Nm. Remove Cap nut (23) and check Washer (22) for wear and signs of corrosion - replace if needed.
Loose Cap nut	a). Check if supply valve is fully open.
Wear	b). Check if inlet pressure to machine is correct.
	c). Check supply line/filter for restrictions/clogging.
	d). Remove Nozzles and check for clogging. If blocked, carefully clean Nozzle without damaging Nozzles vanes and Nozzle tip.
No or insufficient liquid flow	e). Remove Cone (see page 22) and check for clogging in Impeller of inlet guide inside Cone and in Impeller area.
If large particles repeatedly get jammed in the machine, install filter or reduce mesh size of installed filter in supply line.	
Foreign material or material build-up	Insert Screwdriver in Screw in top of Turbine shaft and easily turn Turbine shaft clockwise. If any resistance is recognised, disassemble machine to localise cause. Remove Turbine shaft with Impeller and Carrier assembly (see page 22) and remove foreign material. Remove Turbine shaft with Impeller (see page 22) and clean Bearing.
a). Impeller jammed	Remove foreign material from Planet wheels and internal gears. Check rotation of Planet wheels. If restriction is recognised, disassemble Carrier assembly (see page 22) and remove material build up, especially on Shafts and bushes in Planet wheels.
b). Turbine shaft sluggish in Bearing	Remove Carrier assembly (see page 22). Turn Hub cover and check unrestricted rotation. Remove Stem and Hub (see page 22 ff). Remove foreign material/ material build-up on Stem, Hub and inside Nut w. ball race. Clean Ball races and Ball retainer with balls. Assemble Stem/Hub, Ball retainer with balls and Stem/Hub nut with ball race. Remove Stem and Hub (see page 22 ff). Clean teeth on Stem and Hub.
c). Planet gear jammed/sluggish	
d). Stem or Hub jammed/sluggish	
e). Bevel gears jammed	
Wear	See page 19.
a) Slide bearings	See page 19.
b) Bearings for Turbine shaft	See page 19.
c) Planet wheels	Check clearance of Planet wheels on Shafts. Transverse movement should not exceed 0.3 mm.
d) Shafts for Planet wheels	Check clearance in Carrier bearing and Bearing for Turbine shaft. Transverse movement should not exceed 0.3 mm. Also inspect teeth for wear.
e) Turbine shaft	
Mechanical defects	Replace Planet wheel.
a) Planet wheels. Teeth broken	Replace Shafts for Planet wheels.
b) Planet wheel can not rotate on Shafts/ Shafts bent	Inspect teeth on Stem and Hub for deformation. Mount Hub and Stem in Body (See page 24). Hold Body in upside down position and rotate Hub to check that bevel gears can work together. If damaged: Replace Stem and/or Hub.
c) Damaged teeth on Bevel gear	If hard particles get stuck between Stem nut and Stem or Hub nut and Hub, the particles will damage the parts. The damaged parts should be replaced.
d) Damage on Stem and Hub-nut	

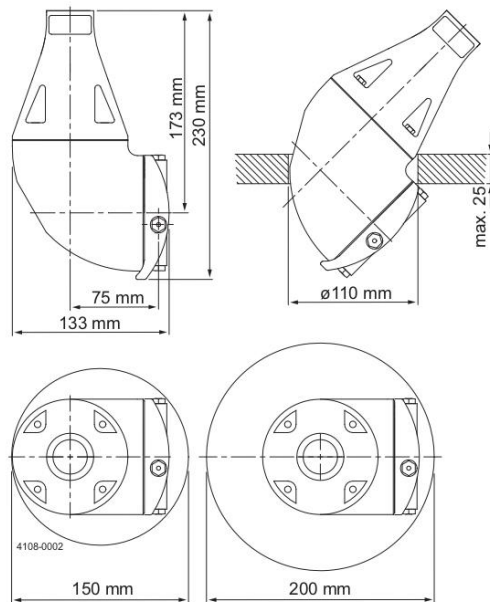
8 Technical data

MultJet 25

8.1 Technical data

Weight of machine:	5.1 kg (11.2 lb)
Working pressure:	3-8 bar (40-115 psi)
Recommended inlet pressure:	5-7 bar (70-100 psi)
Max. inlet pressure:	8 bar (115 psi)
Max. recommended working liquid temperature:	95°C (200°F)
Max. recommended working steam temperature:	140°C (284°F)
Max. ambient temperature:	140°C (284°F) when not operated
Materials:	Stainless steel AISI 316L, SAF 2205, PFA, PEEK, PVDF, A4/EPDM, Hastelloy C22, Hastelloy C276, PEEK, Viton, PFA
Surface finish:	External surface finish: Mat

Principal dimensions in mm



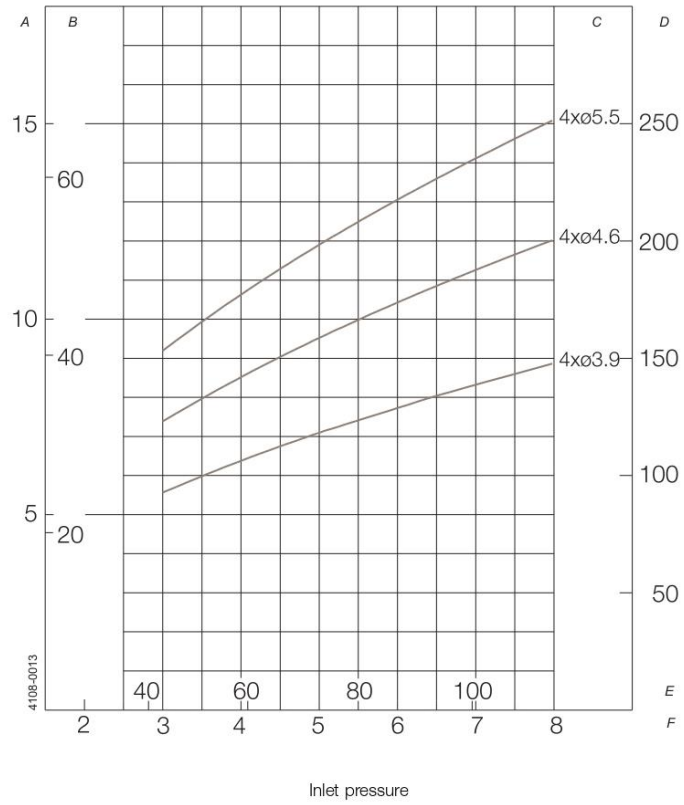
Minimum required passage: $\varnothing 110$ mm (4.33 inch) at flange thickness 25 mm (0.98 inch). Otherwise $\varnothing 150$ mm (5.90 inch).

8 Technical data

MultJet 25

Performance Data:

Flow rate



A: m³/h

B: USgpm

C: nozzle sizes

D: l/min

E: psi

F: bar

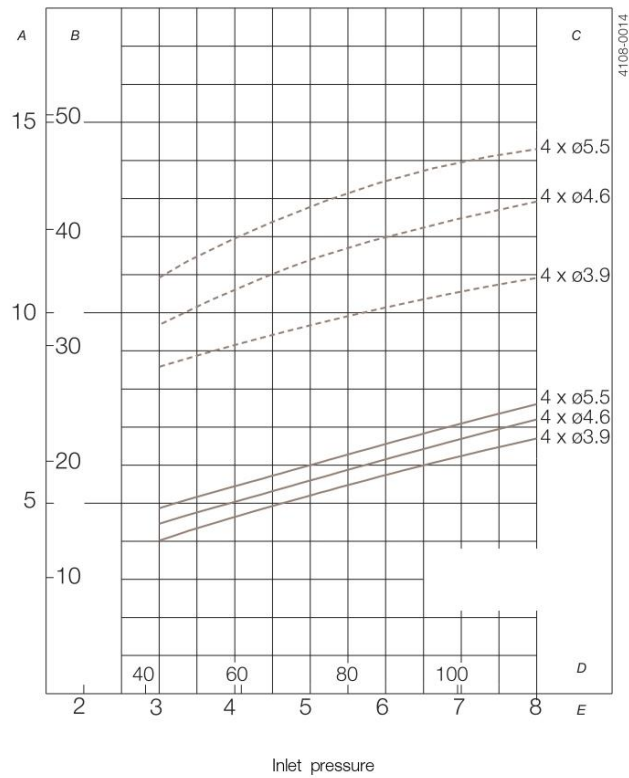
8 Technical data

MultJet 25

Performance Data:

Throw length

Max. static
 Effective
T06.2021



A: m

B: ft

C: nozzle sizes

D: psi

E: bar

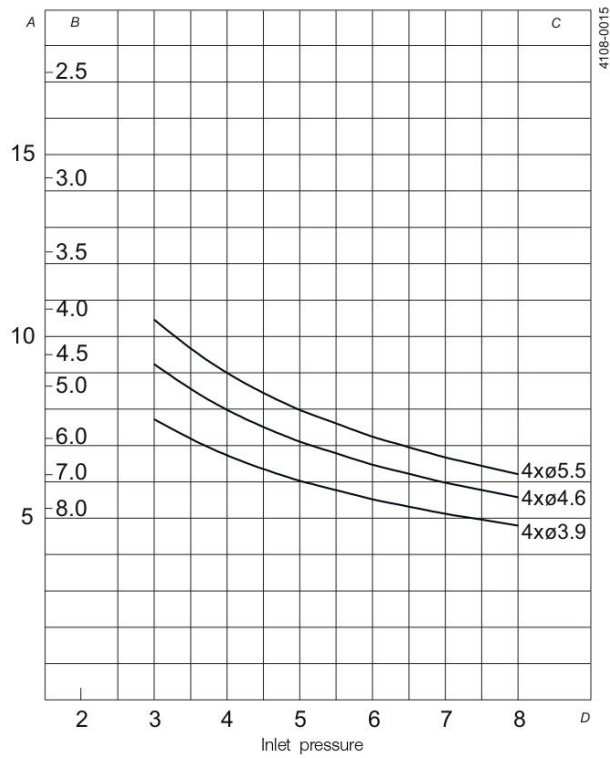
Note: Throw lengths are measured as horizontal throw length at static condition. Vertical throw length upwards is approx. 1/3 less. Effective throw length is defined as impact centre of jet 250 mm water column (50 lbs/sq.ft). Effective throw length varies depending on jet transverse speed over surface, substance to be removed, cleaning procedure and agent. The inlet pressure has been taken immediately before the machine inlet. In order to achieve the performance indicated in the curves, the pressure drop in the supply lines between pump and machine must be taken into consideration.

8 Technical data

MultiJet 25

Performance Data:

Cleaning Time, f. complete Pattern (=8 cycles)



A: min.

B: RPM of machine body

C: nozzle sizes

D: bar

9 Product programme

This manual covers the product program for Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 tank cleaning machine

9.1 Standard configurations

Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 options


Connection	Nozzles (mm) (1/2" thread conn.)	Standard Article No.
1" BSP, Female	4 x ø3.9	TE20G100-xx
	4 x ø4.6	TE20G102-xx
	4 x ø5.5	TE20G104-xx
1" NPT, Female	4 x ø3.9	TE20G120-xx
	4 x ø4.6	TE20G122-xx
	4 x ø5.5	TE20G124-xx

See page 33 for choices of sanitary welding connectors

Index no.:
TE20GXXX (no postfix): version w. PVDF impeller
TE20GXXX-X2: version w. PEEK impeller

9.2 Available add-ons

TE20XXXX-7X:	ATEX/IECEX
--------------	------------

Explanation to Add-ons	
ATEX/IECEX	 <p>ATEX/IECEX includes: ATEX/IECEX certified machine for use in explosive atmospheres. Category 1 for installation in zone 0/20 in accordance with directive 2014/34/EU.</p> <p>II 1G Ex h IIC 85°C...175°C Ga II 1D Ex h IIC T85°C...T140°C Da</p>

9 Product programme

This manual covers the product program for Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 tank cleaning machine

9 Product programme

This manual covers the product program for Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 tank cleaning machine

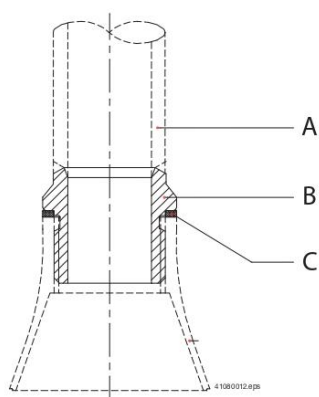
9.3 Available welding connections

Welding adapter (see right) with sealing assembly between Down pipe, Welding adapter and machine.

Welding connections are ordered separately.

Pipe	Dimensions in mm	Connection thread	Article no.
1" ISO thread pipe:	ø33.7 x 3,25	1" BSP	TE52D030
1" ANSI Sch.40S:	ø33.4 x 3,38	1" NPT	TE52D031
1 ½" ISO Dairy pipe:	ø38 x 1.2	1" BSP	TE52D032

Standard cone

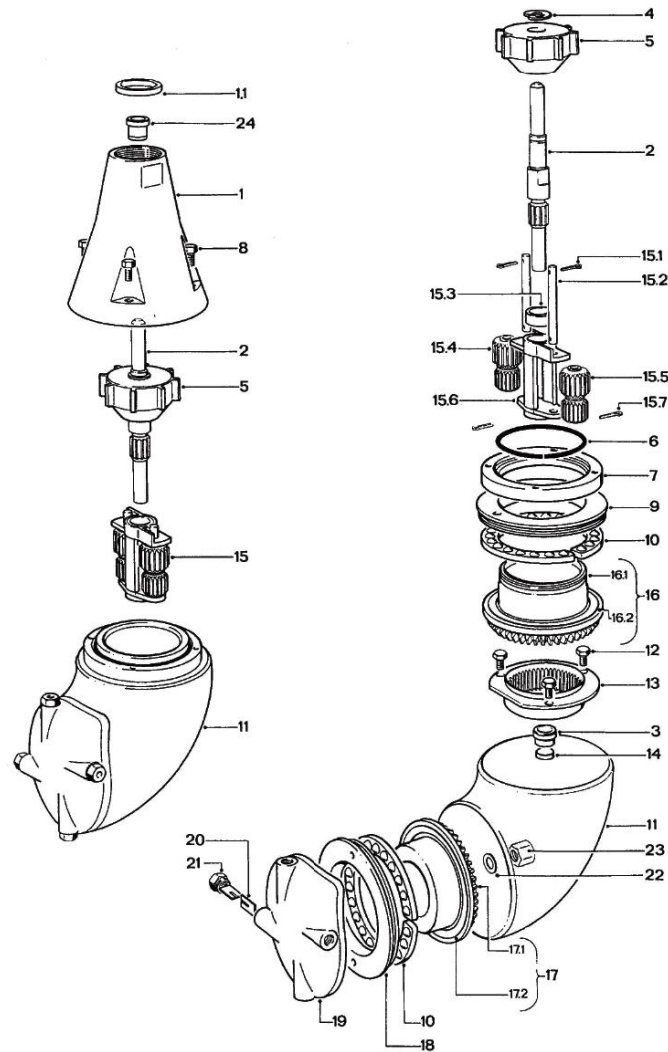


A: Down pipe
B: Welding adapter
C: Seal PTFE

10 Parts list and drawing, service kits and tools

MultiJet 25

10.1 Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25



10 Parts list and drawing, service kits and tools

MultiJet 25

Parts list			Service kits	
Pos.	Qty	Denomination	Denomination	
1	□	1 Cone		
2		1 Turbine shaft		
3	◆●	1 Bearing for Turbine shaft	Minor service kit MultiJet 25	TE20G299
4		1 Circlip	Major service kit MultiJet 25	TE20G288
5	□	1 Impeller		
6		1 Retainer spring		
7		1 Retaining ring		
8		4 Screw		
9	●	1 Stem nut with ball race		
10	●	2 Ball retainer with balls		
11		1 Body		
12		3 Screw		
13		1 Internal gear		
14	◆●	1 Slide bearing		
15		1 Carrier assembly		
15.1	●	2 Cotter pin		
15.2		2 Shaft for Planet wheel		
15.3	◆●	1 Bearing for planet gear carrier		
15.4	◆●	1 Planet wheel I		
15.5	◆●	1 Planet wheel II		
15.6		1 Planet gear carrier		
15.7		2 Cotter pin (= pos. 15.1)		
16		1 Stem complete		
16.1		1 Stem		
16.2		1 Ball race		
17		1 Hub complete		
17.1		1 Hub		
17.2	●	1 Ball race (= pos. 16.2)		
18	●	1 Hub nut with ball race		
19	□	1 Hub cover		
20		8 Nozzle vane		
21	□	4 Nozzle		
22	◆●	1 Washer		
23		1 Cap nut		
24	◆●	1 Bearing for turbine shaft top		

Configuration according to delivery note/order.

Parts marked with ◆ are included in the Minor Service Kit for MultiJet 25: TE20G299

Parts marked with ● are included in the Major Service Kit for MultiJet 25: TE20G288

The machine can be delivered with ATEX/IECEx certification.

See page 31 for more information on available add-ons.

Please note that some of the polymer parts are in PEEK, which is not resistant to concentrated sulfuric acid.

Please refer to the Spare Part Manual for information on item numbers and materials. The Spare Part manual is available from the on-line Alfa Laval product catalogue Anytime or the Close at hand spare part catalogue.

10 Parts list and drawing, service kits and tools

MultiJet 25

10.2 Tools

Alfa Laval Toftejorg MultiJet 25 Tool kit
Item number TE81B085

Denomination	Tool item number
Caliper	TE369
Socket wrench w. pin	TE462A
Spanner for MultiJet 25 (flat jawed)	TE81B040
Spanner (13 mm)	TE81B041

Torque wrench tool
Item number TE81B087

Denomination	Tool item number
Torque wrench with interchangeable ratchet head	TE81B088
Ring insert tool for torque wrench	TE81B089

MultiJet 25

11.1 Service and Repair

Upon every return of a product, no matter if for modifications or repair, it is necessary to contact your local Alfa Laval office to guarantee a quick execution of your request.

You will receive instructions regarding the return procedure from your local Alfa Laval office. Be sure to follow the instructions closely.

11.2 How to Order Spare Parts

On the parts drawings as well as on all instruction drawings, the individual parts have a position number, which is the same on all drawings. From the position numbers, the part is easily identified in the parts list, page 34.

Individual parts should always be ordered from the parts list, page 34. Item number and denomination should be clearly stated. Please refer to the Spare part manual for information on item numbers. The Spare part manual is available from the on-line Alfa Laval product catalogue Anytime or the Close at hand spare part catalogue.

Please also quote the type of machine and serial number. This will help us to help you. The type and serial numbers are stamped on the body of the tank cleaning machine.

11.3 How to contact Alfa Laval Kolding A/S

For further information please feel free to contact:

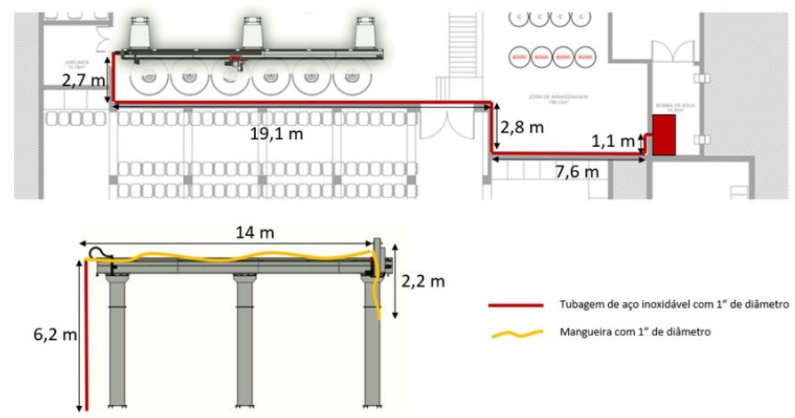
Alfa Laval Kolding A/S
31, Albuen - DK 6000 Kolding - Denmark
Registration number: 30938011
Tel switchboard: +45 79 32 22 00 - Fax switchboard: +45 79 32 25 80
www.toftejorg.com, www.alfalaval.dk - info.dk@alfalaval.com

Contact details for all countries are continually updated on our websites

Anexo II – Cálculo da perda de carga

Página deixada propositadamente em branco

> restart



> #Dados iniciais:

$$Q := 5.7 : \# \frac{m^3}{h}$$

$$Da := 25.4 : \# \text{mm diâmetro da tubagem em inox}$$

$$Dm := 25.4 : \# \text{mm diâmetro da mangueira}$$

$$\rho := 971.79 : \# \frac{kg}{m^3} \text{ densidade da água a } 80 \text{ C}$$

$$\mu := 0.355 \cdot 10^{-3} : \# \frac{Ns}{m^2} \text{ viscosidade dinâmica da água a } 80 \text{ C}$$

>

Temperature	Density (0-100°C at 1 atm, >100 °C at saturation pressure)					Specific weight		Thermal expansion coefficient
[°C]	[g/cm³]	[kg/m³]	[lb/ft³]	[lbm/ft³]	[lbm/gal(US liq)]	[kN/m³]	[lb/ft³]	[10⁻⁴ K⁻¹]
0.1	0.9998495	999.85	1.9400	62.4180	8.3441	9.8052	62.419	-0.68
1	0.9999017	999.90	1.9401	62.4219	8.3446	9.8057	62.422	-0.50
4	0.9999748	999.97	1.9403	62.4264	8.3452	9.8064	62.426	0.003
10	0.9997000	999.70	1.9397	62.4094	8.3428	9.8037	62.409	0.58
15	0.9991028	999.10	1.9386	62.3719	8.3379	9.7978	62.372	1.51
20	0.9982087	998.21	1.9368	62.3160	8.3304	9.7891	62.316	2.07
25	0.9970470	997.05	1.9345	62.2406	8.3208	9.7777	62.244	2.57
30	0.9956488	995.65	1.9319	62.1503	8.3091	9.7640	62.156	3.03
35	0.9940320	994.03	1.9287	62.0554	8.2956	9.7481	62.055	3.45
40	0.9922152	992.22	1.9252	61.9420	8.2804	9.7303	61.942	3.84
45	0.99021	990.21	1.9213	61.8109	8.2637	9.7109	61.817	4.20
50	0.98804	988.04	1.9171	61.6613	8.2456	9.6904	61.681	4.54
55	0.98569	985.69	1.9126	61.5040	8.2260	9.6693	61.535	4.86
60	0.98320	983.20	1.9077	61.3392	8.2052	9.6479	61.379	5.16
65	0.98056	980.55	1.9025	61.1673	8.1831	9.6159	61.214	5.44
70	0.97778	977.76	1.8972	61.0000	8.1598	9.5836	61.040	5.71
75	0.97484	974.84	1.8915	60.8273	8.1354	9.5509	60.857	5.97
80	0.97179	971.79	1.8856	60.6500	8.1100	9.5180	60.667	6.21
85	0.96861	968.61	1.8794	60.4683	8.0834	9.4848	60.468	6.44
90	0.96531	965.31	1.8730	60.2823	8.0559	9.4505	60.262	6.66
95	0.96189	961.89	1.8664	60.0949	8.0274	9.4155	60.049	6.87
100	0.95835	958.35	1.8595	59.9278	7.9978	9.3802	59.828	7.03
...

Temperature T (°C)	Dynamic Viscosity μ (Ns/m²) x 10 ⁴	Kinematic Viscosity ν (m²/s) x 10 ⁶
0	1.787	1.787
5	1.519	1.519
10	1.307	1.307
20	1.002	1.004
30	0.798	0.801
40	0.653	0.658
50	0.547	0.553
60	0.467	0.475
70	0.404	0.413
80	0.355	0.365
90	0.315	0.326
100	0.282	0.294

- 1 N s/m² = 1 Pa s = 10 poise = 1,000 milliPa s
- 1 m²/s = 1 x 10⁶ cm²/s = 1 x 10⁶ stokes = 1 x 10⁸ centistokes

#Calculo da velocidade nas tubagens e mangueira

$$va := \frac{Q}{\text{Pi} \cdot \left(\frac{Da \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 3600}; \# \frac{m}{s} \text{ velocidade escoamento na tubagem de inox}$$

$$vm := \frac{Q}{\text{Pi} \cdot \left(\frac{Dm \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 3600}; \# \frac{m}{s} \text{ velocidade escoamento na mangueira}$$

#Calculo do número de Reynolds

$$Re_{\text{tubagem}} := \frac{(va \cdot \rho \cdot Da \cdot 10^{-3})}{\mu}; \# \text{ Numero de Reynolds na tubagem de aço inox}$$

$$Re_{\text{mangueira}} := \frac{(vm \cdot \rho \cdot Dm \cdot 10^{-3})}{\mu}; \# \text{ Numero de Reynolds na tubagem de aço mangueira}$$

$$va := \frac{9.816686300}{\pi}$$

$$vm := \frac{9.816686300}{\pi}$$

$$Re_{\text{tubagem}} := \frac{6.825629366 \cdot 10^5}{\pi}$$

$$Re_{\text{mangueira}} := \frac{6.825629366 \cdot 10^5}{\pi} \quad (1)$$

> evalf(va);

$$3.124748298 \quad (2)$$

> evalf(Re_tubagem);
> evalf(Re_mangueira);

$$2.172665306 \cdot 10^5$$

$$2.172665306 \cdot 10^5$$

(3)

> #A partir dos valores obtidos é possível verificar que estamos em regime turbulento, valores acima de 10^4

#De seguida iria—se recorrer ao diagrama de Moody por forma a se obter o fator de perda de carga, mas para facilitar o cálculo deste valor recorreu-se a três equações que permitem chegar a este valor sem o diagrama

#Dados necessários

$\epsilon_{\text{tubagem}} := 0.002$: #[mm] Rugosidade da tubagem em inox

$\epsilon_{\text{mangueira}} := 0.01$: #[mm] Rugosidade da mangueira

Material	Roughness, ϵ	
	ft	mm
Glass, plastic	0	0
Concrete	0.003-0.03	0.9-9
Wood stave	0.0016	0.5
Rubber, smoothed	0.000033	0.01
Copper or brass tubing	0.000005	0.0015
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Wrought iron	0.00015	0.046
Stainless steel	0.000007	0.002
Commercial steel	0.00015	0.045

> #Cálculo para a tubagem de inox

$$A_{\text{tubagem}} := \left(2.457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re_{\text{tubagem}}} \right)^{0.9} + \left(\frac{0.27 \cdot \epsilon_{\text{tubagem}}}{Da} \right)} \right) \right)^{16};$$

$$B_{\text{tubagem}} := \left(\frac{37530}{Re_{\text{tubagem}}} \right)^{16};$$

$$f_{\text{tubagem}} := 8 \cdot \left(\left(\frac{8}{Re_{\text{tubagem}}} \right)^{12} + \frac{1}{\left(A_{\text{tubagem}} + B_{\text{tubagem}} \right)^{\frac{3}{2}}} \right)^{\frac{1}{12}};$$

#Fator de atrito para a tubagem

#outro método, usado só para comprovar o valor

$$f_{\text{tubagem2}} := \text{solve} \left(\frac{1}{\text{sqrt}(f)} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\epsilon_{\text{tubagem}}}{3.7 \cdot Da} + \frac{2.51}{Re_{\text{tubagem}} \cdot \text{sqrt}(f)} \right), f \right);$$

#Cálculo para a mangueira

$$A_mangueira := \left(2.457 \cdot \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re_mangueira} \right)^{0.9} + \left(\frac{0.27 \cdot \varepsilon_mangueira}{Dm} \right)} \right) \right)^{16};$$

$$B_mangueira := \left(\frac{37530}{Re_mangueira} \right)^{16};$$

$$f_mangueira := 8 \cdot \left(\left(\frac{8}{Re_mangueira} \right)^{12} + \left(\frac{1}{(A_mangueira + B_mangueira)^{\frac{3}{2}}} \right) \right)^{\frac{1}{12}};$$

#Fator de atrito para a mangueira

#outro método, usado só para comprovar o valor

$$f_mangueira2 := \text{solve} \left(\frac{1}{\text{sqrt}(f)} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_mangueira}{3.7 \cdot Dm} + \frac{2.51}{Re_mangueira \cdot \text{sqrt}(f)} \right), f \right);$$

$$A_tubagem := 1.763934700 \cdot 10^6 \ln(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.00002125984252)^{16}$$

$$B_tubagem := 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16}$$

$$f_tubagem := 8 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right)^{\frac{1}{12}}$$

$$\left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.00002125984252)^{16} \right. \\ \left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{12}$$

$$+ 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \Big)^{\frac{1}{12}}$$

$$f_tubagem2 := 0.01603301121$$

$$A_mangueira := 1.763934700 \cdot 10^6 \ln(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.0001062992126)^{16}$$

$$B_mangueira := 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16}$$

$$f_mangueira := 8 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right)^{\frac{1}{12}}$$

$$\left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.0001062992126)^{16} \right. \\ \left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{12}$$

$$+ 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \Big)^{\frac{1}{12}}$$

$$f_mangueira2 := 0.01810365728$$

(4)

> #Calculo da perda de carga

#Para o calculo da perda de carga utilizou-se o principio de Bernoulli

$$y_1 + \frac{P_1}{\rho g} = y_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \sum \lambda$$

λ representa as perdas de carga localizada e continua, obtem – se então a seguinte equação :

$z_1 := 0$:# [m] Altura do inicio do troço relativamente ao nível do solo
 $z_2 := 6.2$:# [m] Altura do inicio do troço relativamente ao nível do solo
 $z_3 := 4$:# [m] Altura do inicio do troço relativamente ao nível do solo

$L_{tubagem} := 39.5$:# [m] comprimento da linha de tubo inoxidavel
 $L_{mangueira} := 17.2$:# [m] comprimento da mangueira

$k_{tubagem} := 17.8$:
 #Como ainda não se sabe ao certo a quantidade de conponetes instalados nas tubagens achou-se o coeficeitne para algumas valvulas que se sabe e submeteu-se um coenficiente de seguraça de mais 10

$k_{mangueira} := 0.15$:
 #Definiu-se 0 porque a perda de carga nos ligadores rápidos da mengueira serão somados no final, pois vêm diretamente do catalogo.

#Troço em aço inoxidavel

$$\Delta Localizada_{tubagem} := \frac{k_{tubagem} \cdot \rho \cdot v a^2}{2};$$

$$\Delta Linear_{tubagem} := f_{tubagem} \cdot \frac{L_{tubagem}}{Da \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{\rho \cdot v a^2}{2};$$

$$\Delta P_{tubagem} := \rho \cdot 9.81 \cdot z_2 + \Delta Localizada_{tubagem} + \Delta Linear_{tubagem}; \#[Pa]$$

$$\Delta P_{tubagem_bar} := \Delta P_{tubagem} \cdot 10^{-5}; \#[bar]$$

$$\Delta Localizada_{tubagem} := \frac{8.334743870 \cdot 10^5}{\pi^2}$$

$$\Delta Linear_{tubagem} := \frac{1}{\pi} \left(5.825398265 \cdot 10^8 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right) / \right.$$

$$\left. \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln \left(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.00002125984252 \right) \right)^{16} \right.$$

$$\left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{3/2} \right)^{1/12}$$

$$\Delta P_{tubagem} := 59106.21138 + \frac{8.334743870 \cdot 10^5}{\pi^2}$$

$$+ \frac{1}{\pi} \left(5.825398265 \cdot 10^8 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right) / \right.$$

$$\Delta P_{tubagem_bar} := 0.5910621138 + \frac{8.334743870}{\pi^2} + \frac{1}{\pi^2} \left(5825.398265 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} \right. \right. \\ \left. \left. + 1 / \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.00002125984252) \right)^{16} + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{3/2} \right)^{1/12} \quad (5)$$

> evalf(ΔLinear_tubagem);
 evalf(ΔLocalizada_tubagem);
 evalf(ρ·9.81·z2);
 evalf(ΔP_tubagem_bar);

1.181212818 10⁵
 84448.61139
 59106.21138
 2.616761046

(6)

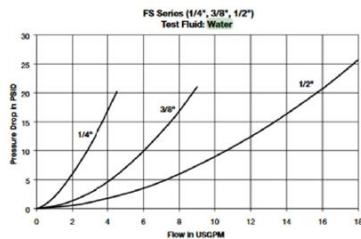
> #Traço da mangueira

$$\Delta Localizada_mangueira := \frac{k_mangueira \cdot \rho \cdot v m^2}{2};$$

$$\Delta Linear_mangueira := f_mangueira \cdot \frac{L_mangueira}{Dm \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{\rho \cdot v m^2}{2};$$

$$\Delta P_mangueira := \rho \cdot 9.81 \cdot (z3 - z2) + \Delta Localizada_mangueira + \Delta Linear_mangueira; \#[Pa]$$

$$\Delta P_ligadores := 0.48 \cdot 2; \#[bar] \text{ retirado do gráfico}$$



$$\Delta P_mangueira_bar := \Delta P_mangueira \cdot 10^{-5}; \#[bar]$$

$$\Delta P_{total_mangueira} := \Delta P_{mangueira_bar} + \Delta P_{ligadores; \# [bar]}$$

$$\Delta Localizada_mangueira := \frac{7023.660565}{\pi^2}$$

$$\Delta Linear_mangueira := \frac{1}{\pi^2} \left(2.536629118 \cdot 10^8 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right) / \right.$$

$$\left. \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln \left(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.0001062992126 \right) \right)^{16} \right.$$

$$\left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{3/2} \Big)^{1/12}$$

$$\Delta P_{mangueira} := -20973.17178 + \frac{7023.660565}{\pi^2}$$

$$+ \frac{1}{\pi^2} \left(2.536629118 \cdot 10^8 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right) / \right.$$

$$\left. \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln \left(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.0001062992126 \right) \right)^{16} \right.$$

$$\left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{3/2} \Big)^{1/12}$$

$$\Delta P_{ligadores} := 0.96$$

$$\Delta P_{mangueira_bar} := -0.2097317178 + \frac{0.07023660565}{\pi^2}$$

$$+ \frac{1}{\pi^2} \left(2536.629118 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right) / \right.$$

$$\left. \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln \left(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.0001062992126 \right) \right)^{16} \right.$$

$$\left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{3/2} \Big)^{1/12}$$

$$\Delta P_{total_mangueira} := 0.7502682822 + \frac{0.07023660565}{\pi^2}$$

$$+ \frac{1}{\pi^2} \left(2536.629118 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 \right) / \right.$$

$$\left. \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln \left(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.0001062992126 \right) \right)^{16} \right.$$

$$\left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{3/2} \Big)^{1/12}$$

> evalf(ΔLinear_mangueira);
evalf(ΔLocalizada_mangueira);
evalf(ρ·9.81·(z3 - z2));
evalf(ΔP_total_mangueira);
evalf(ΔP_mangueira_bar);

$$\begin{aligned}
 & 58476.29524 \\
 & 711.6456017 \\
 & -20973.17178 \\
 & 1.342147691 \\
 & 0.3821476906
 \end{aligned} \tag{8}$$

> #A perda de carga total é designada pela soma dos dois resultados

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{total_da_linha} &:= \Delta P_{tubagem_bar} + \Delta P_{total_mangueira};#[bar] \\
 \Delta P_{total_da_linha} &:= 1.341330396 + \frac{8.404980476}{\pi^2} + \frac{1}{\pi^2} \left(5825.398265 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 1 / \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln \left(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.00002125984252 \right)^{16} + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^3 \right. \\
 & \left. \left. \right)^{1/12} \right) + \frac{1}{\pi^2} \left(2536.629118 \left(6.719971281 \cdot 10^{-60} \pi^{12} + 1 / \right. \right. \\
 & \left. \left. \left(1.763934700 \cdot 10^6 \ln \left(0.00003234892134 \pi^{0.9} + 0.0001062992126 \right)^{16} \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + 6.978688198 \cdot 10^{-21} \pi^{16} \right)^{3/2} \right)^{1/12} \right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 & > evalf(\Delta P_{total_da_linha}); \\
 & 3.958908736
 \end{aligned} \tag{10}$$

