



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Beatriz Lobo Cerqueira

Automatização do processo de limpeza de cristais de gelo das cuvetes



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Beatriz Lobo Cerqueira

Automatização do processo de limpeza de cristais de gelo das cuvetes

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

Professor Doutor José Mendes Machado

Professor Doutor Filipe Alexandre de Sousa Pereira

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial
CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que de qualquer forma contribuíram para o desenvolvimento e concretização deste trabalho:

Ao professor Doutor Filipe Pereira, pela disponibilidade e apoio total durante o projeto, por ter facultado todos os materiais necessários à sua concretização, e por todos os conhecimentos transmitidos.

Ao professor Luís Freitas por todo o apoio e paciência prestados no laboratório de mecatrónica.

Ao professor Doutor José Machado, pelas sábias sugestões, e por ter acreditado no sucesso deste projeto desde o primeiro momento.

Agradeço à equipa da Brasmar, especialmente ao Carlos Martins e toda a equipa da Manutenção por me ajudarem em várias situações do trabalho.

Kika, Isa, Arezes, Kika Machado, Mentas, Cinzas, Marta, Baba, Lagos, Indi, Michael, Zara, Cansas, Hugo, Brito, Ruca, Karpov, Jackie e Shaiter, a vocês um enorme obrigada por tornarem estes cinco anos uma fase tão bonita da minha vida, por todas as memórias, carinho e pelo que ainda está para vir. Obrigada.

Jé e Duda obrigada pelo companheirismo desde sempre e por tornarem esta etapa especial.

Mais importante, obrigada à minha família, aos meus queridos pais e avó e todos os restantes, pelo amor incondicional e pela confiança que sempre depositaram em mim, sem vocês nada disto seria possível.

Por último, gostaria de dedicar este trabalho ao meu querido avô Domingos, que, apesar de não ter tido a oportunidade de acompanhar o culminar desta etapa tão especial da minha vida, estará para sempre presente na minha memória e coração. Agradeço-lhe por todos os ensinamentos, pela sabedoria e pelos valores que me transmitiu, e que continuam a guiar-me em cada conquista e desafio que enfrento.

A todos vocês, o meu sincero obrigada.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A presente dissertação foi realizada no âmbito do estágio curricular do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, com especialização em Sistemas Mecatrónicos, e teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma solução automatizada para o processo de limpeza de cristais de gelo em cuvetes de polvo, na unidade industrial da empresa Brasmar, na Trofa. O projeto surgiu da necessidade de reduzir o esforço físico associado à limpeza manual com pistolas de ar comprimido, melhorar as condições ergonómicas do posto de trabalho e aumentar a eficiência global do processo, nomeadamente ao nível da uniformidade da limpeza e da redução do consumo de ar comprimido.

Com base na análise de soluções anteriormente utilizadas, foi concebido e implementado um sistema composto por válvulas pneumáticas de impacto, controladas por um autómato programável (PLC Omron CP1E-N40DR-D), sensores fotoelétricos para deteção de cuvetes e uma interface homem-máquina (HMI NB7W) para parametrização de variáveis e monitorização do sistema. A lógica de funcionamento foi desenvolvida em linguagem Ladder, permitindo a atuação sequencial e seletiva dos bicos de sopro, ajustada ao tipo e presença de cuvetes.

Foram realizados testes comparativos entre os métodos manual e automático, tendo sido avaliados parâmetros como o tempo de limpeza, o consumo total de ar comprimido, a eficácia na remoção de gelo e o impacto ergonómico. Verificou-se que, embora o sistema automático represente um avanço significativo em termos de ergonomia e controlo do processo, persistem limitações na eficácia de limpeza em zonas do congelado, sendo identificadas oportunidades de melhoria para futuras versões do sistema.

PALAVRAS-CHAVE

AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, ERGONOMIA INDUSTRIAL, INDÚSTRIA ALIMENTAR, PLC, VÁLVULAS PNEUMÁTICAS DE IMPACTO.

ABSTRACT

This dissertation was carried out as part of the curricular internship of the Integrated Master's Degree in Mechanical Engineering, with a specialization in Mechatronic Systems. The main objective was to develop an automated solution for cleaning ice crystals from octopus trays, implemented at the industrial facility of the company Brasmar, located in Trofa, Portugal. The project was motivated by the need to reduce the physical effort associated with manual cleaning using compressed-air guns, improve ergonomic conditions at the workstation, and enhance the overall efficiency of the process, particularly in terms of cleaning uniformity and compressed air consumption.

Based on the analysis of previously used solutions, a system was designed and implemented comprising electronically controlled impact blow valves, a programmable logic controller (Omron CP1E-N40DR-D), photoelectric sensors for tray detection, and a human-machine interface (NB7W HMI) for parameter configuration and system monitoring. The control logic was developed using Ladder programming, allowing sequential and selective activation of the air jets, adjusted according to tray presence and type.

Comparative tests were carried out between manual and automatic cleaning methods, evaluating parameters such as cleaning time, total compressed air consumption, cleaning effectiveness, and ergonomic impact. The results showed that although the automated system represents a significant improvement in ergonomics and process control, some limitations remain in cleaning efficiency, especially in frozen product areas. Opportunities for improvement were identified for future system iterations.

KEYWORDS

FOOD INDUSTRY, INDUSTRIAL AUTOMATION; IMPACT BLOW VALVES; INDUSTRIAL ERGONOMICS; PLC.

ÍNDICE

Agradecimentos	iv
Resumo.....	vi
Abstract	vii
Índice	viii
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xix
Índice de Equações.....	xxi
Lista de Símbolos.....	xxii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivo	2
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. A Empresa	6
2.1. Contextualização Histórica	6
3. Estado de arte	8
3.1. Evolução da Automação Industrial	8
3.2. Casos e Teses Aplicadas na Indústria	10
3.2.1. Automação de Processos Repetitivos numa Fábrica de Gelados	10
3.2.2. Automação Eletropneumática em Processos Contínuos.....	11
3.2.3. Robótica Colaborativa na Manipulação de Alimentos Delicados	11
3.2.4. Automação Logística e Distribuição Alimentar	12
3.3. Ergonomia no trabalho	12
3.3.1. Problemas músculo-esqueléticos e a sua prevalência.....	13

3.3.2.	Ergonomia física: principais riscos e medidas de prevenção	14
3.3.3.	Ergonomia cognitiva: interfaces e carga mental.....	15
3.3.4.	Ergonomia organizacional e integração humano-tecnologia	16
3.3.5.	Integração estratégica e Indústria 5.0	16
3.3.6.	Background de soluções tentadas e solução a ser implementada	17
3.3.6.1.	Processo de limpeza atual.....	17
3.3.6.2.	Primeira tentativa de substituição do processo em uso.....	18
3.3.6.3.	Solução apresentada pela empresa para automatizar	20
3.3.7.	Estudo de soluções.....	21
3.3.7.1.	Sistema com Uso de água	21
3.3.7.2.	Sistema com Uso de escovas.....	22
3.3.8.	Comparação de todas as soluções	23
3.4.	Metodologia do projeto – Norma VDI 2206	25
3.5.	Metodologia do projeto – Norma VDI 2221	27
4.	Desenvolvimento do sistema	29
4.1.	Equipamento a automatizar.....	29
4.1.1.	Funcionamento Pretendido	30
4.1.2.	Funcionalidades do sistema	38
4.1.2.1.	Menu “AJUSTES”	38
4.1.2.2.	Menu “CONSUMOS”	42
4.1.2.3.	Menu “HISTÓRICO DE CONSUMOS”	44
4.1.2.4.	Menu “MODO MANUTENÇÃO”	45
4.1.3.	Considerações Gerais sobre Segurança no manuseamento	45
4.2.	Seleção de componentes	45
4.2.1.	Sensores	46
4.2.1.1.	Sensores Indutivos	46
4.2.1.2.	Sensores Capacitivos	47
4.2.1.3.	Sensor Fotoelétrico Difuso	48
4.2.1.4.	Sensor Fotoelétrico de Barreira	49

4.2.1.5.	Sensor Fotoelétrico Retro Reflexivo.....	50
4.2.1.6.	Sensores Fibra Ótica.....	51
4.2.1.7.	Escolha do sensor.....	52
4.2.2.	Válvulas Pneumáticas.....	53
4.2.2.1.	Escolha da válvula	56
4.2.3.	Controladores.....	57
4.2.3.1.	<i>PLC – Programmable Logic Controller</i>	57
4.2.3.2.	Escolha PLC.....	58
4.2.3.3.	Consola HMI	61
4.2.3.4.	Escolha HMI.....	62
4.2.4.	Fonte de alimentação.....	63
4.2.4.1.	Escolha fonte de alimentação	63
4.2.5.	Relés	64
4.2.5.1.	Escolha relés.....	64
4.3.	Programa desenvolvido.....	66
4.3.1.	Lógica de funcionamento do sistema	66
4.3.2.	<i>Grafcet</i> do funcionamento do equipamento	67
4.3.3.	Tabelas de entradas e saídas	71
4.3.4.	Programação no software cx-programmer.....	72
4.3.4.1.	Programação das equações de condição de transposição de transições 72	
4.3.4.2.	Programação da ativação e desativação das etapas.....	74
4.3.4.3.	Programação das ações por etapa	78
4.3.4.4.	“Contagem”	81
4.3.4.5.	“Temporização_Válvulas”	83
4.3.4.6.	“Paragem_Tapete_Frente”	84
4.3.4.7.	“Caudalimetro_analog”	85
4.3.4.8.	“Consumo_TOTAL”	89
4.3.5.	Arquitetura de controlo e sincronização	90
5.	Implementação e testes.....	92
5.1.	Testes e Validação	100
5.1.1.	Primeiros testes.....	100

5.2.	Ensaio Controlado e Produtividade do Turno	102
5.2.1.	Condições Experimentais e Metodologia.....	102
5.2.2.	Ensaio Controlado (n = 15 cuvetes por método)	103
5.2.3.	Produtividade Real no Turno	107
5.3.	Energia e custo (kWh/cuvete, €/cuvete)	108
5.4.	Ergonomia e Segurança Funcional	110
5.5.	Discussão Final e Propostas de Otimização	111
5.5.1.	Proposta de Otimização Experimental (DOE 2 ³)	111
5.5.2.	Digitalização e Integração (Indústria 4.0).....	112
5.6.	Confiabilidade e Efetividade Global (RAM/OEE).....	113
5.7.	Conclusões.....	114
6.	Considerações finais.....	116
6.1.	Conclusões.....	116
6.2.	Trabalhos Futuros.....	117
	Bibliografia	120
	Anexos	126
	Anexo A: Compressor Kaeser ASD 37 SFC	126
	Anexo B: Caudalímetro Testo 6452 DN25	128
	Anexo C: Regulador de Pressão SMC AR50-F06-B.....	129
	Anexo D: Cálculo Energético e Económico Detalhado	130
	D.1. Metodologia de conversão	130
	D.2. Tabela de cálculo exemplificativa	130
	D.3. Projeção anual e benefício económico	130
	D.4. Payback estimado	131
	D.5. Impacto ambiental (CO ₂ evitado).....	131
	Anexo E: Avaliação da Incerteza do Caudalímetro.....	132

E.1. Caracterização do equipamento.....	132
E.2. Cálculo da incerteza expandida	132
E.3. Aplicação ao consumo por cuvete.....	132
Anexo F: Material Suplementar e Recursos Multimédia.....	133
F.1. Lista de ficheiros e vídeos	133
F.2. Instruções de acesso.....	134
F.3. Declaração de autenticidade	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Interior do equipamento a automatizar	3
Figura 1.2 - Equipamento a automatizar.....	3
Figura 1.3 - Cuvete sem produto congelado	3
Figura 1.4 - Cuvete com produto congelado.....	3
Figura 2.1 – Unidade industrial da Brasmar na Trofa [1]	6
Figura 3.1 - Tipos de ergonomia no trabalho: física, cognitiva e organizacional [14]	13
Figura 3.2 – Exemplificação de como pegar em cargas e alternativas para o transporte das mesmas [17]	15
Figura 3.3 - Interfaces homem-máquina (HMI) [19]	16
Figura 3.4 – Pistola utilizada pelos operadores para a limpeza do gelo das cuvetes	17
Figura 3.5 - Procedimento utilizado pelos operadores para facilitar o uso da pistola	18
Figura 3.6 – Tubo com bicos de ar comprimido abertos como uma das soluções	19
Figura 3.7 - Tubo com bicos de ar comprimido abertos em uso na linha.....	19
Figura 3.8 - Conjunto de válvulas pneumáticas de impacto	20
Figura 3.9 – Sistema com escova rotativa [23]	22
Figura 3.10 – Escova para uso em indústria alimentar [24].....	22
Figura 3.11 – Modelo em V para o projeto de um Sistema Mecatrónico [25]	25
Figura 3.12 - Modelo de desenvolvimento da norma VDI 2221 [25].....	27
Figura 4.1 - Equipamento a automatizar.....	29
Figura 4.2 – Cuvete com o Pms 146	30
Figura 4.3 – Zona de identificação do sensor para cuvetes	31
Figura 4.4 – Posição do sensor na linha	31
Figura 4.5 – Menu de inicialização	32

Figura 4.6 – Menu com as opções: PMS; CONSUMOS; MODO MANUTENÇÃO	33
Figura 4.7 – Identificação de todas as cuvetes através do PMS	33
Figura 4.8 – Menu da cuvette identificada com o PMS 146.....	34
Figura 4.9 - Sensor fotoelétrico integrado na linha	34
Figura 4.10 – Local do sensor fotoelétrico	34
Figura 4.11 – Linha do processo de limpeza	35
Figura 4.12 – Cuvetes no tapete de embalamento.....	36
Figura 4.13 – Cuvetes no tapete de limpeza.....	36
Figura 4.14 - Regulador de pressão do ar comprimido.....	37
Figura 4.15 – Término do processo de limpeza	38
Figura 4.16 – Informação dos valores do caudal instantâneo de ar comprimido em m3/h ...	39
Figura 4.17 – Menu para aceder ao menu da manutenção.....	39
Figura 4.18 – Menu com opções: “VERIFICAÇÃO VÁLVULAS”; AJUSTE TEMPO VÁLVULAS”; “AJUSTE HORA E DATA”	40
Figura 4.19 - Menu "VERIFICAÇÃO DE VÁLVULAS"	40
Figura 4.20 – Botão para acionar a válvula 1 e o seu respetivo estado.....	41
Figura 4.21 - <i>NUM Keyboard</i> para inserção de dígitos	41
Figura 4.22 – Menu de ajustes do tempo de sopro de válvulas com a o botão “GRAVAR VALOR”	42
Figura 4.23 – Menu “AJUSTE HORA E DATA”	42
Figura 4.24 – Menu com as opções: “PMS”; “CONSUMOS”; “MODO MANUTENÇÃO”	43
Figura 4.25 – Menu “CONSUMOS”	43
Figura 4.26 – Menu “HISTÓRICO DE CONSUMOS”	44
Figura 4.27 - Ficheiro Excel do registo dos valores dos consumos da linha	45
Figura 4.28 - Modo de funcionamento de um sensor indutivo [26].....	46

Figura 4.29 - Modo de funcionamento de um sensor capacitivo [27]	47
Figura 4.30 – Modo de funcionamento de um sensor fotoelétrico difuso [28]	48
Figura 4.31 - Exemplo de uma das aplicações do sensor fotoelétrico difuso [28]	49
Figura 4.32 – Modo de funcionamento do sensor fotoelétrico de barreira [28]	49
Figura 4.33 – Exemplo de uma das aplicações do sensor fotoelétrico de barreira [28].....	50
Figura 4.34 – Modo de funcionamento do sensor fotoelétrico retro reflexivo [28]	51
Figura 4.35 - Exemplo de uma das aplicações do sensor fotoelétrico retro reflexivo [28]	51
Figura 4.36 - Composição de um sensor de fibra ótica [29]	52
Figura 4.37 – Sensor fotoelétrico OMRON E3Z-D61 [30].....	52
Figura 4.38 – Válvula de bloqueio [32].....	54
Figura 4.39 - Válvula reguladora de pressão [33]	54
Figura 4.40 - Válvula reguladora de fluxo [34]	55
Figura 4.41 – Válvula pneumática direcional [35].....	55
Figura 4.42 - Eletroválvula [36]	56
Figura 4.43 - Válvula de impacto SMC IBV10-X7-Q.....	56
Figura 4.44 – Exemplo de um PLC [39].....	58
Figura 4.45 - PLC OMRON CP1E-N40DR-D [39].....	59
Figura 4.46 - Módulo analógico CP1W-MAD11 [41]	60
Figura 4.47 – Consola HMI [42]	62
Figura 4.48 – Consola OMRON NB7W-TW01B [43]	62
Figura 4.49 - Fonte de alimentação MeanWell SDR-120-24 [45]	63
Figura 4.50 - Relé mecânico OMRON G2RV-SL500 24V AC/DC [46]	65
Figura 4.51 - Diagrama funcional simplificado do sistema	67
Figura 4.52 - <i>Grafcet</i> do funcionamento do equipamento	68
Figura 4.53 – Código das equações de condição de transposição de transições	73

Figura 4.54 - Código das equações de condição de transposição de transições	74
Figura 4.55 – Código da ativação e desativação das etapas	75
Figura 4.56 - Código da ativação e desativação das etapas.....	75
Figura 4.57 - Código da ativação e desativação das etapas.....	76
Figura 4.58 - Código da ativação e desativação das etapas.....	76
Figura 4.59 - Código da ativação e desativação das etapas.....	77
Figura 4.60 - Código da ativação e desativação das etapas.....	77
Figura 4.61 - Código da ativação e desativação das etapas.....	78
Figura 4.62 – Código da programação das ações associadas a cada etapa	79
Figura 4.63 - Código da programação das ações associadas a cada etapa.....	79
Figura 4.64 - Código da programação das ações associadas a cada etapa.....	80
Figura 4.65 - Código da programação das ações associadas a cada etapa.....	80
Figura 4.66 - Código da programação da contagem das cuvetes	81
Figura 4.67 - Código da programação da contagem das cuvetes	82
Figura 4.68 - Código da programação da contagem das cuvetes	82
Figura 4.69 - Código da programação da temporização do sopro das válvulas	83
Figura 4.70 - Código da programação da contagem das cuvetes	83
Figura 4.71 - Código da programação da paragem do tapete da zona de embalamento	85
Figura 4.72 – Código da programação da carta analógica	86
Figura 4.73 -Código da programação da carta analógica.....	87
Figura 4.74 - Código da programação da carta analógica.....	87
Figura 4.75 - Código da programação da carta analógica.....	88
Figura 4.76 - Código da programação da carta analógica.....	88
Figura 4.77 – Código da programação para calcular o consumo total de ar comprimido	89
Figura 4.78 - Código da programação para calcular o consumo total de ar comprimido	90

Figura 5.1 – Configuração inicial do equipamento	92
Figura 5.2 – Configuração final do equipamento com o reservatório de ar implementado ...	93
Figura 5.3 - Forma final do equipamento.....	93
Figura 5.4 - Forma final do equipamento.....	94
Figura 5.5 -Tubo de alimentação de ar comprimido para o reservatório de ar e cabos de alimentação elétrica.....	94
Figura 5.6 - Vista lateral do equipamento.....	95
Figura 5.7 – Vista de trás do sensor	95
Figura 5.8 -Vista lateral da posição do sensor e suporte para o mesmo.....	96
Figura 5.9 - Caudalímetro instalado na linha	96
Figura 5.10 – Controlador de pressão manual instalado na rede.....	97
Figura 5.11 – Consola HMI e botão de emergência instalados.....	97
Figura 5.12 - Interruptor de corte geral do sistema instalado.....	98
Figura 5.13 - Processo de montagem do quadro elétrico.....	98
Figura 5.14 - Quadro elétrico completo com numeração dos componentes.....	99
Figura 5.15 - Quadro elétrico com numeração dos componentes	99
Figura 5.16 – Regulador de pressão manual inserido na rede da linha.....	101
Figura 5.17 - Cuvete com limpeza não uniformizada.....	102
Figura 5.18 – Cuvete de teste antes da limpeza manual	103
Figura 5.19 - Cuvete de teste depois da limpeza manual	104
Figura 5.20 - Cuvete de teste antes da limpeza automatizada.....	104
Figura 5.21 - Cuvete de teste depois da limpeza automatizada	105
Figura 5.22 - Consumo Específico de Ar (m ³ /cuvete). Fonte: elaboração própria.	106
Figura 5.23 - Tempo por Cuvete (s). Fonte: elaboração própria.	107

Figura 5.24 - Comparação da energia consumida por cubete (kWh/cubete) e do custo associado (€). **Fonte:** elaboração própria. 109

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação dos processos de limpezas e as suas vantagens e desvantagens. Fonte: Elaboração própria.	24
Tabela 2 - Principais propriedades do Sensor fotoelétrico OMRON E3Z-D61 [30].....	53
Tabela 3 - Principais propriedades da válvula de impacto SMC IBV10-X7-Q [37]	57
Tabela 4 - Principais propriedades do PLC OMRON CP1E-N40DR-D [40]	59
Tabela 5 - Principais propriedades do módulo analógico CP1W-MAD11 [41]	60
Tabela 6 – Principais propriedades da consola NB7W-TW01B [44]	62
Tabela 7 - Principais propriedades da fonte de alimentação MeanWell SDR-120-24 [45]	64
Tabela 8 - Principais propriedades do relé mecânico OMRON G2RV-SL500 24V AC/DC [46] .	65
Tabela 9 – Legenda do <i>grafcet</i> de funcionamento do equipamento. Fonte: elaboração própria.	69
Tabela 10 – Entradas utilizadas, endereço e respetiva descrição da sua função. Fonte: elaboração própria.....	71
Tabela 11 – Saídas utilizadas, endereço e respetiva descrição da sua função. Fonte: elaboração própria.....	72
Tabela 12 – Identificação dos componentes do quadro elétrico. Fonte: elaboração própria.	100
Tabela 13 - Resultados experimentais do ensaio controlado. Fonte: elaboração própria....	105
Tabela 14 – Valores do desempenho entre os métodos de limpeza. Fonte: elaboração própria.	108
Tabela 15 – Energia e custo por método de limpeza. Fonte: elaboração própria.	108
Tabela 16 - Avaliação qualitativa de ergonomia e ruído. Fonte: elaboração própria.	110
Tabela 17 - Planeamento 2 ³ para otimização do processo. Fonte: elaboração própria.	111
Tabela 18 - Tags OPC-UA / MQTT sugeridos. Fonte: elaboração própria.....	112

Tabela 19 - Indicadores de confiabilidade e OEE (modelo). Fonte: elaboração própria.....	113
Tabela 20 - Tabela de Cálculo energético. Fonte: elaboração própria.....	130
Tabela 21 - Cálculo dos parâmetros para projeção anual e benefício económico. Fonte: elaboração própria.....	131
Tabela 22 - Cálculos dos parâmetros para aplicação ao consumo por cuvette. Fonte: elaboração própria.....	132
Tabela 23 - Lista de ficheiros e vídeos. Fonte: elaboração própria.	133

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Efetividade Global do Equipamento (OEE)(1)	114
Energia elétrica (2)	130
Custo económico (3)	130
Energia anual (4).....	130
Custo anual (5)	130
Payback (6)	131
Incerteza padrão de medição (7)	132
Incerteza expandida (8).....	132

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas, abreviaturas e acrónimos

ERP – *Enterprise Resource Planning*

EU-OSHA – *European Agency for Safety and Health at Work*

f.v. - *final value of measuring range*

HMI – *Human-Machine Interface*

LFD – *Learning from Demonstrations*

MES – *Manufacturing Execution System*

MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport*

MSDs – *Musculoskeletal Disorders*

m.v. - *measured value*

m³/h – metro cúbico por hora

OSHA – *Occupational Safety and Health Administration*

OPC-UA - *Open Platform Communications – Unified Architecture*

PLC – *Programmable Logic Controller*

PMS -

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*

SPDT - *Single Pole Double Throw*

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, com especialização em Sistemas Mecatrónicos, foi desenvolvido um estágio curricular na empresa Brasmar – unidade industrial localizada na Trofa e especializada na transformação e comercialização de produtos do mar congelados. Esta experiência representou uma oportunidade relevante de contacto com o contexto empresarial e permitiu aplicar, em ambiente real, os conhecimentos adquiridos ao longo da formação académica, tanto a nível teórico como prático, promovendo simultaneamente a aquisição de novas competências técnicas e profissionais.

O estágio decorreu no departamento de manutenção, sob a orientação do Eng.º Bruno Marinho e do Técnico Carlos Martins. Este departamento, além de assegurar o bom funcionamento dos equipamentos existentes, acompanha e colabora nos novos projetos de automação da empresa, servindo assim de elo entre a operação e o desenvolvimento técnico. A integração neste ambiente proporcionou uma compreensão mais aprofundada dos desafios reais da indústria alimentar, nomeadamente no que diz respeito à procura constante por soluções mais eficientes, ergonómicas e sustentáveis.

O projeto desenvolvido no âmbito deste estágio culminou na presente dissertação, cujo tema é “Automatização da limpeza de cristais de gelo das cuvetes de polvo”. Esta necessidade surgiu da observação direta de um problema recorrente na linha de produção: a acumulação de cristais de gelo nas cuvetes de acondicionamento de polvo, que até então era combatida através de limpeza manual com pistola de ar comprimido, implicando elevados custos operacionais, consumo energético e esforço físico por parte dos operadores.

Assim, o principal objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de uma solução automatizada que permitisse substituir ou minimizar a intervenção humana neste processo, garantindo uma limpeza eficaz, consistente e energeticamente mais eficiente. Para além da melhoria ergonómica, procurou-se também uma solução tecnicamente viável e com custos de implementação controlados, alinhada com as necessidades da empresa e com os princípios da automação industrial.

Esta dissertação apresenta, portanto, todas as fases do trabalho desenvolvido: desde a análise do problema e definição de requisitos, passando pelo desenvolvimento do sistema e respetiva arquitetura de controlo, até à implementação prática e validação dos resultados obtidos, com propostas de melhoria para versões futuras do equipamento.

1.1. ENQUADRAMENTO

A evolução contínua da automatização nos processos industriais tem levado as empresas a acompanhar esta tendência, implementando soluções automatizadas nas suas próprias linhas de produção. Para além do aumento da eficiência e da redução dos custos operacionais, a automatização contribui significativamente para a melhoria das condições de trabalho, sobretudo em ambientes exigentes ou potencialmente perigosos, sendo esta uma das suas principais mais-valias.

No contexto da expansão da empresa Brasmar, a introdução de um sistema automatizado de limpeza representa uma estratégia orientada para a melhoria das condições ergonómicas dos operadores, reduzindo o esforço físico associado a tarefas repetitivas e potencialmente desgastantes, como é o caso da remoção manual de cristais de gelo nas cuvetes de polvo.

1.2. OBJETIVO

O principal objetivo desta dissertação consiste na automatização de um equipamento desenvolvido internamente pela empresa Brasmar (Figura 1.1 e Figura 1.2), de forma a satisfazer as necessidades identificadas no processo de limpeza das cuvetes de polvo. O equipamento em questão é composto por um conjunto de válvulas pneumáticas de impacto,



Figura 1.2 - Equipamento a automatizar



Figura 1.1 - Interior do equipamento a automatizar

às quais estão acoplados bicos responsáveis pelo sopro de ar comprimido, destinado à remoção de cristais de gelo acumulados nas cuvetes.

As cuvetes apresentam uma geometria retangular (Figura 1.4 e Figura 1.3), mas estão disponíveis em várias dimensões, o que torna o processo de automação mais desafiante.



Figura 1.4 - Cuvete com produto congelado



Figura 1.3 - Cuvete sem produto congelado

Pretende-se que o sistema seja capaz de adaptar a atuação dos bicos consoante o tamanho da cuvete que circula na linha de produção, garantindo uma limpeza eficaz independentemente da sua configuração.

Adicionalmente, este projeto visa melhorar as condições ergonómicas do posto de trabalho, reduzindo o esforço físico associado ao método manual com pistola de ar, e aumentar a eficiência energética do processo. Tendo em conta que o ar comprimido é um recurso com custos energéticos elevados, torna-se essencial implementar uma solução que permita reduzir o seu consumo, promovendo simultaneamente a sustentabilidade da operação.

Para tal, foi realizada uma seleção criteriosa dos componentes de automação a integrar no sistema, bem como as adaptações necessárias ao equipamento existente, tendo sempre em consideração as características do processo e os requisitos da empresa.

Neste contexto, a presente dissertação descreve o processo de automatização do equipamento existente, abordando a seleção e integração dos componentes, a implementação da arquitetura de controlo, a programação do sistema e a análise do seu desempenho em ambiente industrial.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1 é feito o enquadramento do projeto, contextualizando o estágio curricular, apresentando a motivação, os objetivos do trabalho e a organização da própria dissertação. O Capítulo 2 descreve a empresa Brasmar, onde o projeto foi desenvolvido, abordando a sua atividade no setor alimentar, o seu posicionamento no mercado e a relevância da automação no contexto da sua estratégia de modernização.

O Capítulo 3 corresponde ao estado da arte, reunindo e analisando os principais conceitos relacionados com a automação industrial, com especial destaque para sistemas pneumáticos, controlo por PLC e considerações de ergonomia industrial. São ainda discutidas soluções tecnológicas alternativas e abordadas experiências anteriores relacionadas com processos de limpeza na indústria alimentar.

No Capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento do sistema automatizado, com descrição do seu princípio de funcionamento, dos componentes selecionados, da arquitetura de controlo

implementada e da lógica programada em linguagem *Ladder*. Este capítulo inclui também a justificação técnica das decisões tomadas e a forma como o sistema foi integrado no processo existente.

O Capítulo 5 centra-se nos testes realizados e nos resultados obtidos, incluindo a análise comparativa de um ensaio controlado de 15 cuvetes e da produtividade real do turno, entre o método manual e o sistema automatizado, com base em parâmetros como o consumo de ar comprimido e a eficácia da limpeza. Também se fez um cálculo da energia e do custo por cuvette nos dois tipos de limpeza. De seguida avaliou-se os impactos ergonómicos do posto de trabalho assim como a exposição ao ruído e a segurança funcional do sistema implementado. Por último neste subcapítulo, consideram-se todos os resultados obtidos anteriormente e faz-se uma discussão deste, apresentando também propostas de otimização que poderão ser implementadas neste sistema de forma a melhorar a digitalização e a integração digital.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais do projeto, refletindo sobre o grau de cumprimento dos objetivos definidos, e propõe possíveis melhorias e desenvolvimentos futuros para o sistema implementado.

2. A EMPRESA

2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A Brasmar é uma empresa relativamente recente, tendo sido fundada em 2003. Desde então, destacou-se no setor alimentar, especialmente na transformação, congelação e comercialização de produtos do mar, com especial ênfase no segmento do bacalhau. A sua rápida ascensão permitiu-lhe alcançar uma posição de liderança no mercado nacional, alicerçada numa estratégia de inovação, qualidade e expansão. [1]



Figura 2.1 – Unidade industrial da Brasmar na Trofa [1]

Com uma forte aposta na internacionalização, a empresa tem vindo a conquistar mercados externos de forma progressiva, apresentando atualmente uma taxa de exportação superior a 50% do volume de negócios. Esta presença consolidada em diversos países, como a Bélgica, Alemanha e França, reflete a visão estratégica da organização e o seu posicionamento como referência no setor dos produtos do mar a nível europeu. [2]

Ao longo dos anos, a Brasmar passou por um processo de crescimento sustentado, marcado por importantes aquisições e pela diversificação da sua atividade. Um dos marcos mais recentes foi a aquisição das empresas estrangeiras Sedisal (França) e Holmes Seafood (Reino Unido), reforçando a sua capacidade de distribuição e presença em mercados estratégicos [3]. Este percurso culminou numa mudança de identidade corporativa, com a transição para o

Vigent Group, uma holding multissetorial que agrega várias unidades de negócio e que representa uma nova fase no processo de profissionalização e expansão do grupo. [2]

Apesar desta mudança institucional, a Brasmar Comércio de Peixe, S.A., fundada em 2005, continua a desempenhar um papel central na estrutura do grupo, sendo responsável por garantir o fornecimento de produtos do mar frescos e congelados de elevada qualidade. A empresa destaca-se pela ampla variedade de espécies disponíveis — incluindo peixes, crustáceos e moluscos — e pelo cumprimento rigoroso dos mais exigentes padrões de segurança alimentar e conservação da frescura, sendo reconhecida tanto a nível nacional como internacional.

3. ESTADO DE ARTE

Neste capítulo é feita, primeiramente, uma breve apresentação da evolução da automação industrial e também da automação no ramo da pneumática, sendo também adicionados casos e teses aplicadas na indústria. Depois aborda-se o assunto da ergonomia no trabalho uma vez que o principal objetivo deste projeto é a substituição das condições atuais de trabalho para condições mais sustentáveis e saudáveis dos trabalhadores, sendo por um tópico importante a tratar.

De seguida, é feita uma descrição de tentativas de soluções ao problema em estudo feitas na empresa, apresentando as suas vantagens e desvantagens e o porquê de não funcionarem.

No subcapítulo seguinte foi feita uma pesquisa para mostrar outras possíveis soluções ao ar comprimido, descrevendo as suas vantagens e desvantagens.

Por último, são abordados aspetos da norma VDI 2206 e da norma 2221 adequáveis a este projeto, que são cruciais à sua estrutura.

3.1. EVOLUÇÃO DA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

A automação industrial tem sido um motor essencial no avanço dos processos de manufatura, evoluindo de mecanismos rudimentares para sistemas complexos e integrados que incorporam tecnologias de ponta, como a inteligência artificial e a Internet das Coisas. Este percurso histórico reflete a procura contínua por eficiência, qualidade e flexibilidade na produção industrial.

A génese da automação industrial remonta ao século XVIII, durante a Primeira Revolução Industrial. A introdução de máquinas a vapor e teares mecânicos revolucionou a produção, permitindo a transição de processos artesanais para a manufatura mecanizada. Este período marcou a substituição gradual da força humana e animal por máquinas, aumentando significativamente a produtividade e estabelecendo as bases para futuras inovações na automação. No final do século XIX e início do século XX, a eletrificação das fábricas trouxe novas possibilidades para a automação. Motores elétricos substituíram máquinas a vapor, e sistemas de controlo analógico começaram a ser implementados para regular processos

industriais. Instrumentos como termóstatos e reguladores centrífugos permitiram um controlo mais preciso, embora ainda limitado, dos parâmetros de produção. [4]

A década de 1960 foi um marco na automação industrial com o desenvolvimento dos Controladores Lógicos Programáveis (PLCs). A *General Motors*, enfrentando desafios na atualização de sistemas de controlo baseados em relés, liderou a iniciativa para criar dispositivos eletrónicos que facilitassem a reprogramação e manutenção dos processos industriais. Os primeiros PLCs permitiram substituir painéis de relés por sistemas programáveis, aumentando a flexibilidade e reduzindo o tempo de inatividade nas linhas de produção. Com o advento dos microprocessadores nas décadas de 1970 e 1980, os PLCs evoluíram significativamente. Esses dispositivos tornaram-se mais compactos, poderosos e capazes de executar operações complexas. A integração de redes industriais permitiu a comunicação entre diferentes equipamentos, facilitando a coordenação e o monitoramento centralizado dos processos produtivos [5].

Atualmente, a automação industrial encontra-se numa nova fase de transformação, impulsionada pela chamada Indústria 4.0, que combina tecnologias digitais, físicas e biológicas. Este paradigma integra sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas e inteligência artificial (IA), permitindo que máquinas e sistemas comuniquem e tomem decisões de forma autónoma, promovendo maior eficiência, flexibilidade e personalização da produção. A Indústria 4.0 representa a convergência entre os mundos físico e digital, suportada por redes inteligentes e conectividade em tempo real, o que possibilita novos níveis de produtividade e inovação [6].

De forma complementar destaca-se que os sistemas ciberfísicos constituem a base desta revolução tecnológica, ao integrarem sensores, algoritmos e comunicação contínua entre equipamentos e plataformas digitais [7]. Apesar dos avanços, persistem desafios como a interoperabilidade entre sistemas, a segurança cibernética e a formação de profissionais especializados, fatores determinantes para garantir uma automação mais segura e eficiente.

Integração de sensores e controlo inteligente

A automação desempenha um papel fundamental na indústria alimentar, permitindo o controlo e monitorização em tempo real de variáveis como temperatura, pressão, vibração e consumo de energia. Estas soluções aumentam a eficiência, reduzem falhas e asseguram a

rastreabilidade e qualidade dos produtos.

O artigo aqui referenciado [8] destaca ainda que, devido às condições exigentes deste setor, os equipamentos devem ser robustos e resistentes à humidade e às variações térmicas, garantindo fiabilidade e segurança nos processos produtivos.

Aplicações com ar comprimido: sopro, secagem e transporte

Complementarmente aos sistemas eletrónicos e de controlo, a automação pneumática desempenha um papel crucial na indústria alimentar devido à sua segurança, limpeza e facilidade de controlo. O ar comprimido é amplamente utilizado em operações de sopro, secagem e transporte pneumático de produtos, essenciais em ambientes com elevados padrões de higiene, pois permitem remover partículas, água ou resíduos sem contacto direto com os alimentos.

A integração de sistemas automatizados de deteção e rejeição contribui significativamente para o aumento da produtividade e para a redução do tempo de inatividade nas linhas de produção alimentar — com ganhos que podem atingir 10 a 30 % de eficiência adicional e reduções de até 50 % no tempo de paragem. Estes resultados demonstram como a automação, aliada a tecnologias de inspeção e controlo, melhora a segurança e o desempenho global dos processos industriais [9].

3.2. CASOS E TESES APLICADAS NA INDÚSTRIA

A automação industrial tem vindo a consolidar-se como uma ferramenta essencial na modernização dos processos da indústria alimentar, contribuindo para o aumento da eficiência, segurança, rastreabilidade e padronização dos produtos. A aplicação de sistemas automatizados neste setor tem sido amplamente estudada em contexto académico e industrial, abrangendo desde linhas de produção e embalagem até à manipulação e distribuição de alimentos.

3.2.1. AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS REPETITIVOS NUMA FÁBRICA DE GELADOS

Um caso amplamente documentado é o da automatização de uma linha de produção de gelados, onde se propôs substituir tarefas repetitivas por um sistema controlado por PLC, com o objetivo de otimizar as operações de enchimento, transporte e embalagem. O estudo, de natureza conceptual, descreve a integração de sensores de presença, atuadores

elétricos e pneumáticos e um sistema de controlo centralizado capaz de monitorizar em tempo real o estado de cada fase do processo produtivo. Embora não tenha sido implementado na prática, o projeto demonstra que, quando aplicadas com sucesso, soluções desta natureza podem proporcionar aumentos significativos de produtividade, maior uniformidade do produto e redução do contacto humano direto, aspetos essenciais num setor sujeito a exigentes padrões de higiene e segurança alimentar. Este caso ilustra claramente a evolução dos sistemas de controlo convencionais para arquiteturas automatizadas, com maior fiabilidade, flexibilidade e capacidade de supervisão integrada. [10].

3.2.2. AUTOMAÇÃO ELETROPNEUMÁTICA EM PROCESSOS CONTÍNUOS

Outro exemplo relevante é o desenvolvimento de um sistema eletropneumático para alimentação contínua de biomassa em fornalhas de secadores rotativos, descrito no estudo Automação eletropneumática e otimização do processo de alimentação de biomassa em fornalhas de secadores de grãos. A solução foi concebida com válvulas direcionais, sensores de temperatura e um controlador lógico programável (PLC) responsável pela gestão do caudal e sincronização do ciclo de alimentação, substituindo a operação manual anteriormente existente. Através da integração de sensores, válvulas pneumáticas e atuadores, obteve-se maior estabilidade de processo, melhor eficiência energética e aumento da segurança operacional, demonstrando o potencial dos sistemas pneumáticos quando associados ao controlo lógico programável.

Embora aplicado a um contexto agroindustrial, este trabalho é relevante para o presente projeto, pois partilha os mesmos princípios de automação eletropneumática e otimização de recursos energéticos, sendo o seu funcionamento análogo aos sistemas de sopro, secagem e transporte pneumático utilizados na indústria alimentar, o que reforça a fiabilidade e a segurança destas soluções em ambientes de operação contínua. [11].

3.2.3. ROBÓTICA COLABORATIVA NA MANIPULAÇÃO DE ALIMENTOS DELICADOS

Um exemplo de investigação aplicada à indústria alimentar é o estudo de um sistema robótico de manipulação de alimentos deformáveis, baseado em aprendizagem a partir de demonstração (LfD). O robô, equipado com sensores visuais e táteis, aprendeu a agarrar

objetos frágeis, como alfaces, com uma taxa média de sucesso de 75 %, demonstrando o potencial da automação inteligente para substituir tarefas manuais e aumentar a consistência dos processos alimentares. Apesar de se tratar de um estudo laboratorial, evidencia o avanço das soluções de automação adaptativa e sensorizada aplicáveis a processos industriais sensíveis, como o de limpeza e manipulação de produtos congelados. [12].

3.2.4. AUTOMAÇÃO LOGÍSTICA E DISTRIBUIÇÃO ALIMENTAR

No estudo desenvolvido na *University of Illinois Chicago*, foi realizada a validação de um centro de distribuição automatizado destinado ao setor alimentar e de bebidas [13]. O trabalho analisou a integração de sistemas automáticos de movimentação e armazenamento, incluindo transportadores, elevadores e sensores de posicionamento, com o objetivo de avaliar o desempenho, a fiabilidade e a eficiência operacional do sistema. Os resultados demonstraram que a automação permitiu reduzir os tempos de ciclo, minimizar erros de separação e aumentar a capacidade de resposta logística, assegurando simultaneamente rastreabilidade e controlo de qualidade em todas as etapas do processo. Este estudo evidencia a importância da automação não apenas na fase produtiva, mas também na gestão e distribuição inteligente de produtos alimentares, reforçando a abrangência e o impacto das soluções automatizadas na cadeia de valor da indústria alimentar.

Os casos apresentados evidenciam que a automação na indústria alimentar evoluiu de sistemas básicos de controlo para soluções integradas que combinam pneumática, robótica e monitorização inteligente.

A utilização de controladores lógicos programáveis, sensores e atuadores tem permitido alcançar processos mais eficientes, seguros e padronizados, reduzindo a intervenção humana e assegurando maior rastreabilidade e qualidade dos produtos.

3.3. ERGONOMIA NO TRABALHO

Com o avanço da automação industrial, a ergonomia passou a ter um papel fundamental na conceção e adaptação dos postos de trabalho. A ergonomia industrial procura ajustar o ambiente laboral às características físicas e cognitivas dos trabalhadores, promovendo o bem-

estar, a eficiência e a segurança na execução das tarefas. A crescente automatização dos processos produtivos oferece novas oportunidades para melhorar as condições ergonômicas, mas também levanta novos desafios, especialmente na interação entre o ser humano e os sistemas automatizados.



Figura 3.1 - Tipos de ergonomia no trabalho: física, cognitiva e organizacional [14]

3.3.1. PROBLEMAS MÚSCULO-ESQUELÉTICOS E A SUA PREVALÊNCIA

Os distúrbios músculo-esqueléticos relacionados com o trabalho continuam a ser o problema de saúde ocupacional mais comum na União Europeia. De acordo com o relatório da Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho (EU-OSHA), mais de 60 % dos trabalhadores europeus reportam desconforto ou dor associados a posturas incorretas, movimentos repetitivos ou levantamento de cargas [15]. Estas condições são agravadas em ambientes fabris com baixos níveis de automatização ou com má concepção ergonômica.

Os MSDs afetam principalmente a região lombar, pescoço e membros superiores, estando relacionados com fatores físicos (força, repetição, postura), organizacionais (ritmo de trabalho, pausas insuficientes) e psicossociais (pressão de tempo, monotonia). Estudos recentes confirmam esta prevalência elevada, reforçando a necessidade de integrar princípios ergonômicos na concepção de sistemas automatizados.

3.3.2. ERGONOMIA FÍSICA: PRINCIPAIS RISCOS E MEDIDAS DE PREVENÇÃO

Na ergonomia física destacam-se riscos como:

-
- MOVIMENTOS REPETITIVOS E TAREFAS DE CURTA DURAÇÃO CÍCLICA;
 - POSTURAS ESTÁTICAS PROLONGADAS, COMO TRONCO INCLINADO OU BRAÇOS ELEVADOS;
 - LEVANTAMENTO E TRANSPORTE MANUAL DE CARGAS SEM AUXÍLIO MECÂNICO;
 - APLICAÇÃO DE FORÇA EXCESSIVA OU EM POSIÇÕES ARTICULARES DESFAVORÁVEIS;
 - FATORES AMBIENTAIS (VIBRAÇÃO, ILUMINAÇÃO DEFICIENTE, FRIO, RUÍDO, ETC.).

De acordo com a *OSHA (Occupational Safety and Health Administration)*, a aplicação de soluções de engenharia — como o redesenho dos postos de trabalho, a utilização de equipamentos auxiliares para elevação e manuseamento, ou a automatização de tarefas de elevado esforço físico — reduz significativamente a exposição a fatores de risco e a probabilidade de lesões músculo-esqueléticas [16] .

A análise ergonómica de tarefas deve ser considerada desde a fase de projeto, avaliando a interação entre operador, ferramenta e ambiente.

Em sistemas automatizados, a ergonomia física é reforçada através de [16]:

-
- UTILIZAÇÃO DE BRAÇOS ROBÓTICOS, SISTEMAS PNEUMÁTICOS E TRANSPORTADORES AUTOMÁTICOS;
 - LAYOUT OTIMIZADO PARA MINIMIZAR DESLOCAÇÕES E ESFORÇOS;
 - FERRAMENTAS AJUSTADAS À ANTROPOMETRIA DO OPERADOR;
 - ROTAÇÃO DE TAREFAS E PAUSAS REGULARES PARA EVITAR FADIGA LOCALIZADA.

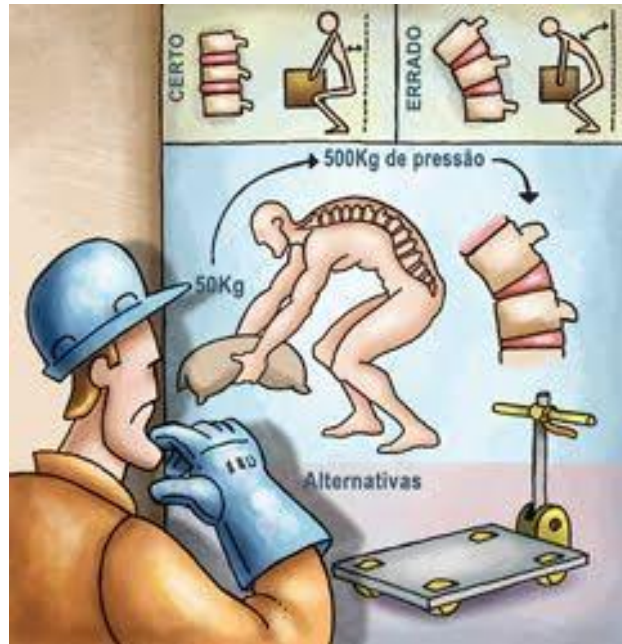


Figura 3.2 – Exemplificação de como pegar em cargas e alternativas para o transporte das mesmas [17]

3.3.3. ERGONOMIA COGNITIVA: INTERFACES E CARGA MENTAL

A ergonomia cognitiva assume crescente importância na automação industrial, especialmente no design das interfaces homem-máquina (HMI). Estas interfaces devem facilitar a interação entre o operador e o sistema, reduzindo a carga mental e prevenindo erros humanos.

Um bom design deve respeitar três princípios fundamentais [18]:

-
- VISIBILIDADE — AS FUNÇÕES PRINCIPAIS DEVEM SER FACILMENTE IDENTIFICÁVEIS;
 - FUNCIONALIDADE — OS ELEMENTOS DEVEM SUGERIR A FORMA CORRETA DE UTILIZAÇÃO (UM BOTÃO SUGERE PRESSIONAR, UMA ALAVANCA SUGERE PUXAR);
 - FEEDBACK — O SISTEMA DEVE FORNECER UMA RESPOSTA IMEDIATA E PERCETÍVEL ÀS AÇÕES UTILIZADOR.



Figura 3.3 - Interfaces homem-máquina (HMI) [19]

3.3.4. ERGONOMIA ORGANIZACIONAL E INTEGRAÇÃO HUMANO-TECNOLOGIA

A ergonomia organizacional aborda aspetos de gestão, comunicação, ritmo de trabalho, formação e cultura de segurança.

Nos ambientes automatizados, a sua aplicação envolve:

-
- O ENVOLVIMENTO DOS OPERADORES NA DEFINIÇÃO DOS POSTOS DE TRABALHO;
 - A IMPLEMENTAÇÃO DE PAUSAS PROGRAMADAS E ROTAÇÃO DE TAREFAS;
 - FORMAÇÃO CONTÍNUA EM SEGURANÇA E OPERAÇÃO DE SISTEMAS;
 - MONITORIZAÇÃO DE INDICADORES ERGONÓMICOS (ABSENTISMO, FADIGA, LESÕES, SATISFAÇÃO).

Foi feito um estudo de uma análise de 250 casos de implementação de programas ergonómicos em contextos industriais e demonstrou reduções significativas de lesões músculo-esqueléticas, melhorias de desempenho operacional e benefícios económicos diretos decorrentes de ambientes de trabalho mais adequados. Estes resultados evidenciam que o investimento em ergonomia industrial contribui simultaneamente para o bem-estar dos trabalhadores e para a competitividade das organizações [20].

3.3.5. INTEGRAÇÃO ESTRATÉGICA E INDÚSTRIA 5.0

A integração entre automação e ergonomia deve ser entendida como uma aliança estratégica. Em vez de substituir o trabalhador, os sistemas automatizados devem complementar as suas

capacidades, permitindo que este se concentre em tarefas de maior valor acrescentado. De acordo com a Comissão Europeia, a transição para a Indústria 5.0 tem como pilares a sustentabilidade, a resiliência e o foco no ser humano, promovendo um ambiente de trabalho mais colaborativo, seguro e eficiente [21].

Assim, a aplicação dos princípios ergonómicos na automação industrial contribui para:

-
- REDUZIR O ABSENTISMO E O RISCO DE LESÕES;
 - AUMENTAR A PRODUTIVIDADE E A MOTIVAÇÃO;
 - MELHORAR A QUALIDADE DO PRODUTO FINAL;
 - FOMENTAR UM AMBIENTE DE TRABALHO SUSTENTÁVEL E CENTRADO NAS PESSOAS.

3.3.6. BACKGROUND DE SOLUÇÕES TENTADAS E SOLUÇÃO A SER IMPLEMENTADA

Durante os próximos subcapítulos pretende-se fazer uma exposição de estratégias já utilizadas na empresa, referindo as suas vantagens e desvantagens. Também falar sobre o equipamento proposto a ser implementado e automatizado.

3.3.6.1. PROCESSO DE LIMPEZA ATUAL

Uso de Mangueiras de Ar Comprimido operadas por um funcionário

Relativamente a esta solução, que estava a ser usada pela empresa antes da implementação do produto final, um operário utilizava uma pistola com ar comprimido para remover o gelo à superfície da cuvette, como se pode ver na Figura 3.4

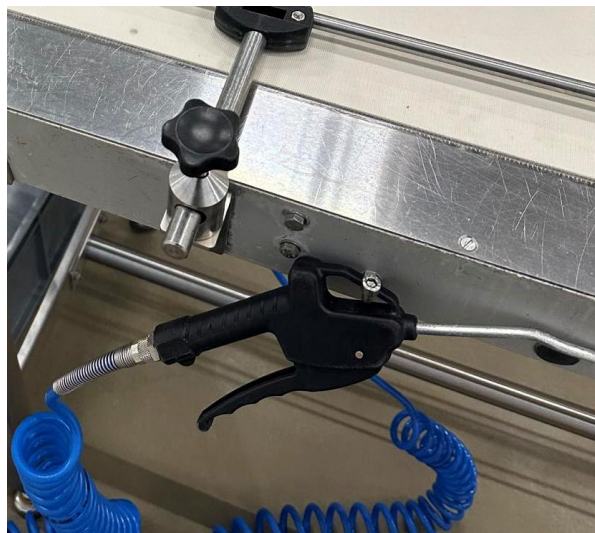


Figura 3.4 – Pistola utilizada pelos operadores para a limpeza do gelo das cuvetes

Este processo é na sua maior parte manual, havendo uma “automatização parcial” do processo pelo uso da pistola, sendo este aspeto uma vantagem do procedimento.

Relativamente as suas desvantagens, apresenta um desgaste físico para o funcionário, que esta durante um turno de trabalho, continuamente a pressionar a mangueira para executar o processo. Em consequência, os operários para facilitar prendem a haste da pistola e esta fica aberta o tempo todo mesmo que não haja cuvetes a passar na linha como se vê na Figura 3.5. Ou seja, todas estas práticas resultam num alto desperdício de ar comprimido.



Figura 3.5 - Procedimento utilizado pelos operadores para facilitar o uso da pistola

3.3.6.2. PRIMEIRA TENTATIVA DE SUBSTITUIÇÃO DO PROCESSO EM USO

Uma das tentativas para solucionar o problema das pistolas de ar comprimido foi a construção de um tubo com bicos de ar comprimido abertos como se vê na Figura 3.6. O ar comprimido estava em constante saída enquanto passavam cuvetes de polvo na linha. Quando a linha estava vazia, a tubagem por onde passa o ar é fechada.



Figura 3.6 – Tubo com bicos de ar comprimido abertos como uma das soluções

As vantagens associadas a esta solução são a rápida e eficaz remoção dos cristais de gelo, não exigiu um orçamento muito alto e deixa de estar alguém na linha com a pistola de ar comprimido.

Já as desvantagens prendem-se no alto gasto de ar comprimido porque mesmo estando a passar cuvetes, por vezes, há paragens no processo e o ar continua a sair mesmo a cuvette estando limpa ou o operador, caso pudesse, fechava a alimentação. Também, e mais problemática, ao fim de algum tempo os bicos deixavam de soprar o ar com tanta pressão e o processo de remoção começava a ficar mais lento e menos eficaz.



Figura 3.7 - Tubo com bicos de ar comprimido abertos em uso na linha

Equipamento com bicos de ar comprimido acionados por válvulas pneumáticas

Esta solução surge como a solução que a empresa pediu para automatizar e implementar na linha. Assim, surge como um conjunto de válvulas pneumáticas de impacto (Figura 3.8) e nelas estão inseridos bicos para o sopro de ar comprimido.



Figura 3.8 - Conjunto de válvulas pneumáticas de impacto

As mangueiras são alimentadas por ar vindo de um compressor de parafuso da marca *Kaeser*, modelo ASD SFC (Anexo A: Compressor Kaeser ASD 37 SFC). A ideia assenta em ligar este equipamento a um PLC e automatizar todo o processo de modo que esta solução se adapte à linha de forma a desempenhar um processo eficaz e energeticamente eficiente.

No que toca às vantagens, apresenta um design melhorado, complementa o posto de trabalho deixando de ser necessário que alguém esteja constantemente a pressionar a pistola de ar, melhorando assim as condições de trabalho. Consequentemente deixam de existir duas situações:

-
- QUANDO A PISTOLA ESTAVA CONSTANTEMENTE ABERTA SAÍA AR DESNECESSARIAMENTE;
 - QUANDO AS CUVETES JÁ ESTAVAM LIMPAS E COMO A LINHA ESTAVA PARADA CONTINUAVA A SAIR AR PELOS BICOS DO TUBO.

Uma vez que aqui é possível a programação de um PLC, consegue-se adaptar o consumo de ar comprimido à dimensão da cuvette que passa na linha, ou seja, cuvetes mais pequenas menos bicos acionadas e cuvetes maiores mais bicos acionadas.

Relativamente às desvantagens, apresenta bastante ruído devido ao barulho dos disparos das válvulas e à saída do ar e uma necessidade de investimento inicial mais elevado.

3.3.7. ESTUDO DE SOLUÇÕES

Neste capítulo é apresentada uma pesquisa de possíveis soluções a usar face à que a empresa apresentou e visa justificar o porquê de esta solução ser a mais apropriada à situação. Todas estas possíveis soluções foram discutidas com a empresa e, logo descartadas, pelos motivos abaixo mencionados.

3.3.7.1. SISTEMA COM USO DE ÁGUA

Uma alternativa possível seria a utilização de água em sistemas dedicados de limpeza, por exemplo através de jatos de alta pressão. Em teoria, estas soluções permitiriam limpar múltiplas cuvetes em simultâneo, reduzindo o tempo de ciclo e os custos associados ao processo manual. Contudo, no contexto específico desta indústria, o uso de água introduz constrangimentos operacionais e de conformidade que as desaconselham.

Antes da congelação, o produto é pesado; depois de congelado, volta a ser pesado. A diferença entre estes pesos corresponde à percentagem de vidragem, isto é, a massa de água congelada aplicada ao produto. O consumidor paga apenas o peso do polvo, não sendo a água de vidragem contabilizada no preço final.

Deste modo, a aplicação de água durante a fase de remoção do gelo acrescentaria humidade/água adicional às cuvetes. Esse acréscimo poderia alterar a pesagem final face ao registo efetuado após a congelação, gerando discrepâncias em auditorias ou fiscalizações e potenciais não conformidades. Acresce que a água de vidragem não pode ser utilizada para aumentar artificialmente o peso comercializado do produto. Em Portugal, o uso indevido de água de vidragem é apontado por autoridades e agentes do setor como uma prática fraudulenta recorrente [22].

Em síntese, apesar do potencial ganho de produtividade dos jatos de água, os riscos de re-humidificação do produto, de alteração das pesagens finais e de não conformidade

regulamentar tornam esta abordagem inadequada para o processo em estudo. Por estas razões, optou-se por métodos “a seco”, baseados em ar comprimido, que evitam a introdução de humidade adicional e preservam a rastreabilidade e comparabilidade das pesagens.

3.3.7.2. SISTEMA COM USO DE ESCOVAS

O uso de escovas para a remoção dos cristais de gelo foi uma das opções para estudo. O produto seria projetado como algo idêntico ao produto da Figura 3.9, mas com a substituição por uma escova própria para uso alimentar.



Figura 3.9 – Sistema com escova rotativa [23]

Uma das escovas para indústria alimentar mais utilizadas é as escovas rotativas, como se pode ver na Figura 3.10, de fácil manuseamento.



Figura 3.10 – Escova para uso em indústria alimentar [24]

Esta solução apresenta como principais vantagens uma limpeza direcionada e detalhada, além de não implicar um investimento elevado em termos de implementação. Contudo, também envolve riscos significativos de contaminação, exigindo procedimentos de desinfecção frequentes e rigorosos. Em situações em que o tipo de produto processado varie — por exemplo, de polvo para pota ou para outro tipo de marisco congelado — seria necessário substituir a escova ou garantir a desinfecção adequada do equipamento entre ciclos de produção. A ausência dessa substituição ou de uma higienização eficaz poderia originar riscos de contaminação cruzada ou reações alérgicas nos consumidores. Tendo em conta estas limitações e os requisitos de higiene rigorosos da indústria alimentar, esta solução foi descartada, privilegiando-se alternativas que assegurem maior segurança e conformidade sanitária.

3.3.8. COMPARAÇÃO DE TODAS AS SOLUÇÕES

Com o objetivo de justificar a solução a ser implementada fez-se síntese das vantagens e desvantagens de todas as soluções apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Identificação dos processos de limpeza e as suas vantagens e desvantagens. **Fonte:** Elaboração própria.

Processo de limpeza	Vantagens	Desvantagens
Processo atual	“Automatização parcial” do processo pelo uso da pistola.	Desgaste físico do operador; Alto desperdício de ar comprimido.
1ª tentativa de substituição	Rápida e eficaz remoção dos cristais de gelo; Não exige um orçamento muito alto; Automatização parcial do processo.	Alto desgaste de ar comprimido; Perda de potência do ar comprimido; Ao fim de algum tempo torna-se um processo pouco eficaz e eficiente;
Modelo apresentado pela empresa para implementação	Adaptação do consumo de ar comprimido à dimensão da cuvette Design melhorado Automatização total do equipamento.	Bastante ruído devido ao barulho dos disparos das válvulas e à saída do ar; Necessidade de investimento inicial mais elevado.
Sistema com uso de escovas	Limpeza direcionada e detalhada; Não apresenta um investimento de alto custo.	Risco de contaminação alto.
Sistema jatos de água	Uma limpeza direcionada e detalhada; Não apresenta um investimento de alto custo.	Interferência na paisagem final do produto convergindo em sérias consequências.

A partir da análise da Tabela 1, conclui-se que as soluções atualmente utilizadas pela empresa não são viáveis a longo prazo, uma vez que apresentam problemas ergonómicos para o operador, consumos excessivos de ar comprimido e perdas de eficiência no processo. As alternativas estudadas também se revelaram inadequadas, uma vez que colocam em risco

a segurança alimentar e podem originar situações ilegais com graves consequências para a empresa.

Face a estas considerações, a solução baseada numa barra equipada com válvulas de impacto destaca-se como a opção mais adequada para automatização e implementação, garantindo eficiência, segurança e conformidade com as exigências do setor alimentar.

3.4. METODOLOGIA DO PROJETO – NORMA VDI 2206

A norma VDI 2206 propõe uma metodologia para o desenvolvimento multidisciplinar de sistemas mecatrónicos, nomeadamente, os que incluem componentes eletrónicos e mecânicos em simultâneo e com tecnologia da informação. Esta metodologia tem como referência o modelo em V, como se vê na Figura 3.11 [25].

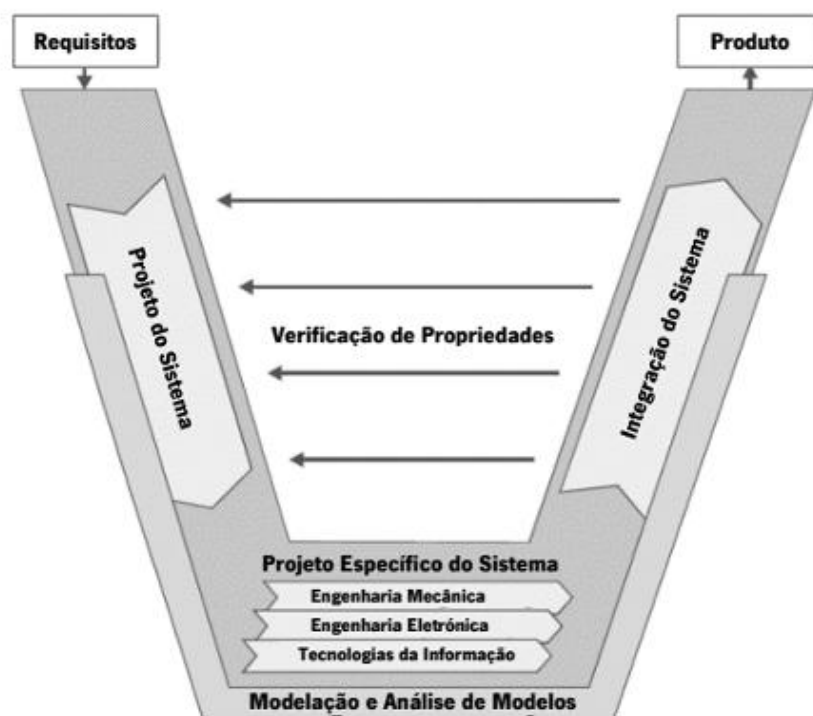


Figura 3.11 – Modelo em V para o projeto de um Sistema Mecatrónico [25]

O modelo em V propõe uma sequência de passos para a conceção de sistemas mecatrónicos, sendo estes:

- **REQUISITOS** – TRATA-SE DA PRIMEIRA ETAPA, E CONSISTE NA DESCRIÇÃO DO SISTEMA A OBTER SOB A FORMA DE REQUISITOS, EM RELAÇÃO AOS QUAIS O SISTEMA OBTIDO SERÁ AVALIADO POSTERIORMENTE;

- **PROJETO DO SISTEMA** — ETAPA QUE PERMITE CRIAR UM CONCEITO DE SOLUÇÃO MULTIDISCIPLINAR QUE CONDUZA ÀS CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS PARA O SISTEMA A OBTER. PARA TAL, É PROPOSTA A DIVISÃO DA FUNÇÃO PRINCIPAL EM SUBFUNÇÕES, PARA AS QUAIS SÃO ENCONTRADOS INDIVIDUALMENTE PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO OU DE OPERAÇÃO, CUJO DESEMPENHO É DIVIDIDO PELOS DIVERSOS DOMÍNIOS ENVOLVIDOS E AVALIADO NO CONTEXTO DO SISTEMA;
- **PROJETO ESPECÍFICO DO SISTEMA** — ESTE PASSO CONSISTE EM DESENVOLVER AS SECÇÕES DA SOLUÇÃO GLOBAL RELATIVAS ÀS DIVERSAS ÁREAS ENVOLVIDAS (ENGENHARIA MECÂNICA, ELETRÓNICA, INFORMÁTICA, ENTRE OUTROS DOMÍNIOS);
- **INTEGRAÇÃO** — OS RESULTADOS DAS DIVERSAS PARCELAS DA SOLUÇÃO GLOBAL DESENVOLVIDOS NO SEIO DE CADA DOMÍNIO, SÃO INTEGRADOS NO SENTIDO DE SE OBTER UMA SOLUÇÃO GLOBAL PARA O SISTEMA;
- **VERIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES** — ESTA ETAPA CONSISTE NA COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO SISTEMA EM DESENVOLVIMENTO COM AS DEFINIDAS PARA O MESMO, ESTANDO ASSOCIADA AOS CONCEITOS DE VERIFICAÇÃO E DE VALIDAÇÃO. A VERIFICAÇÃO, TRATA-SE DE ANALISAR FORMALMENTE SE O SISTEMA CUMPRE TODOS OS REQUISITOS PROPOSTOS. A VALIDAÇÃO TRATA-SE DE VERIFICAR SE O SISTEMA É O INDICADO, SENDO TAL VERIFICADO GERALMENTE DE FORMA INFORMAL. O PROCESSO DE VERIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES É CONTÍNUO AO LONGO DE TODO PROJETO, EMBORA ESTEJA LOCALIZADO FORMALMENTE AQUANDO DA INTEGRAÇÃO DO SISTEMA. ESTE PODERÁ SER EXECUTADO VIRTUALMENTE, FISICAMENTE OU NUMA VERTENTE MISTA;
- **MODELAÇÃO E ANÁLISE DE MODELOS** — ETAPA É PARALELA A TODOS OS PASSOS EXCETO OS REQUISITOS, E CONSISTE NA AFERIÇÃO DAS PROPRIEDADES DO SISTEMA ATRAVÉS DE MODELOS OU FERRAMENTAS COMPUTORIZADAS PARA SIMULAÇÃO.
- A NORMA **VDI 2206** FOI ADOTADA COMO REFERÊNCIA METODOLÓGICA POR SE ADEQUAR À NATUREZA INTERDISCIPLINAR DO PROJETO DESENVOLVIDO. O SISTEMA DE LIMPEZA AUTOMATIZADO COMBINA COMPONENTES MECÂNICOS, PNEUMÁTICOS, ELÉTRICOS E DE CONTROLO, EXIGINDO UMA ABORDAGEM DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADA E SISTEMÁTICA. O MODELO EM V PROPOSTO PELA VDI 2206 PERMITE ESTRUTURAR AS ETAPAS DE CONCEÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO, ASSEGURANDO A COERÊNCIA ENTRE OS DIFERENTES DOMÍNIOS DA ENGENHARIA E GARANTINDO QUE O SISTEMA FINAL CUMPRE OS REQUISITOS FUNCIONAIS, ERGONÓMICOS E DE EFICIÊNCIA ESTABELECIDOS NO INÍCIO DO PROJETO.

3.5. METODOLOGIA DO PROJETO – NORMA VDI 2221

A norma VDI 2221 é uma metodologia para o desenvolvimento multidisciplinar de sistemas mecânicos. Tal como a norma VDI 2206, tem um modelo que se encontra na Figura 3.12.

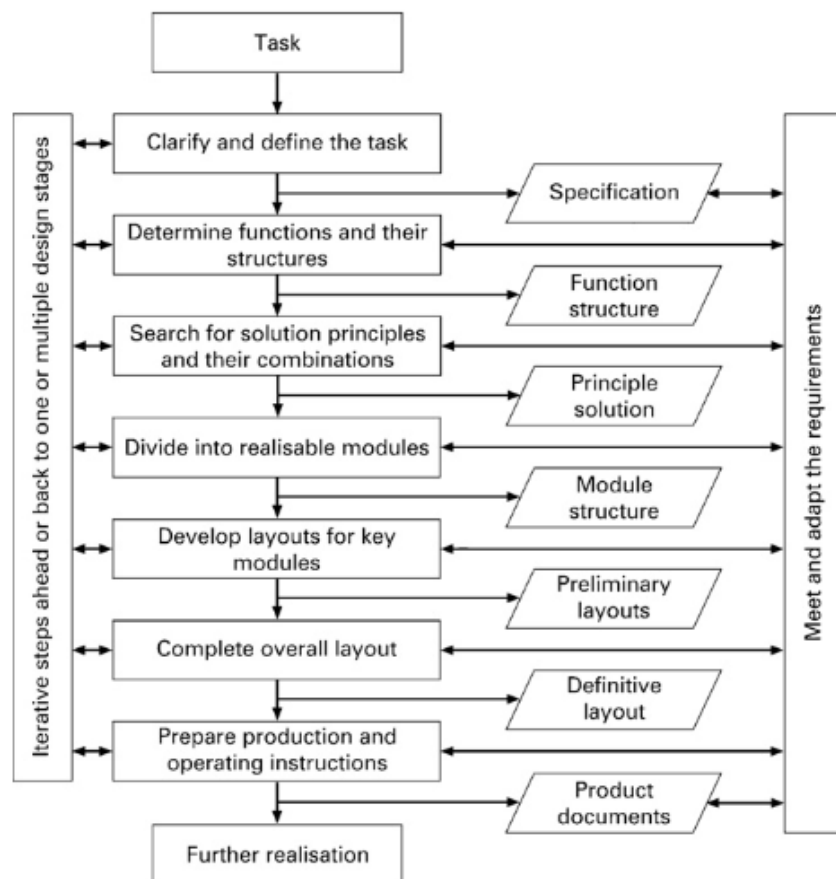


Figura 3.12 - Modelo de desenvolvimento da norma VDI 2221 [25]

Este método de projeto de sistemas mecatrónicos possui um conjunto de passos [25]:

1. CLARIFICAÇÃO E DEFINIÇÃO DO OBJETIVO, ESPECIFICANDO-O BEM DE MODO À CRIAÇÃO DE REQUISITOS;
2. DETERMINAR AS FUNÇÕES E AS SUAS SOLUÇÕES PARA QUE CUMPRAM OS REQUISITOS IMPOSTOS;
3. PESQUISA DE SOLUÇÕES E PROCEDER A UM CONJUNTO DE COMBINAÇÕES ATÉ QUE SEJA OBTIDA UMA SOLUÇÃO PRINCIPAL;
4. DIVISÃO DA SOLUÇÃO EM MÓDULOS REALIZÁVEIS;
5. DESENVOLVIMENTO DOS LAYOUTS PARA OS MÓDULOS-CHAVE;
6. GERAÇÃO DE UM LAYOUT COMPLETO;
7. PREPARAÇÃO DE INSTRUÇÕES DE PRODUÇÃO E DE OPERAÇÃO.

Tendo presentes todos estes conceitos, é possível proceder a um projeto mecânico com um grau de eficácia mais elevado.

A norma VDI 2221 – *Systematic approach to the design of technical systems and products* define uma metodologia genérica e sistemática para o desenvolvimento de sistemas técnicos, abrangendo desde a análise de requisitos até à conceção detalhada e documentação do produto final.

No contexto do projeto de automatização do processo de limpeza de cuvetes, esta norma é particularmente relevante porque o desenvolvimento envolveu a criação de um sistema técnico específico, que integra componentes mecânicos e pneumáticos, exigindo um processo de conceção estruturado e fundamentado.

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Neste capítulo é apresentado o modelo para automatização, assim como uma síntese dos principais aspetos considerados durante esse processo. Em seguida, são expostos os requisitos essenciais para verificar se o sistema desenvolvido está de acordo com os objetivos e expectativas iniciais do projeto.

4.1. EQUIPAMENTO A AUTOMATIZAR

O equipamento a automatizar encontra-se representado na Figura 4.1 e trata-se de um produto que utiliza ar comprimido para a limpeza de gelo das cuvetes de polvo. Este equipamento tem como função automatizar um processo manual de limpeza utilizado e tem como objetivo de melhorar as condições do posto de trabalho, tornar um processo mais sustentável e otimizado e de certo modo facilitá-lo.



Figura 4.1 - Equipamento a automatizar

O sistema de limpeza automatizado foi concebido para garantir a remoção eficiente de resíduos e cristais de gelo das cuvetes, através do acionamento preciso das válvulas pneumáticas de impacto, sincronizado com a deteção das cuvetes pelos sensores.

4.1.1. FUNCIONAMENTO PRETENDIDO

O processo inicia-se com a identificação da cuvete pelo operador na consola HMI, onde é seleccionado o código correspondente ao modelo de cuvete a ser processado. A cada cuvete é atribuído um PMS, utilizado como referência para a definição das válvulas a acionar, conforme ilustrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Cuvete com o Pms 146

Durante a operação, as cuvetes são transportadas por tapetes rolantes, sendo processado apenas um tipo de cuvete por ciclo. O sensor fotoelétrico deteta a passagem de cada cuvete, enviando o sinal ao PLC, que comanda a sequência de abertura das válvulas pneumáticas destinadas àquela posição.

Na Figura 4.3 é ilustrado o modo como o sensor fotoelétrico realiza a deteção da passagem das cuvetes na linha de transporte.



Figura 4.3 – Zona de identificação do sensor para cuvetes

A geometria da cuvette permite ao sensor identificar de forma fiável a transição entre cuvetes consecutivas, garantindo a sincronização precisa do sistema de sopro com o avanço do tapete. O sensor também está colocado de maneira a detetar esta zona de intervalo entre as cuvetes como se vê na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Posição do sensor na linha

Cada válvula de impacto liberta um jato curto e direcionado de ar comprimido, removendo o gelo acumulado na superfície da cuvette.

O funcionamento do sistema está sincronizado com a linha de embalagem, interrompendo automaticamente o tapete e os ciclos de sopro sempre que ocorre uma paragem do tapete a jusante, evitando desperdício de energia e ar comprimido. O processo repete-se de forma contínua e controlada até à conclusão da limpeza, sendo finalizado pelo operador através da consola HMI.

Primeiramente, deve inicializar o sistema clicando no botão “INICIO” (Figura 4.5).

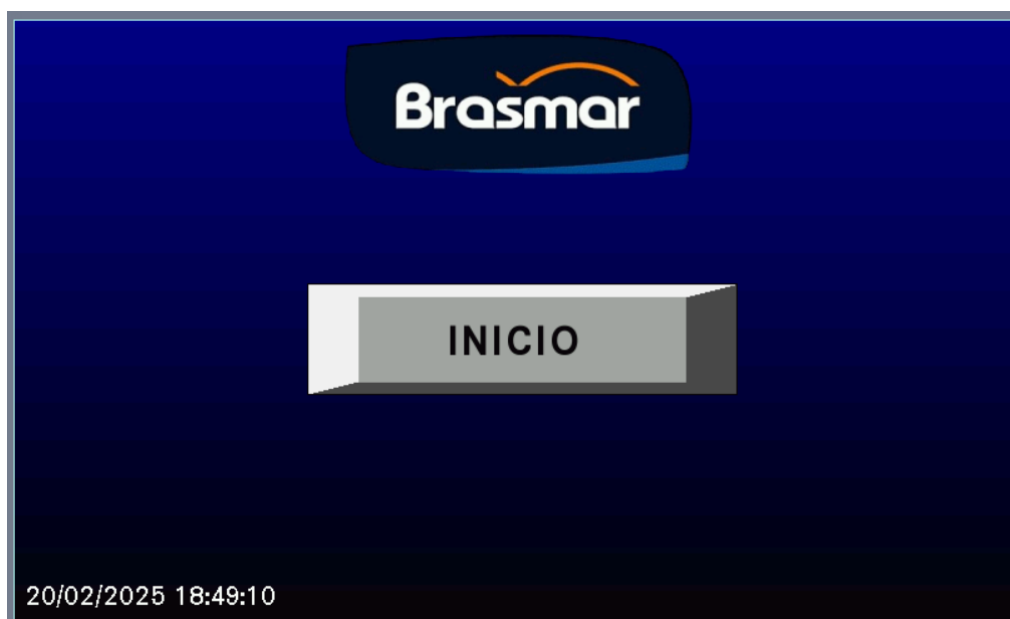


Figura 4.5 – Menu de inicialização

De seguida abre um menu com três opções e deve seleccionar o botão “PMS”, na Figura 4.6, que abre um outro menu com todas as cuvetes e de seguida selecciona o número da PMS que vai passar pela linha, como se vê na Figura 4.7.



Figura 4.6 – Menu com as opções: PMS; CONSUMOS; MODO MANUTENÇÃO

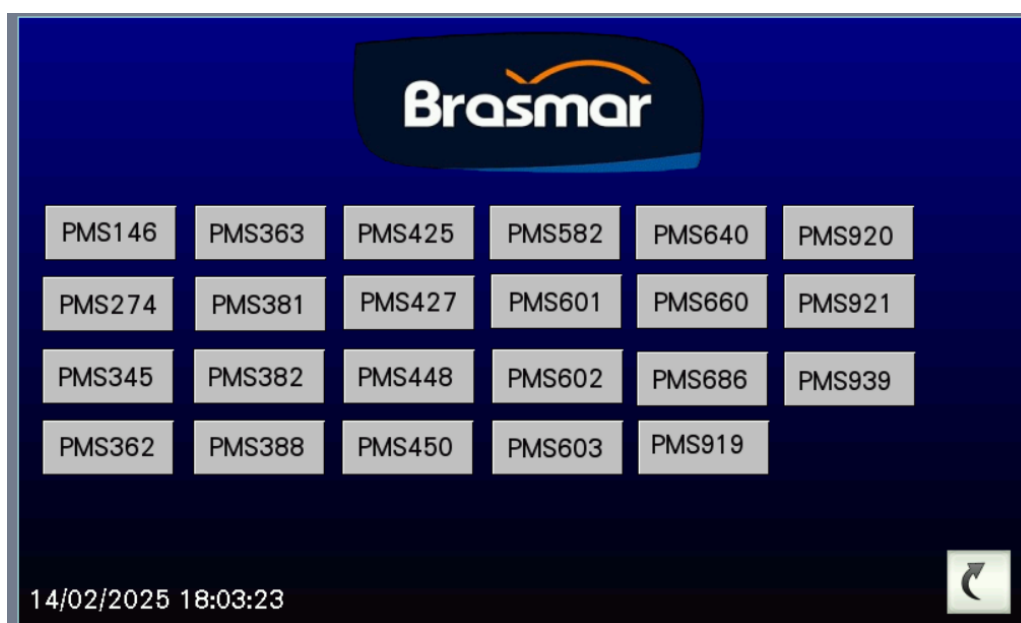


Figura 4.7 – Identificação de todas as cuvetes através do PMS

Depois de selecionar o PMS, uma nova *layer* é apresentada para a cuvette em questão como se vê na Figura 4.8. Para que seja possível iniciar a limpeza o operador deve primeiramente selecionar o botão “INICIAR PROCESSO”.



Figura 4.8 – Menu da cuvete identificada com o PMS 146

Depois de selecionado e à medida que as cuvetes avançam na linha de produção, o sensor fotoelétrico detecta a sua presença e envia um sinal ao PLC. O PLC programado em linguagem *Ladder*, processa essa informação e aciona as válvulas pneumáticas correspondentes, libertando jatos de ar comprimido para a remoção de impurezas como se vê na Figura 4.9 e Figura 4.10.



Figura 4.9 - Sensor fotoelétrico integrado na linha

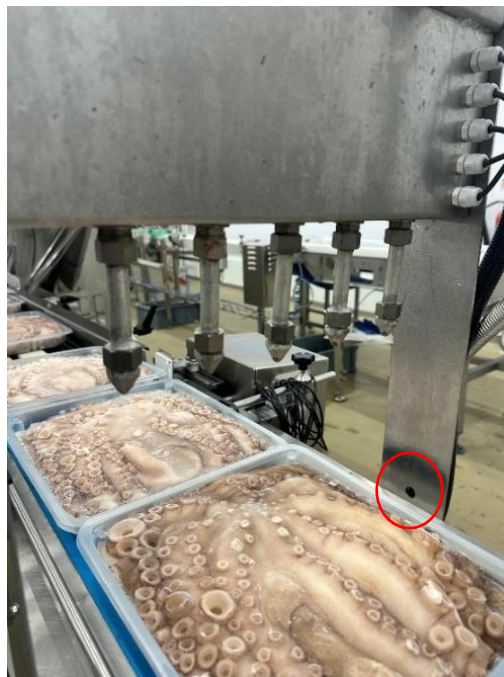


Figura 4.10 – Local do sensor fotoelétrico

O funcionamento do sistema deve **ser** dinâmico e sincronizado com a linha de embalagem. Como o processo de embalagem pode ser mais demorado, o tapete da zona de limpeza (Figura 4.11) deve parar enquanto o embalagem é feito, evitando o desperdício de ar comprimido.



Figura 4.11 – Linha do processo de limpeza

Assim, quando uma cuvete estiver em processo de embalagem, como na Figura 4.12, o sopro será interrompido até que o tapete volte a avançar.



Figura 4.12 – Cuvetes no tapete de embalagem



Figura 4.13 – Cuvetes no tapete de limpeza

O sistema permite que o operador ajuste o tempo de sopro através da HMI, garantindo a flexibilidade necessária para diferentes tipos de cuvets (abordado mais à frente). No entanto,

a pressão do ar comprimido deve ser ajustada manualmente de acordo com as necessidades do processo, através de um regulador de pressão que está identificado na Figura 4.14.



Figura 4.14 - Regulador de pressão do ar comprimido

Além de otimizar a limpeza e reduzir desperdícios, este sistema automatizado proporciona um ambiente de trabalho mais ergonómico, uma vez que reduz a necessidade de intervenção manual constante, minimizando esforços repetitivos e melhorando a segurança dos operadores, sendo este o principal objetivo deste trabalho.

No final da operação, o operador pode finalizar o ciclo na consola clicando em “TERMINAR PROCESSO”, preparando a linha para um novo lote de produção, como evidenciado na Figura 4.15.



Figura 4.15 – Término do processo de limpeza

Este funcionamento garante eficiência, economia de recursos e melhores condições de trabalho, assegurando um processo de limpeza otimizado e alinhado com as necessidades e requisitos impostos.

4.1.2. FUNCIONALIDADES DO SISTEMA

O principal objetivo deste sistema foi a limpeza automatizada dos resíduos de gelo nas cuvetes. Além disto, conseguiu-se outras funcionalidades que permitiram entregar informações mais detalhadas do processo. Assim, de seguida apresenta-se uma demonstração do conteúdo da consola HMI assim como outras informações adjacentes.

No capítulo anterior já foi demonstrada a inicialização do sistema e o menu com as opções a escolher, assim como os menus das PMSs e de uma PMS em particular.

4.1.2.1. MENU “AJUSTES”

Dentro do menu da PMS escolhida, temos a informação do caudal instantâneo de ar comprimido, em m³/h, que está a ser medido no momento, na Figura 4.16. Esta medição foi conseguida através da instalação de um caudalímetro na linha, apresentado no Anexo B: Caudalímetro Testo 6452 DN25, com mais informações.



Figura 4.16 – Informação dos valores do caudal instantâneo de ar comprimido em m3/h

Ao clicar no botão “AJUSTES” uma nova página é aberta.

Como foi requisitado, só pessoas da manutenção é que poderiam aceder a este menu, assim é apresentado uma página com credenciais para que seja um acesso restrito, como se vê na Figura 4.17.

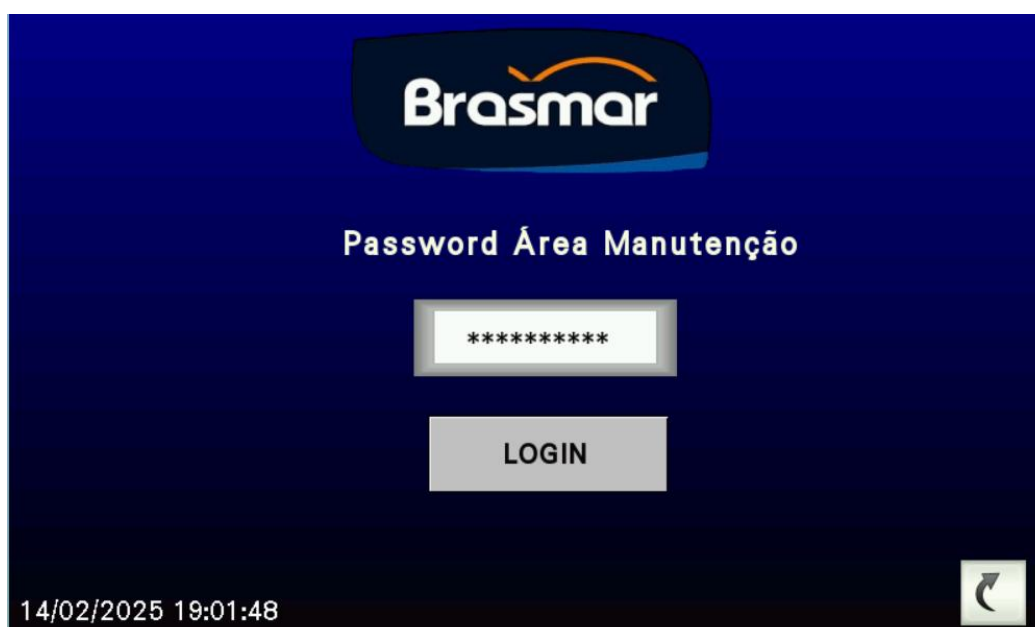


Figura 4.17 – Menu para aceder ao menu da manutenção

Depois de fornecer os dados corretos, há 3 opções a que podem ter acesso: “VERIFICAÇÃO DE VÁLVULAS”, “AJUSTE DE TEMPO VÁLVULAS” e “AJUSTE HORA E DATA”.



Figura 4.18 – Menu com opções: “VERIFICAÇÃO VÁLVULAS”; AJUSTE TEMPO VÁLVULAS”; “AJUSTE HORA E DATA”

No menu “VERIFICAÇÃO DE VÁLVULAS” o operador consegue fazer uma verificação das válvulas clicando nos botões apresentados na Figura 4.19.

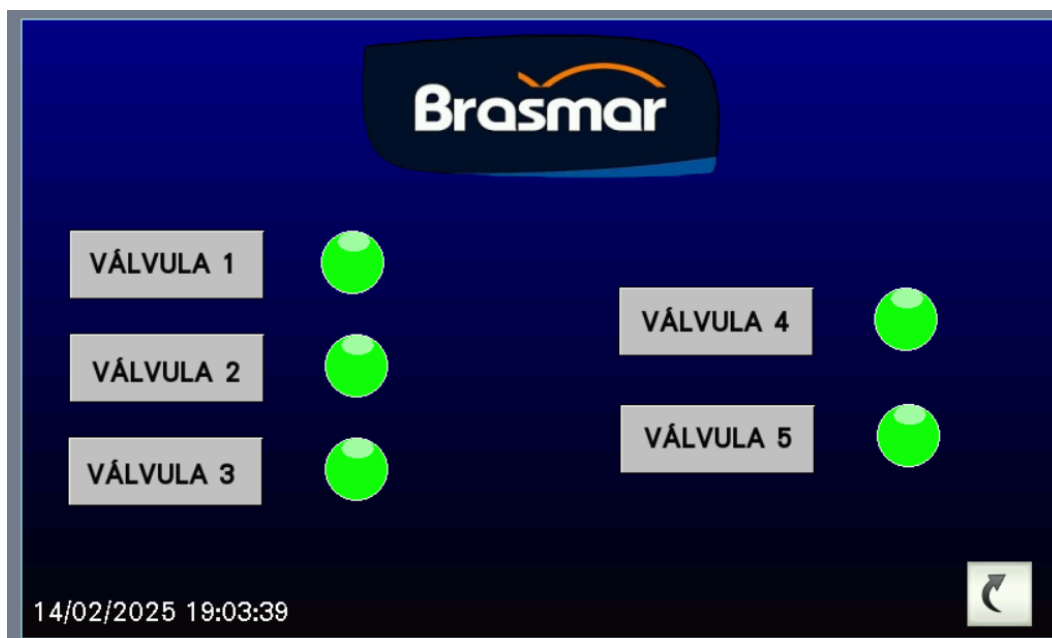


Figura 4.19 - Menu "VERIFICAÇÃO DE VÁLVULAS"

Na Figura 4.20 vemos o exemplo da seleção da válvula 1. Enquanto a luz estiver vermelha ela está ativa, assim que voltar a clicar no botão esta fica desativada e voltando ao estado verde.



Figura 4.20 – Botão para acionar a válvula 1 e o seu respectivo estado

Este menu foi desenvolvido com o objetivo fazer uma pequena inspeção às válvulas de impacto antes de iniciar cada processo para não correr o risco de as mesmas não funcionarem durante a limpeza e não cumprirem o objetivo.

No “AJUSTE DE TEMPO VÁLVULAS” pode-se controlar o tempo de sopro das válvulas durante o processo. Primeiramente, clica-se no *number input* do “AJUSTE SOPRO VÁLVULA” e a inserção do número é feita através de um *NUM Keyboard* como se vê na Figura 4.21.

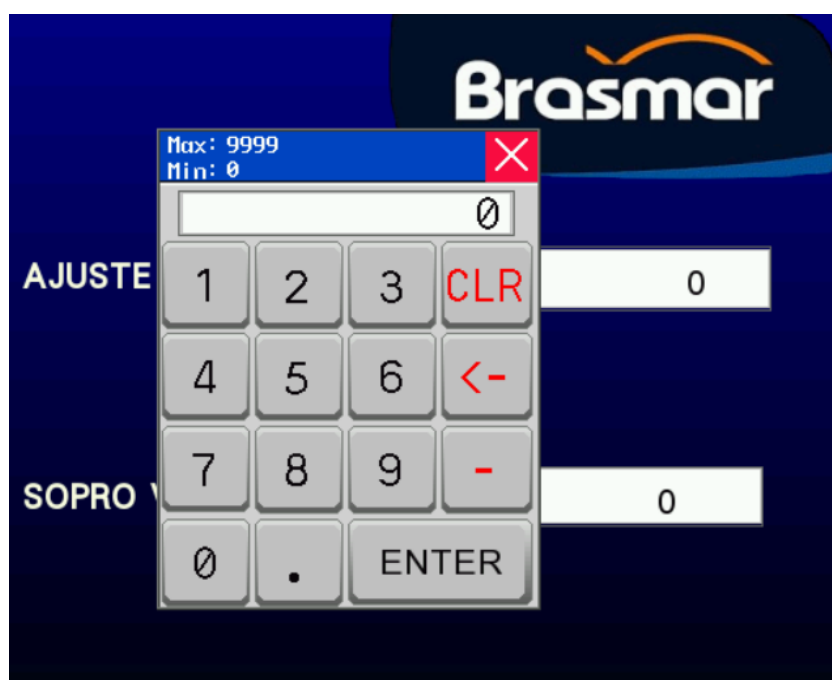


Figura 4.21 - NUM Keyboard para inserção de dígitos

Depois da inserção, clica-se no botão “GRAVAR VALOR” e o valor fica registrado e a partir desse momento gravado numa área de memória.



Figura 4.22 – Menu de ajustes do tempo de sopro de válvulas com a o botão “GRAVAR VALOR”

Por fim, no menu “AJUSTE HORA E DATA” é possível fazer o ajuste dos parâmetros que estão na Figura 4.23.

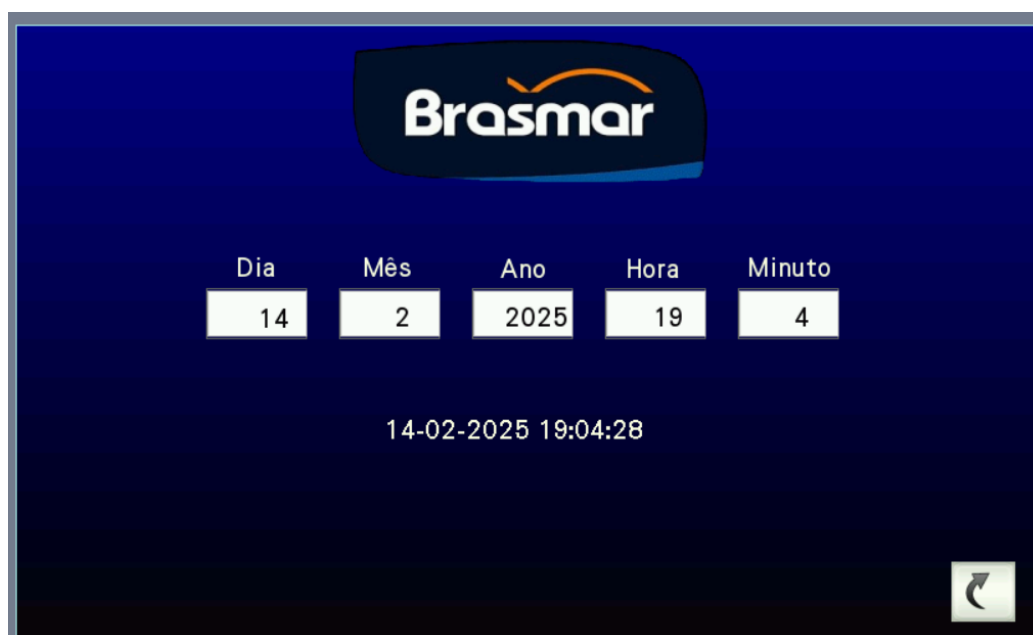


Figura 4.23 – Menu “AJUSTE HORA E DATA”

4.1.2.2. MENU “CONSUMOS”

Voltando ao menu que aparece depois de inicializar o sistema temos três opções como já foi referido anteriormente.



Figura 4.24 – Menu com as opções: “PMS”; “CONSUMOS”; “MODO MANUTENÇÃO”

Ao clicar na opção “CONSUMOS” uma nova página é aberta com parâmetros informativos como se pode ver na Figura 4.25.

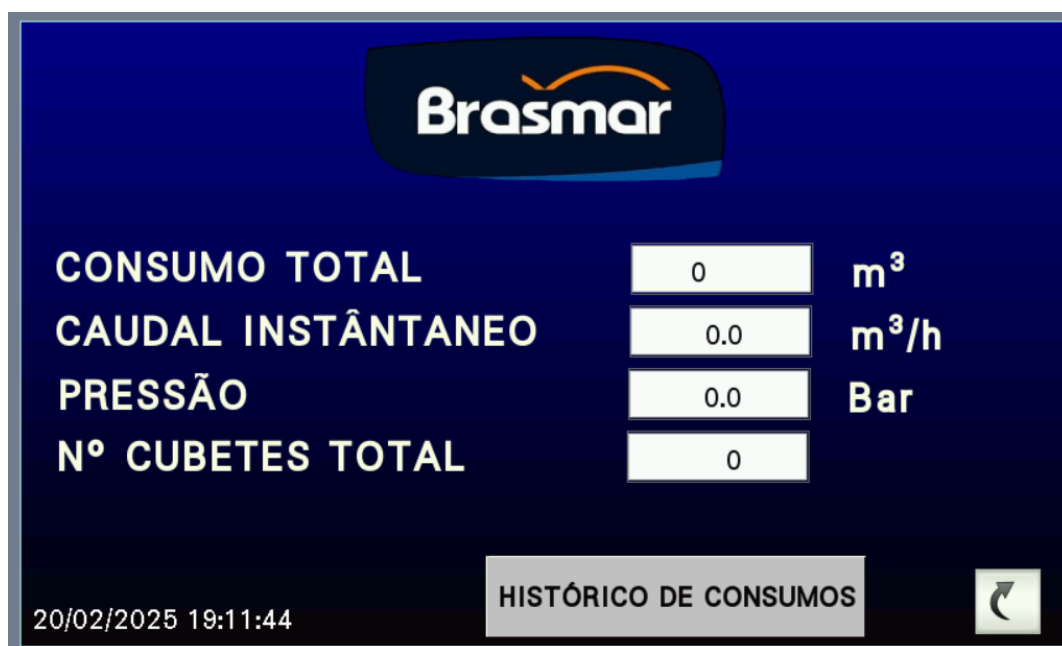


Figura 4.25 – Menu “CONSUMOS”

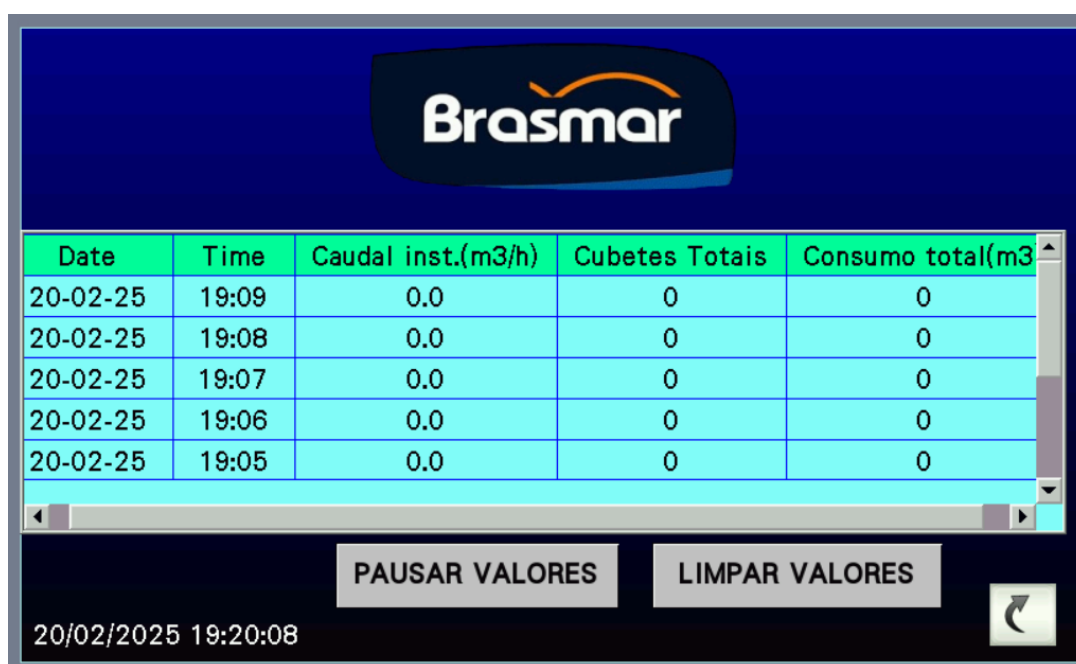
Da análise da figura anterior conseguimos obter o consumo total de ar comprimido que está a ser consumido ao longo do dia, assim como o caudal instantâneo, a pressão de ar comprimido da rede fornecida e o número total de cubetes que vai passando pela linha de

produção. Os valores destes parâmetros começam a ser medidos entre as 6h00 e as 00h00. Assim que o horário saia deste intervalo todos os campos são zerados.

Nesta página também há uma opção “HISTÓRICO DE CONSUMOS” que dá uma informação mais detalhada destes parâmetros.

4.1.2.3. MENU “HISTÓRICO DE CONSUMOS”

Ao clicar em “HISTÓRICO DE CONSUMOS” da Figura 42 é apresentada uma nova página como se vê na Figura 4.26.



Date	Time	Caudal inst.(m3/h)	Cubetes Totais	Consumo total(m3)
20-02-25	19:09	0.0	0	0
20-02-25	19:08	0.0	0	0
20-02-25	19:07	0.0	0	0
20-02-25	19:06	0.0	0	0
20-02-25	19:05	0.0	0	0

PAUSAR VALORES LIMPAR VALORES

20/02/2025 19:20:08

Figura 4.26 – Menu “HISTÓRICO DE CONSUMOS”

Na figura anterior temos uma tabela com a informação dos parâmetros de caudal instantâneo, cubetes totais e consumo total de ar comprimido a ser registada de 10 em 10 minutos.

O botão “PAUSAR VALORES” faz uma interrupção da medição dos valores e o botão “LIMPAR VALORES” limpa a visualização da tabela. Estes botões apenas interferem na visualização dos valores da tabela na consola, mas não no registo externo dos mesmos.

A este processo está associado o registo momentâneo dos valores num ficheiro Excel que é gravado numa pen drive como se pode ver na Figura 4.27.

DATE	TIME	Caudal instantâneo (m3/h)	Cubetes totais	Consumo total (m3)
05/02/2025	12:42:11	0	0	0
05/02/2025	12:52:11	0	0	0
05/02/2025	13:02:11	0	0	0
05/02/2025	13:25:13	0	0	0
05/02/2025	13:32:39	0	0	0
05/02/2025	13:33:39	0	0	0
05/02/2025	13:35:16	0	0	0
05/02/2025	13:36:16	0	0	0
05/02/2025	13:37:47	0	0	0
05/02/2025	13:40:11	1	0	0

Figura 4.27 - Ficheiro Excel do registo dos valores dos consumos da linha

4.1.2.4. MENU “MODO MANUTENÇÃO”

Voltando ao menu da figura 41 e clicando na opção “MODO MANUTENÇÃO” temos as mesmas funcionalidades que foram apresentadas no capítulos do Menu “AJUSTES”.

4.1.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SEGURANÇA NO MANUSEAMENTO

O sistema de automatização a desenvolver deve garantir a segurança, preservando a integridade física do utilizador e do próprio equipamento. Assim, tendo em conta o funcionamento pretendido, definiram-se indicações a cumprir pelo comando do sistema para que este cumpra as exigências de segurança, sendo estas:

-
1. PARAGEM IMEDIATA DO EQUIPAMENTO EM EMERGÊNCIAS INDICADAS PELO UTILIZADOR;
 2. PERMISSÃO PARA A EDIÇÃO DE PARÂMETROS E/OU EXECUÇÃO DE AÇÕES, PASSÍVEIS DE PÔR EM CAUSA A SEGURANÇA DO UTILIZADOR E/OU DO SISTEMA, APENAS A UTILIZADORES HABILITADOS PARA ESSAS TAREFAS;
 3. APENAS É REPOSTO O CICLO NOVAMENTE ASSIM QUE TODOS OS INDICATIVOS DE SEGURANÇA DO UTILIZADOR E DO EQUIPAMENTO ESTIVEREM COMPLETAMENTE EM CONFORMIDADE.

4.2. SELEÇÃO DE COMPONENTES

Neste sub-capítulo é apresentada a abordagem teórico-prática que justifica a escolha dos componentes importantes para o desenvolvimento e funcionamento do projeto em estudo. Para tal, apresenta-se para cada componente um enquadramento teórico associado ao componente em estudo, a apresentação das características relevantes do dispositivo escolhido e a respetiva fundamentação da escolha.

4.2.1. SENSORES

Neste subcapítulo serão abordados os vários tipos de sensores existentes, nomeadamente os que serão usados na parte prática.

4.2.1.1. SENSORES INDUTIVOS

Para definir este tipo de sensores, é importante compreender alguns conceitos básicos:

- **INDUTOR:** ESTE SENSOR É COMPOSTO POR UM NÚCLEO FEITO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO, QUE É UTILIZADO PARA CRIAR CAMPOS MAGNÉTICOS DE MAIOR INTENSIDADE. EM TORNO DESTE NÚCLEO, HÁ ESPIRAS QUE GERAM UM FLUXO MAGNÉTICO QUANDO UMA CORRENTE ELÉTRICA PASSA POR ELAS [26];
- **INDUTÂNCIA:** ESTE TERMO REFERE-SE À CAPACIDADE DO INDUTOR DE ARMAZENAR ENERGIA NA FORMA DE UM CAMPO MAGNÉTICO [26].

Com base nesses conceitos, um sensor indutivo é um dispositivo que deteta a presença de materiais metálicos pela alteração no campo magnético ao seu redor.

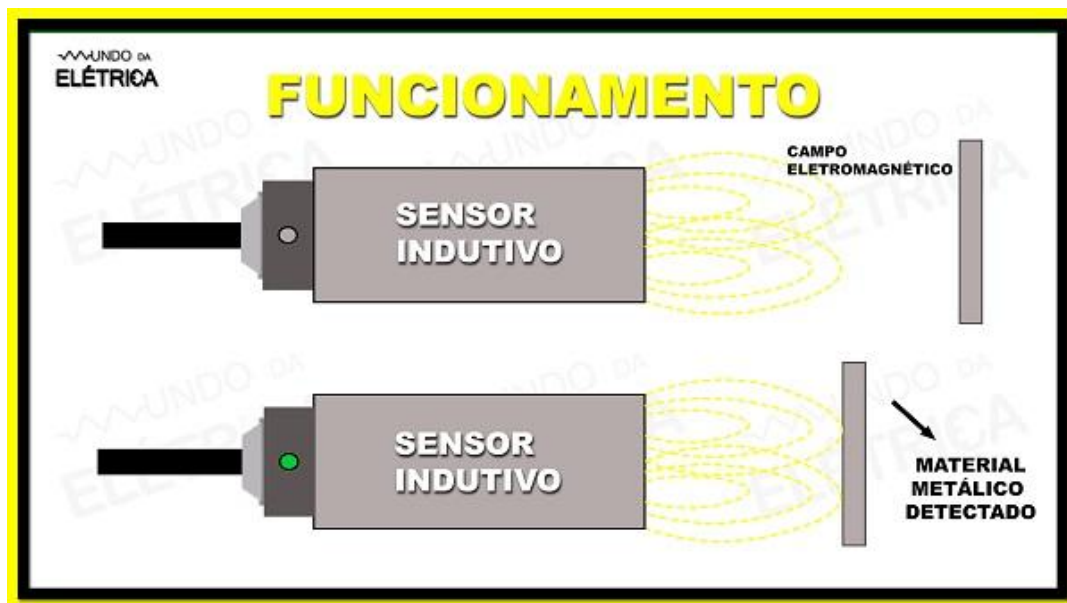


Figura 4.28 - Modo de funcionamento de um sensor indutivo [26]

Aplicações

Os sensores indutivos por apresentarem uma grande versatilidade e segurança são, recorrentemente, utilizados nos equipamentos industriais. Assim, a seguir são apresentadas algumas aplicações [26]:

- DETEÇÃO DE PRESENÇA DE MATERIAIS METÁLICOS;

- DETECÇÃO DE FIM DE CURSO;
- LEITURA DA POSIÇÃO DO MATERIAL A INCIDIR;
- CONTAGEM.

4.2.1.2. SENSORES CAPACITIVOS

Para definir este tipo de sensores, é importante compreender alguns conceitos básicos:

- **CAPACITOR:** ESTE SENSOR É COMPOSTO POR DUAS PLACAS CONDUTORAS SEPARADAS POR UM MATERIAL DIELÉTRICO (ISOLANTE). QUANDO UMA TENSÃO ELÉTRICA É APLICADA ENTRE AS PLACAS, UM CAMPO ELÉTRICO É CRIADO ENTRE ELAS [27].
- **CAPACITÂNCIA:** ESTE TERMO REFERE-SE À CAPACIDADE DO CAPACITOR DE ARMAZENAR ENERGIA SOB A FORMA DE UM CAMPO ELÉTRICO. A CAPACITÂNCIA DEPENDE DA ÁREA DAS PLACAS, DA DISTÂNCIA ENTRE ELAS E DO TIPO DE MATERIAL DIELÉTRICO UTILIZADO [27].

Com base nesses conceitos, um sensor capacitivo é um dispositivo que deteta a proximidade de objetos, sejam eles metálicos ou não, através da variação da capacitância causada pela mudança no campo elétrico ao seu redor.

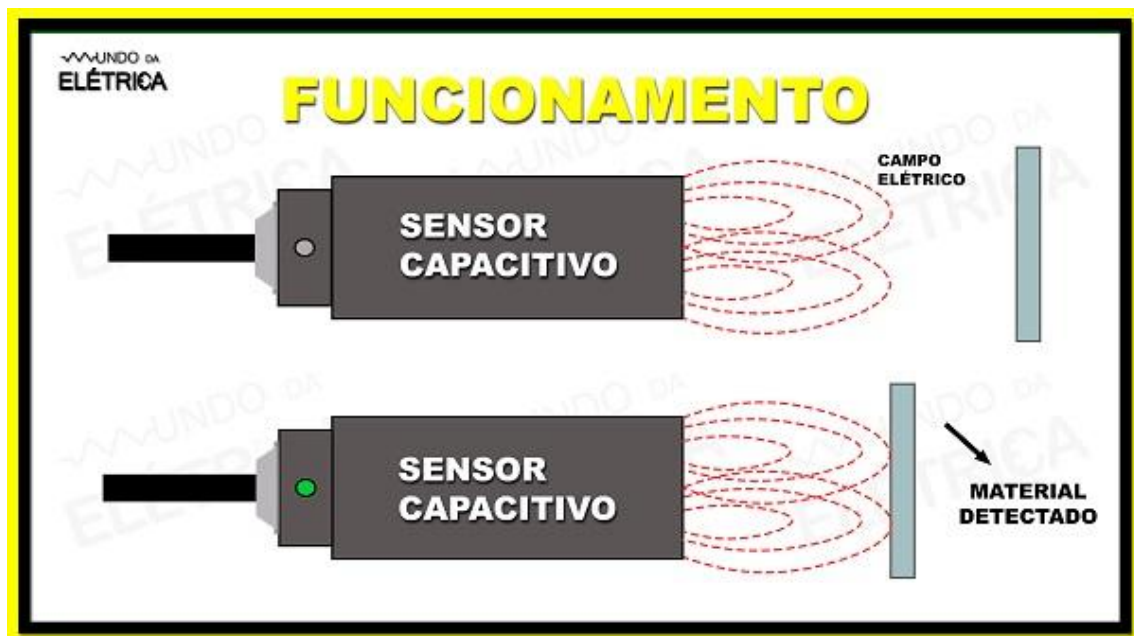


Figura 4.29 - Modo de funcionamento de um sensor capacitivo [27]

Aplicações

Estes sensores são muito utilizados em situações de alta resolução [27]:

-
- MEDIÇÕES DE POSIÇÃO COM ALTA PRECISÃO;
 - MEDIÇÕES DE ESPESSURA;
 - IDENTIFICAÇÃO DE MATERIAIS DE ACORDO COM AS SUAS PROPRIEDADES.

4.2.1.3. SENSOR FOTOELÉTRICO DIFUSO

Este tipo de sensor integra um emissor e um recetor de luz no mesmo corpo. Quando um objeto entra na área de sensibilidade do sensor, ele reflete o feixe de luz emitido pelo transmissor de volta para o recetor, ativando o sensor. A distância entre o sensor e o objeto a ser detetado varia de acordo com a cor da superfície do material. A mudança de cor e tonalidade do objeto pode alterar essa distância de deteção [28].

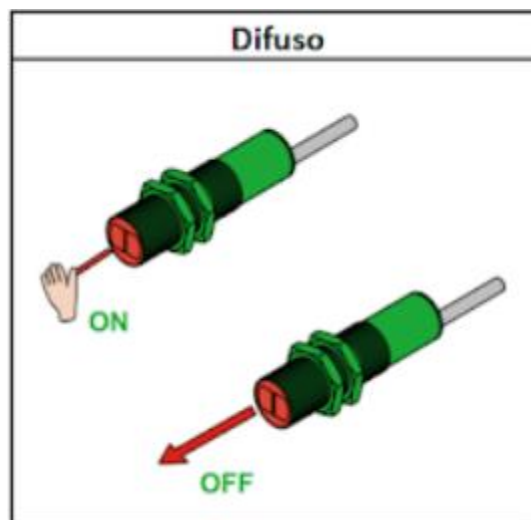


Figura 4.30 – Modo de funcionamento de um sensor fotoelétrico difuso [28]

Aplicações

Deteção de tampas em garrafas plásticas

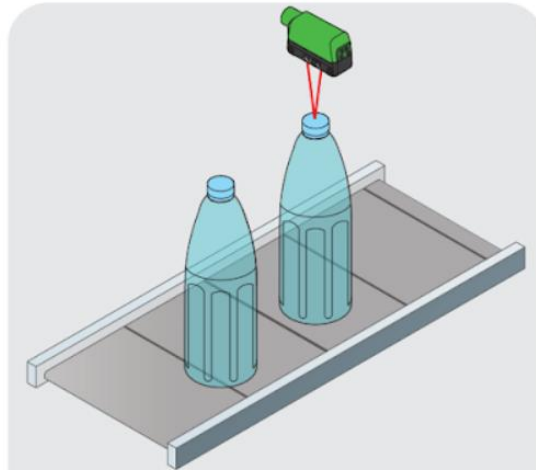


Figura 4.31 - Exemplo de uma das aplicações do sensor fotoelétrico difuso [28]

4.2.1.4. SENSOR FOTOELÉTRICO DE BARREIRA

Neste tipo de sensor, o transmissor e o recetor estão alojados em invólucros separados e devem ser alinhados um de frente para o outro. A deteção ocorre quando um objeto interrompe o feixe de luz entre eles.

Geralmente, esses sensores possuem lentes maiores, permitindo distâncias de deteção muito superiores em comparação com outros tipos. Eles são especialmente recomendados para ambientes com névoa ou poeira [28].

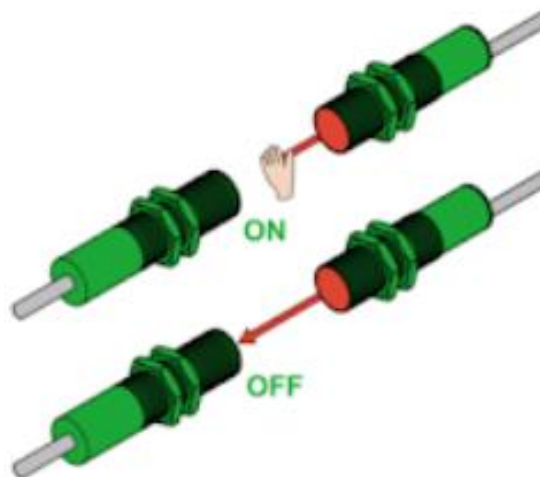


Figura 4.32 – Modo de funcionamento do sensor fotoelétrico de barreira [28]

Aplicações

Deteção de caixas em tapetes transportadores

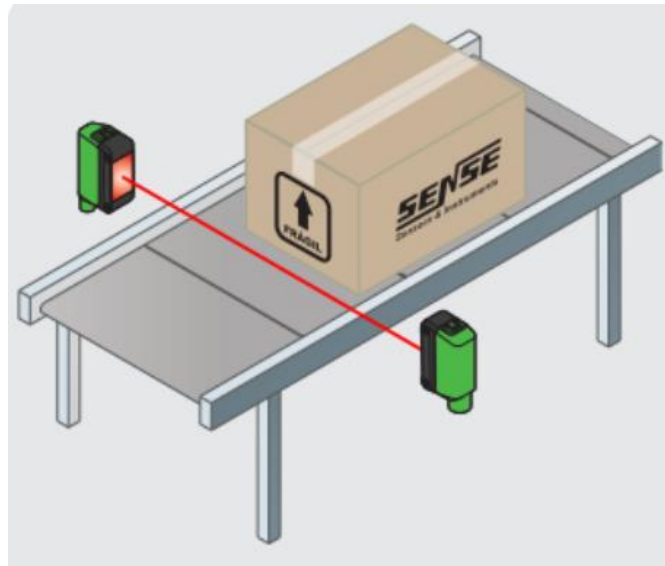


Figura 4.33 – Exemplo de uma das aplicações do sensor fotoelétrico de barreira [28]

4.2.1.5. SENSOR FOTOELÉTRICO RETRO REFLEXIVO

Neste tipo de sensor, o transmissor e o recetor também estão integrados no mesmo invólucro, mas a reflexão da luz ocorre através de um espelho prismático, que deve ser posicionado em frente ao sensor. A detecção do objeto acontece quando este interrompe o feixe de luz refletido pelo espelho.

O espelho tem prismas alinhados lado a lado em toda a sua superfície, permitindo que uma grande parte da luz polarizada seja refletida de volta paralelamente para o sensor, o que proporciona uma grande distância de operação entre o sensor e o espelho.

Um ponto a ter em conta na utilização deste sensor é a detecção de objetos transparentes, que podem deixar a luz atravessá-los, causando falhas na detecção. Nestes casos, existem sensores refletivos específicos para objetos transparentes [28].

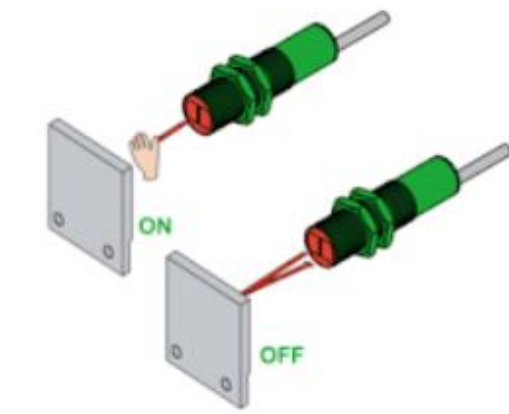


Figura 4.34 – Modo de funcionamento do sensor fotoelétrico retro reflexivo [28]

Aplicações

Deteção de caixas em linhas transportadoras.

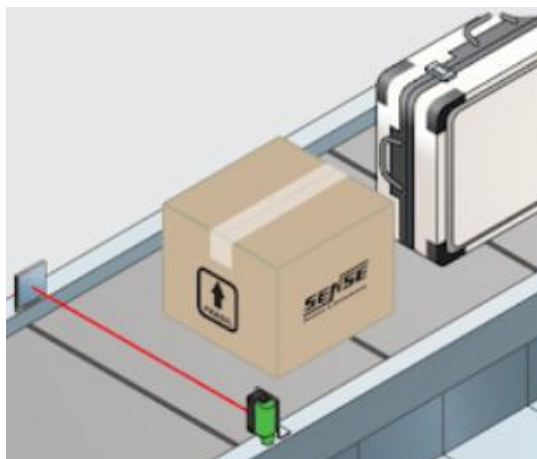


Figura 4.35 - Exemplo de uma das aplicações do sensor fotoelétrico retro reflexivo [28]

4.2.1.6. SENSORES FIBRA ÓTICA

Sensores de fibra ótica são dispositivos que utilizam fibras óticas para detetar e medir grandezas físicas, como pressão, temperatura, deslocamento, entre outras. Eles convertem o estado do objeto medido num sinal de luz mensurável.

Estes sensores são compostos por uma unidade emissora de luz, uma fibra ótica e um recetor. Quando ocorre uma variação na grandeza medida, ela altera as propriedades da luz que se propaga pela fibra, como intensidade, fase ou polarização. O recetor deteta essa alteração e converte-a num sinal elétrico correspondente [29].



Figura 4.36 - Composição de um sensor de fibra ótica [29]

Algumas vantagens dos sensores de fibra ótica incluem imunidade a interferências eletromagnéticas, alta sensibilidade, pequeno tamanho, possibilidade de multiplexação e capacidade de operar em ambientes agressivos. Eles são amplamente utilizados em diversas aplicações, como monitorização estrutural, detecção de fugas, controle de processos industriais, entre outras.

4.2.1.7. ESCOLHA DO SENSOR

Para este sistema foi escolhido o sensor fotoelétrico OMRON E3Z-D61 (Figura 4.37) sendo as suas principais propriedades apresentadas na Tabela 2.



Figura 4.37 – Sensor fotoelétrico OMRON E3Z-D61 [30]

Tabela 2 - Principais propriedades do Sensor fotoelétrico OMRON E3Z-D61 [30]

Método de deteção	Reflexão difusa
Distancia de deteção	100 mm
Tipo de luz	Led infravermelho
Tensão de alimentação	Consumo de corrente
Consumo de corrente	Máximo 30 mA
Tensão de alimentação	12–24 VDC
Saída de controlo	Transístor NPN
Modo de funcionamento	Selecionável: Light-ON (com luz) ou Dark-ON (sem luz)
Indicadores luminosos	LED laranja (estado de operação) + LED verde (estabilidade do sinal)
Tempo de resposta	Até 1 ms (ligar/desligar)

Este sensor foi selecionado pela sua elevada rapidez de resposta, essencial para sistemas com deteção em linha, como o caso das cuvetes em movimento. A sua robustez e proteção IP67 tornam-no adequado para ambientes industriais com humidade e variações térmicas, comuns em linhas de congelados. A compatibilidade elétrica com o PLC e a facilidade de montagem contribuem para a sua escolha.

4.2.2. VÁLVULAS PNEUMÁTICAS

As válvulas pneumáticas são componentes essenciais em sistemas de controlo pneumático que utilizam ar comprimido para realizar diversas tarefas, como movimentar atuadores, controlar fluxos de ar e automatizar processos industriais. Estas válvulas regulam o fluxo de ar e controlam a direção, pressão e velocidade do ar comprimido num sistema pneumático [31].

Existem vários tipos de válvulas pneumáticas:

-
- **VÁLVULA DE BLOQUEIO:** BLOQUEIA O SENTIDO DE AR COMPRIMIDO, PODENDO SER UNIDIRECIONAIS OU DE ESCAPE RÁPIDO [32];



Figura 4.38 – Válvula de bloqueio [32]

-
- **VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO:** POSSUI A FUNÇÃO DE LIMITAR (VÁLVULA REDUTORA DE PRESSÃO) OU LIBERTAR (VÁLVULA DE ALÍVIO DE PRESSÃO) A PRESSÃO A PARTIR DE UM PONTO ESPECÍFICO DO SISTEMA PNEUMÁTICO. ISSO GARANTE MAIOR EFICIÊNCIA, ECONOMIA E MENOR DESGASTE DOS EQUIPAMENTOS LIGADOS À REDE DE AR [33];



Figura 4.39 - Válvula reguladora de pressão [33]

- **VÁLVULA REGULADORA DE FLUXO:** CONTROLA O CAUDAL DE AR COMPRIMIDO, TENDO EM CONTA COMO INFLUENCIA A REDUÇÃO OU O AUMENTO DA VELOCIDADE DE ACIONAMENTO DOS ATUADORES [34].



Figura 4.40 - Válvula reguladora de fluxo [34]

- **VÁLVULA DIRECIONAL:** CONTROLAM A DIREÇÃO DO FLUXO DE AR, PERMITINDO OU BLOQUEANDO A PASSAGEM EM DIFERENTES CAMINHOS [35]:
-
- **VÁLVULAS 2/2 VIAS** (DUAS PORTAS, DUAS POSIÇÕES): SIMPLES LIGA/DESLIGA.
 - **VÁLVULAS 3/2 VIAS** (TRÊS PORTAS, DUAS POSIÇÕES): CONTROLAM CILINDROS DE AÇÃO SIMPLES.
 - **VÁLVULAS 4/2 VIAS** (QUATRO PORTAS, DUAS POSIÇÕES): USADAS EM CILINDROS DE AÇÃO DUPLA.
 - **VÁLVULAS 5/2 E 5/3 VIAS:** MAIOR CONTROLE SOBRE ATUADORES DE AÇÃO DUPLA.

Quando acionadas eletronicamente, são chamadas de **eletroválvulas**. Estas válvulas são controladas por sinais elétricos emitidos por um controlador eletrônico, permitindo uma operação precisa e automatizada do sistema pneumático [35].



Figura 4.41 – Válvula pneumática direcional [35]



Figura 4.42 - Eletroválvula [36]

- **VÁLVULAS DE IMPACTO (*IMPACT BLOW VALVE*):** LIBERTAM RAJADAS CURTAS E INTENSAS DE AR PARA LIMPEZA E DESOBSTRUÇÃO.
- **VÁLVULAS PROPORCIONAIS:** PERMITEM AJUSTE CONTÍNUO DE FLUXO OU PRESSÃO, USADAS EM APLICAÇÕES DE ALTA PRECISÃO.
- **Válvulas de sequência:** Ativam automaticamente um estágio do sistema após o anterior completar sua ação.

4.2.2.1. ESCOLHA DA VÁLVULA

Para este sistema foi escolhida a válvula de impacto SMC IBV10-X7-Q (Figura 4.43) sendo as suas principais propriedades apresentadas na Tabela 3.



Figura 4.43 - Válvula de impacto SMC IBV10-X7-Q

Tabela 3 - Principais propriedades da válvula de impacto SMC IBV10-X7-Q [37]

Fluído	Ar comprimido
Faixa de pressão operacional	0.15 to 0.7 MPa
Tensão nominal da bobina	24 VDC
Capacidade de sopro	Rajadas curtas e intensas de ar comprimido
Tempo de atuação	< 50 ms

Este tipo de válvula é especificamente concebido para operações de limpeza por impacto, fornecendo jatos potentes e curtos de ar comprimido. É ideal para remover partículas como gelo, sem contacto físico com a cuvete. A sua estrutura robusta permite operações cíclicas contínuas, garantindo durabilidade e reduzindo paragens por manutenção. A alimentação a 24 VDC permite o controlo direto pelo PLC.

4.2.3. CONTROLADORES

4.2.3.1. PLC – PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

O PLC (Controlador Lógico Programável) é amplamente utilizado para controlar máquinas e processos industriais em diversas aplicações, desde as mais simples até as mais complexas. Esse tipo de controlador é operado por meio de programas específicos desenvolvidos por um programador, possuindo uma memória interna programável que configura, executa e gerência tarefas conforme o programa inserido. Uma das principais vantagens do PLC é sua capacidade de ser programado e reprogramado quantas vezes forem necessárias, permitindo ao programador cometer erros e realizar experimentos até alcançar o programa ideal. Além disso, um PLC pode controlar múltiplos equipamentos simultaneamente [38].

Os PLCs podem variar em tamanho, o que está diretamente relacionado ao número de entradas e saídas (as entradas são os sinais recebidos pelo PLC e as saídas são as respostas do sistema, ou seja, as ações realizadas). Eles também diferem quanto ao tipo de processamento e à marca.

Os tipos mais comuns de PLCs na indústria de automação possuem entradas e saídas a transístor ou a relé. Dispositivos com transístores são mais rápidos no processamento das ações, porém, têm um custo mais elevado. Já os dispositivos que utilizam relés são mais lentos

no processamento, pois o relé é um sistema eletromecânico que recebe um impulso de energia para ativar a saída desejada [38].

Na Figura 4.44 , é possível ver um exemplo de um PLC bastante utilizado na indústria de automação.



Figura 4.44 – Exemplo de um PLC [39]

Este controlador usa uma linguagem própria nomeada por *Ladder*, mas existem outros equipamentos que podem utilizar outros tipos de linguagens de programação. A linguagem *Ladder* é um auxílio gráfico para a programação de PLC.

4.2.3.2. ESCOLHA PLC

O controlador industrial selecionado trata-se do PLC OMRON CP1E-N40DR-D (Figura 4.45). Este é um equipamento compacto, e as suas principais propriedades estão apresentadas na Tabela 4.



Figura 4.45 - PLC OMRON CP1E-N40DR-D [39]

Tabela 4 - Principais propriedades do PLC OMRON CP1E-N40DR-D [40]

Tensão de alimentação	24 V DC
Corrente consumida	0.09 A
Nº das Entradas Digitais e Tipologia	24 entradas, compatíveis com PNP/NPN
Nº de Entradas para Encoder e Frequência Máxima	2 – 10 KHz
Nº das Saídas Digitais e Tipologia	16 saídas a relé
Nº de Saídas de Pulsos e Frequência Máxima	2 – 10 KHz
Nº de Portas de Comunicação de Cada Tipo e Redes Associadas	1 porta RS-232C 1 porta USB
Protocolos de Comunicação Suportados	Host Link 1:N NT Link
Linguagens de Programação Suportadas	Diagrama Ladder (LD)
Backup de Memória	Sim (sem recurso a bateria)
Quantidade de Memória para Armazenamento de Dados	8 000 words
Capacidade do Programa	8 000 passos
Tempo de Execução Lógica	1,19 µs
Real Time Clock	Sim

O CP1E oferece uma relação custo-funcionalidade bastante equilibrada para aplicações industriais de média complexidade. Permite controlo preciso de temporizações, contagens, sinais analógicos e digitais. A compatibilidade nativa com o módulo analógico CP1W-MAD11 e com a consola NB7W elimina a necessidade de conversores adicionais. A sua capacidade de expansão e robustez tornam-no adequado para a aplicação em ambiente fabril.

Além deste controlador também foi escolhido um modulo de expansão analógico (Figura 4.46 - Módulo analógico CP1W-MAD11) para a leitura de entradas analógicas, mais concretamente a leitura de valores dado por um caudalímetro instalado na rede de ar comprimido.



Figura 4.46 - Módulo analógico CP1W-MAD11 [41]

As suas principais propriedades estão apresentadas naTabela 5.

Tabela 5 - Principais propriedades do módulo analógico CP1W-MAD11 [41]

Nº Entradas Analógicas	2
Tipologia de entradas analógicas	0 to 5 V, 1 to 5 V, 0 to 10 V, ± 10 V, 0 to 20 mA, or 4 to 20 mA
Nº saídas analógicas	1
Tipologia de saídas analógicas	1 to 5 V, 0 to 10 V, ± 10 V, 0 to 20 mA, or 4 to 20 mA
Tempo de Conversão	1 ms por canal

Resolução	1/6000 (aprox. 12 bits)
-----------	-------------------------

Este módulo permite:

- A LEITURA DE SINAIS ANALÓGICOS, ESSENCIAIS PARA A MONITORIZAÇÃO DO CAUDAL INSTANTÂNEO DE AR COMPRIMIDO E DA PRESSÃO NA LINHA;
- A SUA RESOLUÇÃO ELEVADA PERMITE LEITURAS PRECISAS E FIÁVEIS;
- A COMPATIBILIDADE NATIVA COM O PLC *OMRON* EVITA PROBLEMAS DE COMUNICAÇÃO E SIMPLIFICA A INTEGRAÇÃO;
- A MEDIÇÃO CONTÍNUA DE CAUDAL PERMITE OTIMIZAR O CONSUMO ENERGÉTICO;
- A VISUALIZAÇÃO EM TEMPO REAL DESSES DADOS NA HMI, FACILITANDO O CONTROLO OPERATIVO E A TOMADA DE DECISÃO POR PARTE DO OPERADOR;
- A EXPORTAÇÃO PERIÓDICA DESTES DADOS PARA UM FICHEIRO EXCEL, ATRAVÉS DE PEN USB LIGADA À HMI, PERMITINDO O ACOMPANHAMENTO HISTÓRICO DO DESEMPENHO E A ANÁLISE ENERGÉTICA DO SISTEMA;

Com uma resolução de 1/4000, o módulo garante medições suficientemente rigorosas para efeitos de controlo energético, e o seu custo acessível traduz-se num excelente retorno sobre o investimento, considerando o impacto que tem na eficiência do processo.

4.2.3.3. CONSOLA HMI

As consolas HMI permitem que haja uma interface que interage com o utilizador. Este tipo de equipamento pode conter todos os botões para controlar a máquina, traduzir dados em tempo real e também pode ajudar na atribuição de valores a algumas variáveis do PLC.

As consolas HMI são elementos muito importantes pois permitem comunicar diretamente com o controlador principal da máquina. Na Figura 4.47 é apresentada uma consola HMI muito utilizada no mundo da automação industrial.



Figura 4.47 – Consola HMI [42]

4.2.3.4. ESCOLHA HMI

A consola usada trata-se de uma OMRON da gama NS-Series, a NB7W-TW01B (Figura 4.48). As propriedades do equipamento mais relevantes são apresentadas na Tabela 6.



Figura 4.48 – Consola OMRON NB7W-TW01B [43]

Tabela 6 – Principais propriedades da consola NB7W-TW01B [44]

Nº de Portas de Comunicação e Tipo	1x RS-232C; 1x RS-422/485; 1x USB Slave Tipo B; 1x Ethernet; 1x USB Host Tipo A
Protocolos de Comunicação Relevantes	Host Link; Modbus RTU

Dimensões da consola	148 × 202 × 46 mm
Tipo de Ecrã	Tátil
Software de Programação	NB-Designer
Tensão de Alimentação	24 V CC
Potência Consumida Máxima	11 W
Dimensão do Ecrã	Diagonal de 7" (800 x 480 mm)
Resolução	800 × 480 pixéis (WVGA)

A HMI permite que o operador interaja facilmente com o sistema, ajustando os tempos de sopro, monitorizando os consumos, consultando os históricos e realizando operações de manutenção. A interface gráfica simples e o controlo por palavra-passe (para os menus de manutenção) aumentam a segurança e melhoram a ergonomia do posto de trabalho. O design intuitivo facilita a adoção por parte dos operadores da linha.

4.2.4. FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A fonte de alimentação é o componente responsável por alimentar o controlador, a HMI, os sensores e todos os restantes componentes elétricos.

4.2.4.1. ESCOLHA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A fonte de alimentação selecionada é a MeanWell SDR-120-24 (Figura 4.49), cujas principais características estão apresentadas na Tabela 7.



Figura 4.49 - Fonte de alimentação MeanWell SDR-120-24 [45]

Tabela 7 - Principais propriedades da fonte de alimentação MeanWell SDR-120-24 [45]

Tensão de Entrada	100 – 240 V AC
Frequência de Entrada	47 – 63 Hz
Tensão de saída Nominal	24V DC (ajustável de 24 a 28V DC)
Corrente de saída Nominal	5A
Potência Nominal	100 W
Proteções	Contra curto-circuito, sobrecarga e sobretensão

Justificação Técnica:

A escolha de uma fonte de alimentação de 24 VDC foi determinada pela necessidade de alimentar de forma fiável todos os dispositivos do sistema, nomeadamente o PLC, a HMI, os sensores e as válvulas. A estabilidade da tensão de saída é fundamental para evitar falhas de funcionamento ou leituras incorretas em sensores e módulos analógicos.

Além disso, a fonte selecionada possui proteções internas contra sobrecargas e curtos-circuitos, garantindo a segurança do sistema e reduzindo o risco de danos em caso de anomalias na rede elétrica. A montagem em calha DIN facilita a integração no quadro elétrico e permite uma organização limpa e eficiente.

Dado que se trata de um equipamento comum já existente em stock da empresa, não foi necessário proceder à sua aquisição, contribuindo assim para a redução de custos do projeto.

4.2.5. RELÉS

Os relés são utilizados para a transferência do sinal associado à rotura de fio dos sensores de fio para as respetivas entradas do controlador, protegendo-as de eventuais oscilações que possam ocorrer no circuito dos sensores.

4.2.5.1. ESCOLHA RELÉS

Os relés escolhidos tratam-se dos relés mecânicos OMRON G2RV-SL500 24V AC/DC (Figura 4.50), sendo as suas principais propriedades apresentadas na Tabela 8.



Figura 4.50 - Relé mecânico OMRON G2RV-SL500 24V AC/DC [46]

Tabela 8 - Principais propriedades do relé mecânico OMRON G2RV-SL500 24V AC/DC [46]

Tensão de alimentação	24 VAC/DC
Corrente nominal	6A a 250V AC / 30V DC
Tensão de carga	até 230 VAC
Tipologia de contactos	SPDT (1NA+1NF - um normalmente aberto e um normalmente fechado)

Justificação Técnica:

Os relés desempenham uma função essencial na interface entre os sinais de baixa potência emitidos pelo PLC e os dispositivos de potência superior, como válvulas ou elementos auxiliares.

Permitem o isolamento elétrico entre o circuito de controlo e o circuito de potência, protegendo o PLC de picos de corrente ou sobretensões originadas nas cargas.

Adicionalmente, os relés utilizados **possuem indicadores LED incorporados**, que facilitam a monitorização visual do seu estado de funcionamento durante a manutenção e a operação. A montagem em calha DIN, tal como a fonte de alimentação, contribui para uma instalação modular e acessível no interior do quadro.

Estes relés já se encontravam em stock na empresa, tendo sido reutilizados no projeto com o objetivo de otimizar recursos e evitar custos adicionais.

4.3. PROGRAMA DESENVOLVIDO

Este subcapítulo descreve o desenvolvimento lógico do sistema automatizado, desde o funcionamento geral até à implementação prática da programação em linguagem *Ladder*. O conteúdo está dividido em várias partes complementares que permitem uma compreensão clara da estrutura de controlo.

Primeiramente, apresenta-se a lógica de funcionamento do sistema com base nos eventos sequenciais que ocorrem desde a deteção da cuvete até ao término do ciclo de sopro.

Em seguida, é incluído um diagrama funcional (*GRAFCET*) que serve de base à lógica implementada, bem como uma tabela detalhada das entradas e saídas utilizadas no sistema.

Posteriormente, é descrita a programação em *Ladder* implementada no software *CX-Programmer* e, por fim, apresenta-se a arquitetura de controlo com foco na sincronização entre sensores e válvulas. Esta abordagem integrada visa ilustrar de forma completa o raciocínio lógico e técnico por detrás da automatização desenvolvida.

4.3.1. LÓGICA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O funcionamento baseia-se na deteção da cuvete por um sensor fotoelétrico, que envia um sinal ao PLC. Se o tapete transportador estiver em movimento, o PLC aciona as válvulas pneumáticas de impacto para efetuar a limpeza. O tempo de sopro é definido pelo operador autorizado através da HMI e controlado por um temporizador. A interação com o sistema é feita através da consola HMI, onde o operador seleciona a PMS correspondente e ajusta os parâmetros relevantes. Após a limpeza, o sistema entra em modo de espera até à deteção da próxima cuvete. Na Figura 4.51 está apresentado um diagrama lógico simplificado que ilustra de forma visual o funcionamento do sistema automatizado, desde a deteção da cuvete até ao fim do ciclo de sopro.

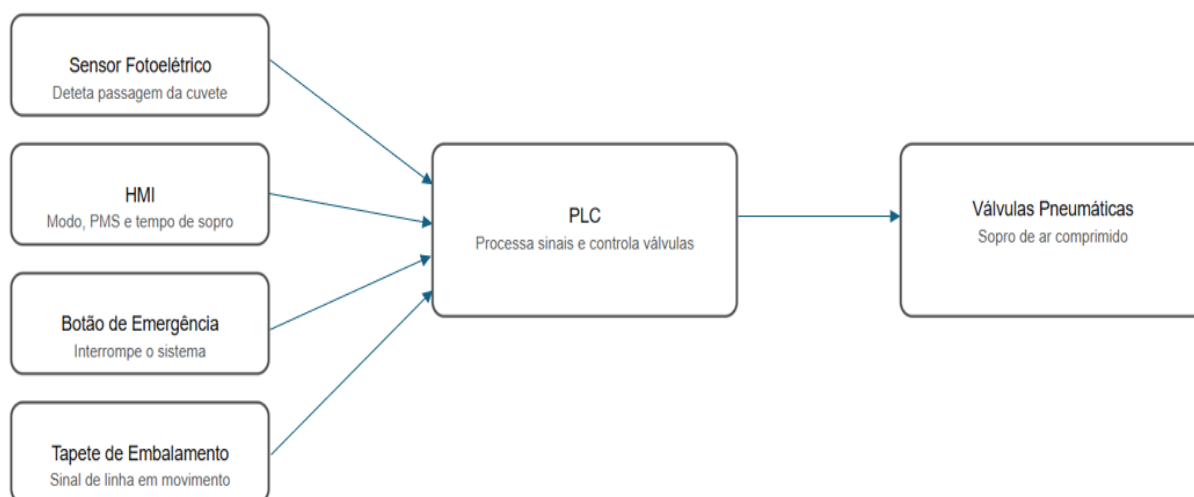


Figura 4.51 - Diagrama funcional simplificado do sistema

4.3.2. GRAFCET DO FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

De forma a permitir uma visualização do sistema pneumático foi utilizado o software *FluidSim* para representar o *Grafcet*, tendo como objetivo representar todas as etapas do processo, as suas ações e as transições entre estas, na Figura 4.52 .

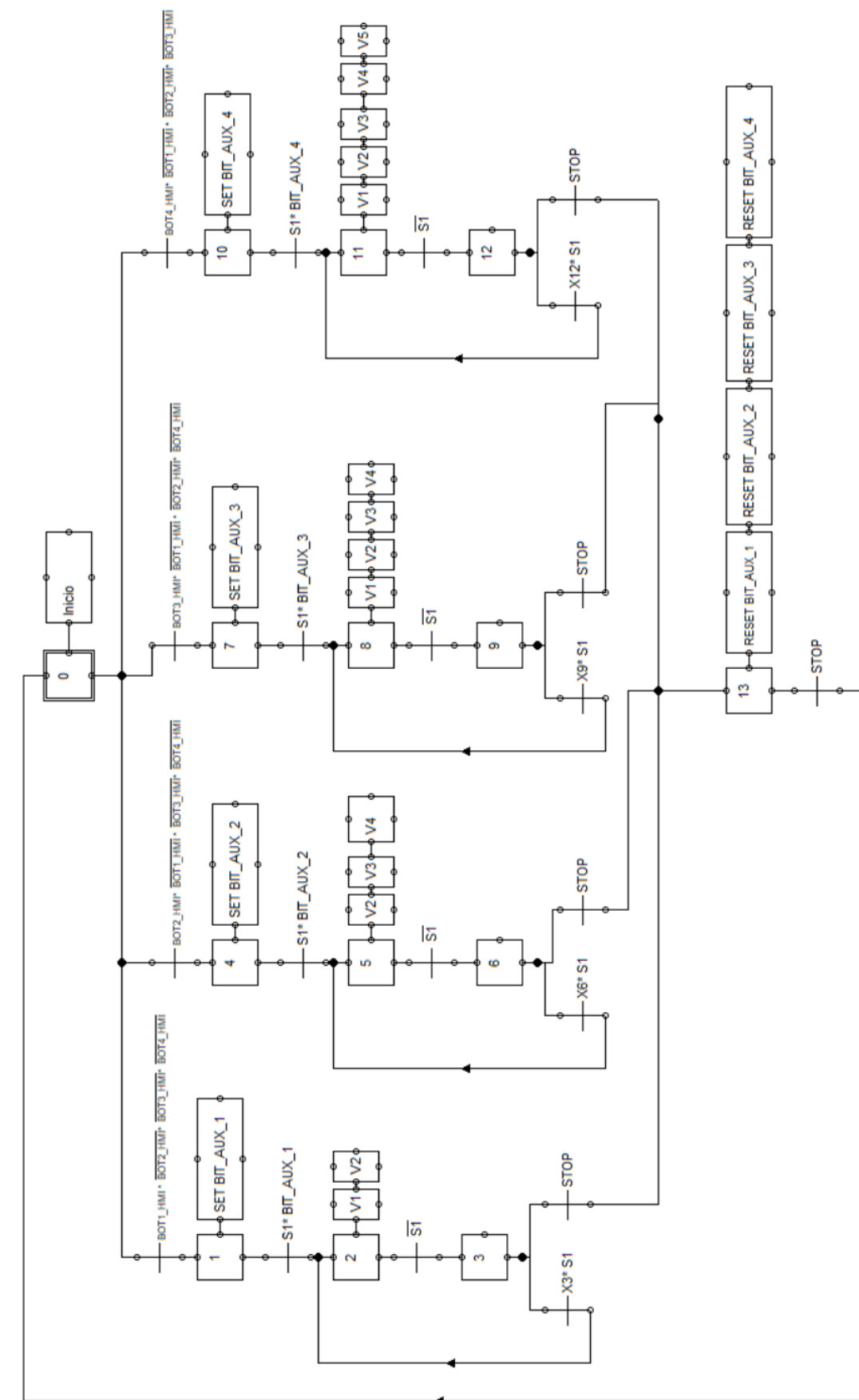


Figura 4.52 - *Grafcet* do funcionamento do equipamento

Logo de seguida, na Tabela 9 é feita uma legenda do *grafcet* para melhor compreensão.

Tabela 9 – Legenda do *grafcet* de funcionamento do equipamento. **Fonte:** elaboração própria.

BOT1_HMI	Botão 1 associado na consola hmi a determinadas cuvetes
BOT2_HMI	Botão 2 associado na consola hmi a determinadas cuvetes
BOT3_HMI	Botão 3 associado na consola hmi a determinadas cuvetes
BOT4_HMI	Botão 4 associado na consola hmi a determinadas cuvetes
BIT_AUX_1	Bit associado ao botão 1 (BOT1_HMI)
BIT_AUX_2	Bit associado ao botão 2 (BOT2_HMI)
BIT_AUX_3	Bit associado ao botão 3 (BOT3_HMI)
BIT_AUX_4	Bit associado ao botão 4 (BOT4_HMI)
S1	Sensor 1 para ativação de válvulas
V1	Válvula 1
V2	Válvula 2
V3	Válvula 3
V4	Válvula 4
V5	Válvula 5
STOP	Botão STOP
X3	Etapa 3
X6	Etapa 6
X9	Etapa 9
X12	Etapa 12

Analisando o *grafcet* da Figura 4.52 - *Grafcet* do funcionamento do equipamento conclui-se a presença de 14 etapas, etapa 0 é a inicial, e 21 transições. Cada etapa é ativada após a verificação da condição de transição, sendo as etapas as seguintes:

-
- ETAPA 0 – ETAPA DE INICIAÇÃO;
 - ETAPA 1 - O BIT ASSOCIADO AO BOTÃO QUE FOI PREMIDO NA CONSOLA (BOT1_HMI) FOI ACIONADO;
 - ETAPA 2 – ETAPA RESPONSÁVEL POR INICIAR O FUNCIONAMENTO DAS VÁLVULAS V1 E V2 QUANDO O SENSOR S1 E O BIT_AUX_1 ESTÃO ATIVOS;

- ETAPA 3 – ETAPA EM QUE O SENSOR S1 DEIXA DE ESTAR ATIVO E O SISTEMA PODE EVOLUIR NOVAMENTE PARA A ETAPA 2 SE O SENSOR S1 FOR NOVAMENTE ATIVADO OU CASO SEJA PREMIDO O STOP EVOLUI PARA A ETAPA SEGUINTE;
- ETAPA 4 - O BIT ASSOCIADO AO BOTÃO QUE FOI PREMIDO NA CONSOLA (BOT2_HMI) FOI ACIONADO;
- ETAPA 5 - ETAPA RESPONSÁVEL POR INICIAR O FUNCIONAMENTO DAS VÁLVULAS V2, V3 E V4 QUANDO O SENSOR S1 ESTÁ ATIVO;
- ETAPA 6 - ETAPA EM QUE O SENSOR S1 DEIXA DE ESTAR ATIVO E O SISTEMA PODE EVOLUIR NOVAMENTE PARA A ETAPA 5 SE O SENSOR S1 FOR NOVAMENTE ATIVADO OU CASO SEJA PREMIDO O STOP EVOLUI PARA A ETAPA SEGUINTE;
- ETAPA 7 - O BIT ASSOCIADO AO BOTÃO QUE FOI PREMIDO NA CONSOLA (BOT3_HMI) FOI ACIONADO;
- ETAPA 8 - ETAPA RESPONSÁVEL POR INICIAR O FUNCIONAMENTO DAS VÁLVULAS V1, V2, V3 E V4 QUANDO O SENSOR S1 ESTÁ ATIVO;
- ETAPA 9 - ETAPA EM QUE O SENSOR S1 DEIXA DE ESTAR ATIVO E O SISTEMA PODE EVOLUIR NOVAMENTE PARA A ETAPA 8 SE O SENSOR S1 FOR NOVAMENTE ATIVADO OU CASO SEJA PREMIDO O STOP EVOLUI PARA A ETAPA SEGUINTE;
- ETAPA 10 - O BIT ASSOCIADO AO BOTÃO QUE FOI PREMIDO NA CONSOLA (BOT4_HMI) FOI ACIONADO;
- ETAPA 11 - ETAPA RESPONSÁVEL POR INICIAR O FUNCIONAMENTO DAS VÁLVULAS V1, V2, V3, V4 E V5 QUANDO O SENSOR S1 ESTÁ ATIVO;
- ETAPA 12 - ETAPA EM QUE O SENSOR S1 DEIXA DE ESTAR ATIVO E O SISTEMA PODE EVOLUIR NOVAMENTE PARA A ETAPA 11 SE O SENSOR S1 FOR NOVAMENTE ATIVADO OU CASO SEJA PREMIDO O STOP EVOLUI PARA A ETAPA SEGUINTE;
- ETAPA 13 – ETAPA EM QUE SE DÁ O FIM DE CICLO DA LIMPEZA PORQUE O BOTÃO STOP FOI ACIONADO NAS ETAPAS ANTERIORES PARA QUE HOUVESSE A EVOLUÇÃO PARA ESTA ETAPA E POSTERIORMENTE A EVOLUÇÃO PARA A ETAPA 0 PARA UM NOVO COMEÇO DE CICLO. NESTA ETAPA ACONTECE O “RESET” DOS BITS QUE FORAM ACIONADOS NAS ETAPAS ANTERIORES, OU SEJA, DEIXAM DE ESTAR ATIVOS;

Posto isto, com este *grafcet* bem definido, é possível proceder à programação *Ladder* para proceder à implementação e testes deste projeto, ou seja, colocar a mesma em funcionamento

4.3.3. TABELAS DE ENTRADAS E SAÍDAS

Para facilitar a compreensão do funcionamento do sistema automatizado, são apresentadas de seguida duas tabelas com as entradas (Tabela 10) e saídas (Tabela 11) utilizadas. Estas tabelas identificam as entradas/saídas, o endereço correspondente e a função correspondente, permitindo uma visão clara da estrutura de hardware e da lógica de programação implementada.

Tabela 10 – Entradas utilizadas, endereço e respetiva descrição da sua função. **Fonte:** elaboração própria.

ENTRADAS	ENDEREÇO	DESCRIÇÃO
BOT1_HMI	W10.00	Inicia o processo para limpar cuvetes com 2 válvulas
BOT2_HMI	W10.01	Inicia o processo para limpar cuvetes com 3 válvulas
BOT3_HMI	W10.02	Inicia o processo para limpar cuvetes com 4 válvulas
BOT4_HMI	W10.03	Inicia o processo para limpar cuvetes com 5 válvulas
STOP	W10.11	Termina o processo de limpeza das cuvetes
SENSOR 1	0.01	Sensor que deteta a passagem de cuvetes
PARAGEM_TAPETE_FRENTE	0.07	Paragem do tapete posterior ao tapete onde se realiza a limpeza
BOT_V1	W10.08	Testagem da válvula V1
BOT_V2	W10.09	Testagem da válvula V2
BOT_V3	W10.10	Testagem da válvula V3
BOT_V4	W10.12	Testagem da válvula V4
BOT_V5	W10.13	Testagem da válvula V5
GRAVAR VALOR	W11.00	Gravar valor que se insere para a temporização das válvulas

Tabela 11 – Saídas utilizadas, endereço e respetiva descrição da sua função. **Fonte:** elaboração própria.

SAÍDAS	ENDEREÇO	DESCRIÇÃO
VALVULA 1	100.00	Válvula 1 ativada
VALVULA 2	100.01	Válvula 2 ativada
VALVULA 3	100.02	Válvula 3 ativada
VALVULA 4	100.03	Válvula 4 ativada
VALVULA 5	100.04	Válvula 5 ativada

4.3.4. PROGRAMAÇÃO NO SOFTWARE CX-PROGRAMMER

O software *CX-Programmer* permite a programação de PLCs através da linguagem de programação *Ladder* de uma forma intuitiva. Para implementação do *grafcet* realizado anteriormente no programa é necessário passar por três etapas que são:

-
1. PROGRAMAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CONDIÇÃO DE TRANSPOSIÇÃO DE TRANSIÇÕES;
 2. PROGRAMAÇÃO DA ATIVAÇÃO E DESATIVAÇÃO DAS ETAPAS;
 3. PROGRAMAÇÃO DAS AÇÕES POR ETAPA.

4.3.4.1. PROGRAMAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CONDIÇÃO DE TRANSPOSIÇÃO DE TRANSIÇÕES

A programação das equações de condição de transposição de transições consiste na implementação, em linguagem *Ladder*, das condições que permitem a passagem entre etapas definidas no diagrama funcional (*Grafcet*). Estas equações representam a lógica que valida se os requisitos de cada transição estão satisfeitos, garantindo que o processo evolui de forma controlada e segura.

Essas condições são compostas por combinações lógicas de entradas físicas/inputs (I:0.01 – sinal do sensor), bits auxiliares internos (W10.xx), e estados das próprias etapas (H0.xx). Também foram incluídos comandos provenientes da HMI, como botões de avanço, paragem e *reset*, permitindo a interação do operador com o processo.

Quando todas as condições de uma transição são verdadeiras, o bit de controlo associado (W0.xx) é ativado, libertando a passagem para a etapa seguinte. Esta abordagem garante que

o avanço no ciclo ocorre apenas quando todos os requisitos definidos estão cumpridos, assegurando a operação segura e sincronizada do sistema.

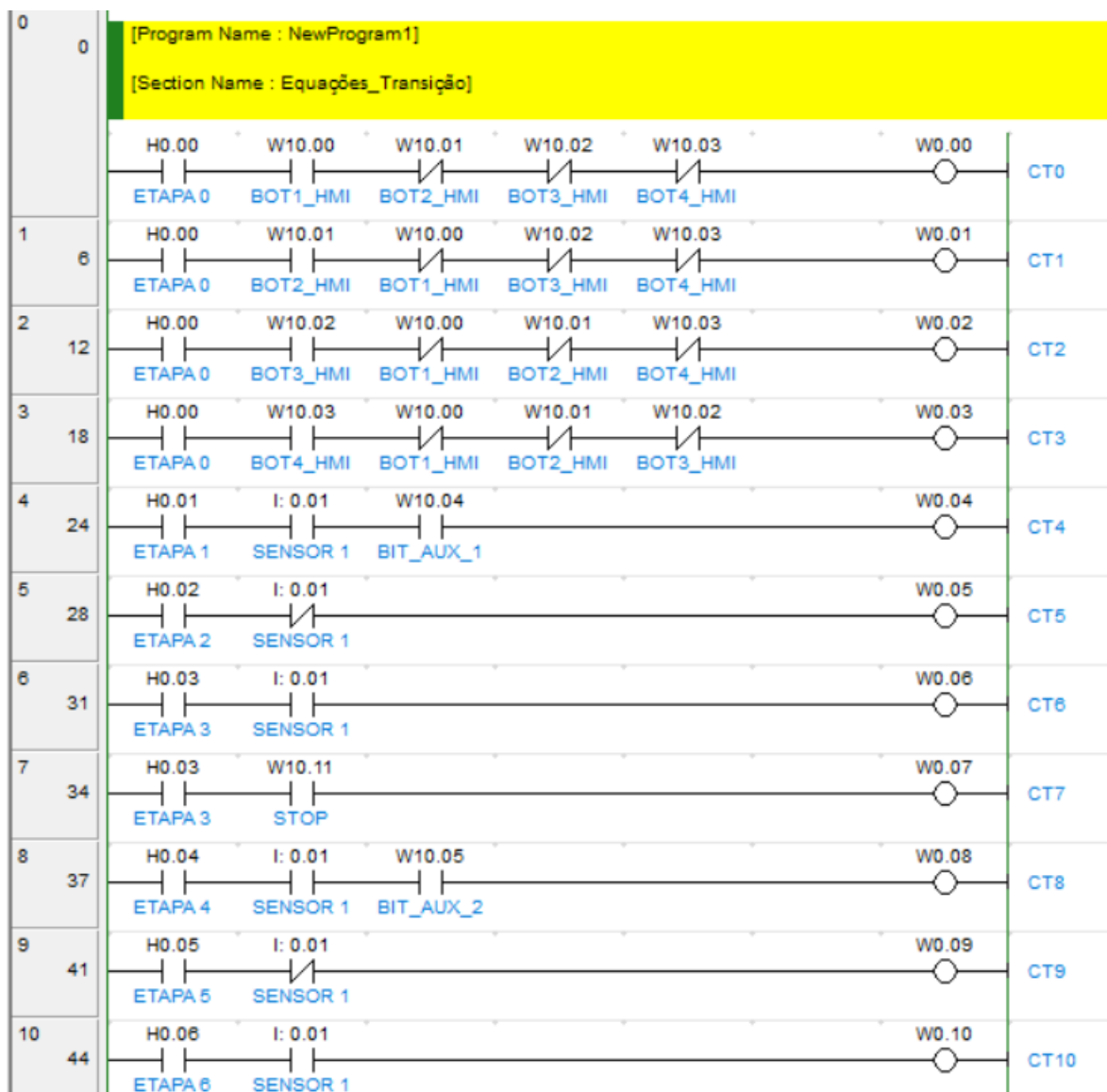


Figura 4.53 – Código das equações de condição de transição de transições

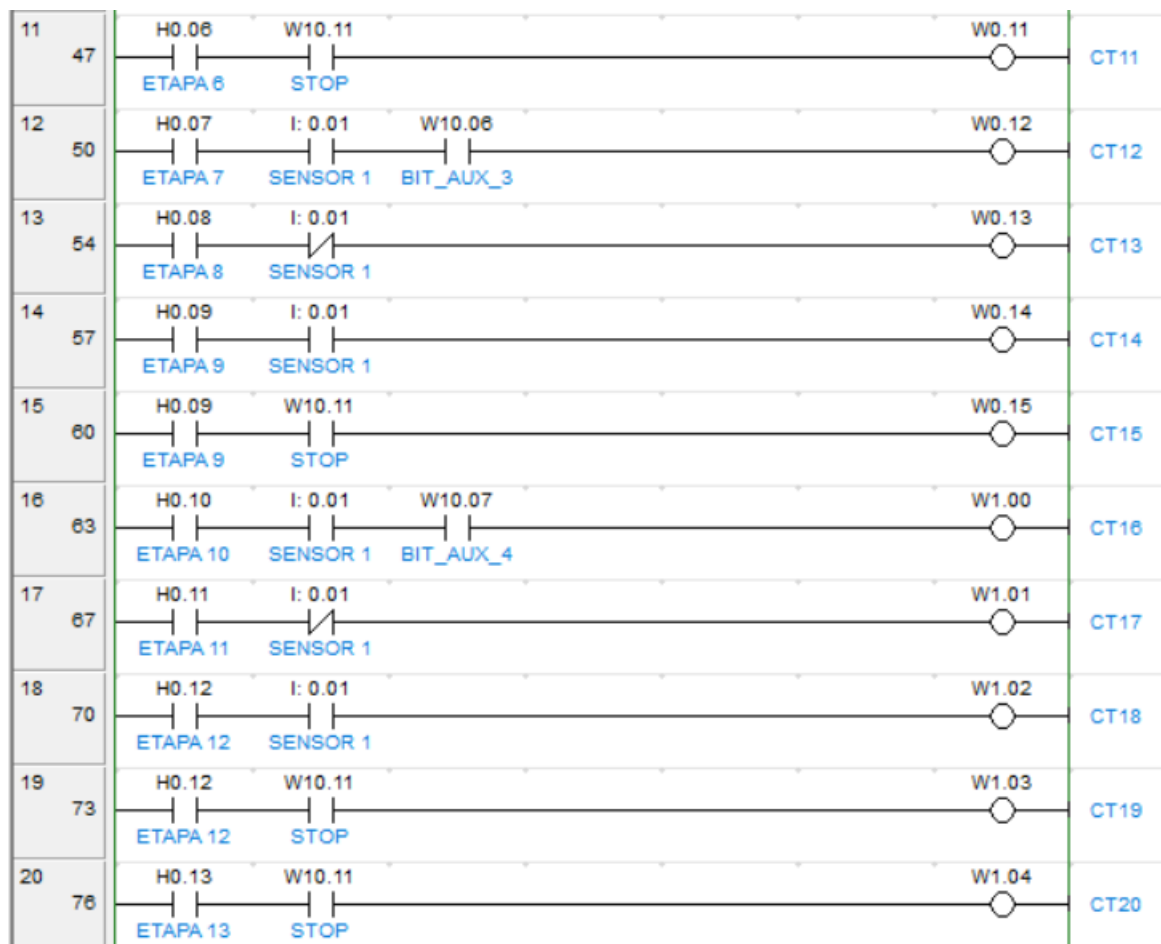


Figura 4.54 - Código das equações de condição de transposição de transições

4.3.4.2. PROGRAMAÇÃO DA ATIVAÇÃO E DESATIVAÇÃO DAS ETAPAS

Nesta secção é implementada a lógica de ativação e desativação das etapas definidas no *grafcet* do sistema.

Cada etapa do processo é representada por um bit auxiliar (H0.xx), que é ativado através da instrução SET quando as condições de transição são satisfeitas, e desativado através da instrução RSET quando ocorre a passagem para a etapa seguinte.

No arranque do PLC, é utilizado o sinal interno *P_First_Cycle*, que fica ativo apenas no primeiro ciclo de execução. Este sinal garante que, logo no início, a ETAPA 0 é ativada automaticamente, assegurando que o sistema começa sempre no estado inicial definido.

A partir daí, há a verificação das condições necessárias para a transição entre etapas, utilizando contactos que representam sinais de sensores, bits internos (W0.xx/W1.xx) e condições de transição (CTx).

Sempre que uma nova etapa é ativada, a etapa anterior é automaticamente desativada, garantindo que apenas uma etapa permanece ativa em cada momento. Esta lógica assegura o funcionamento sequencial do processo, de acordo com a ordem estabelecida no *grafcet*, permitindo um controlo estruturado e seguro da operação.

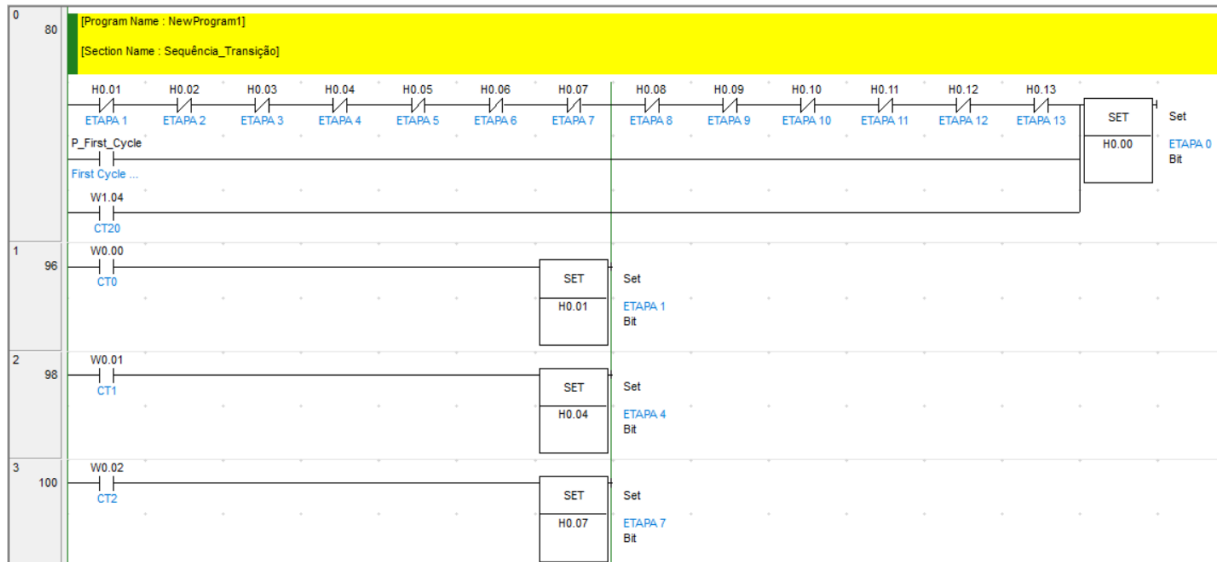


Figura 4.55 – Código da ativação e desativação das etapas

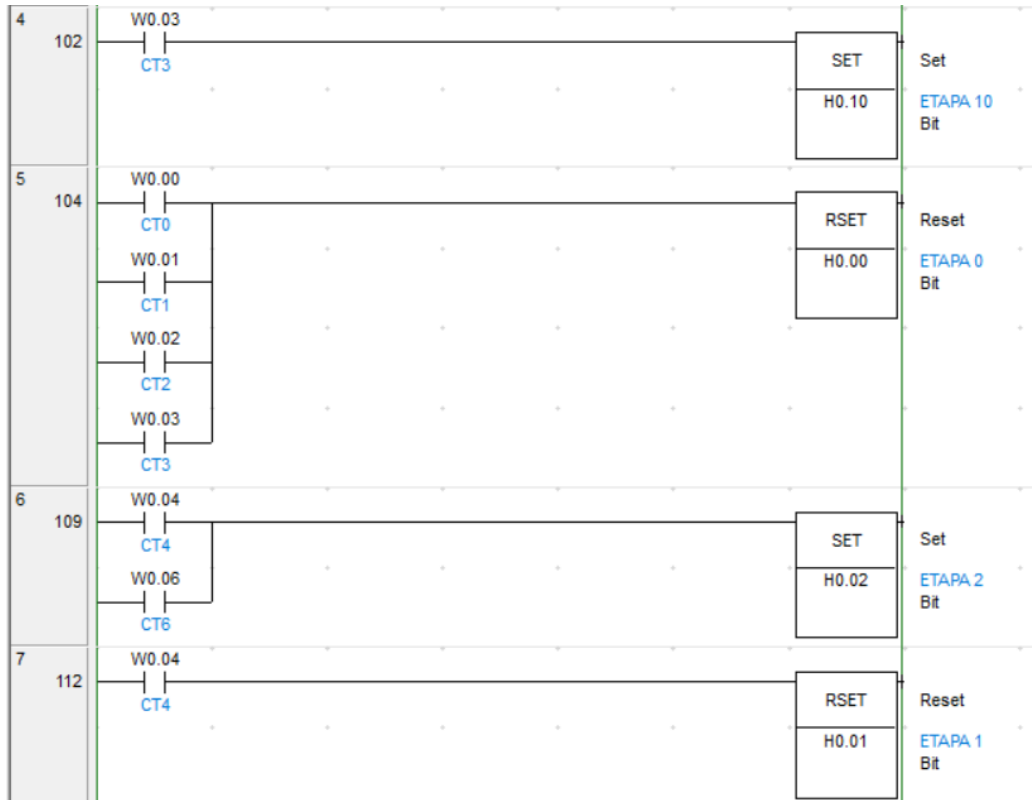


Figura 4.56 - Código da ativação e desativação das etapas

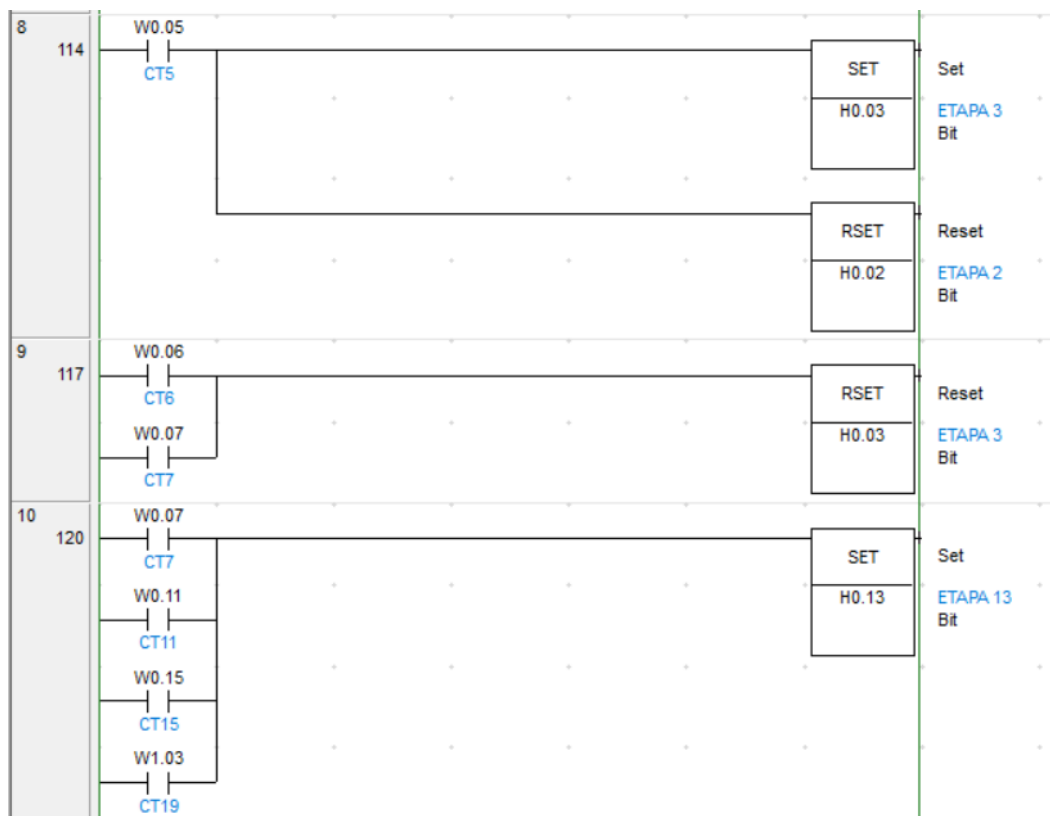


Figura 4.57 - Código da ativação e desativação das etapas

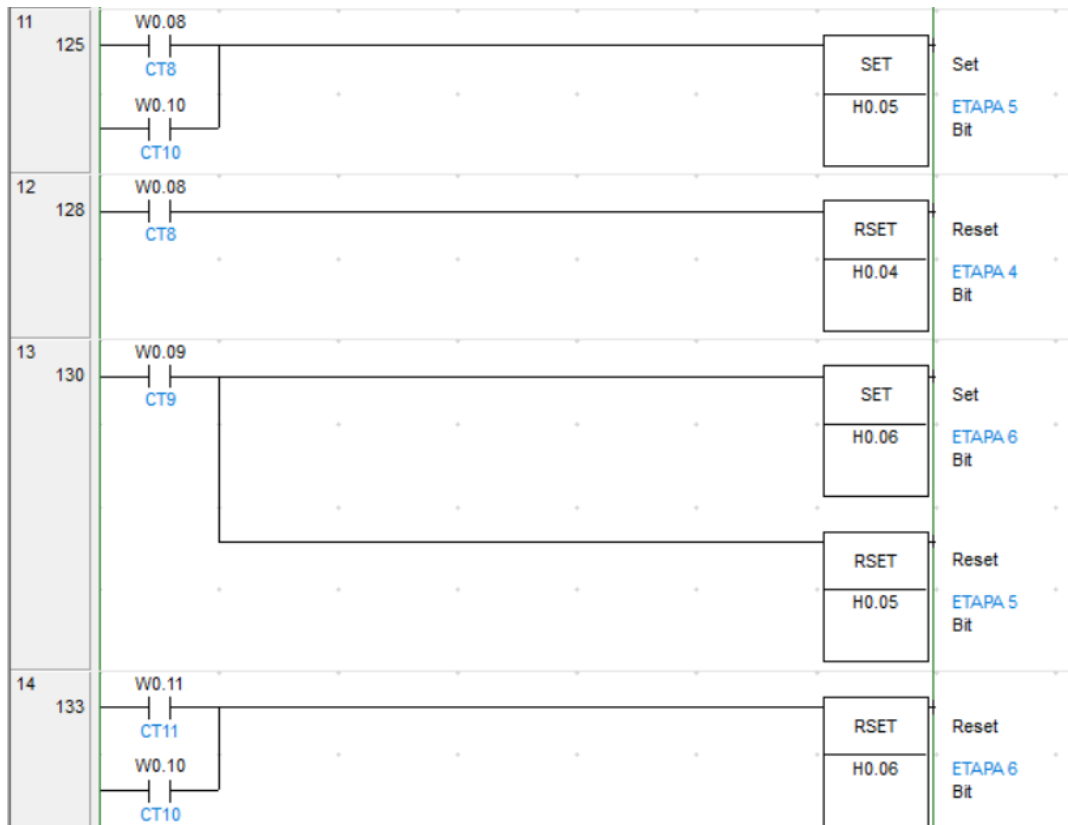


Figura 4.58 - Código da ativação e desativação das etapas

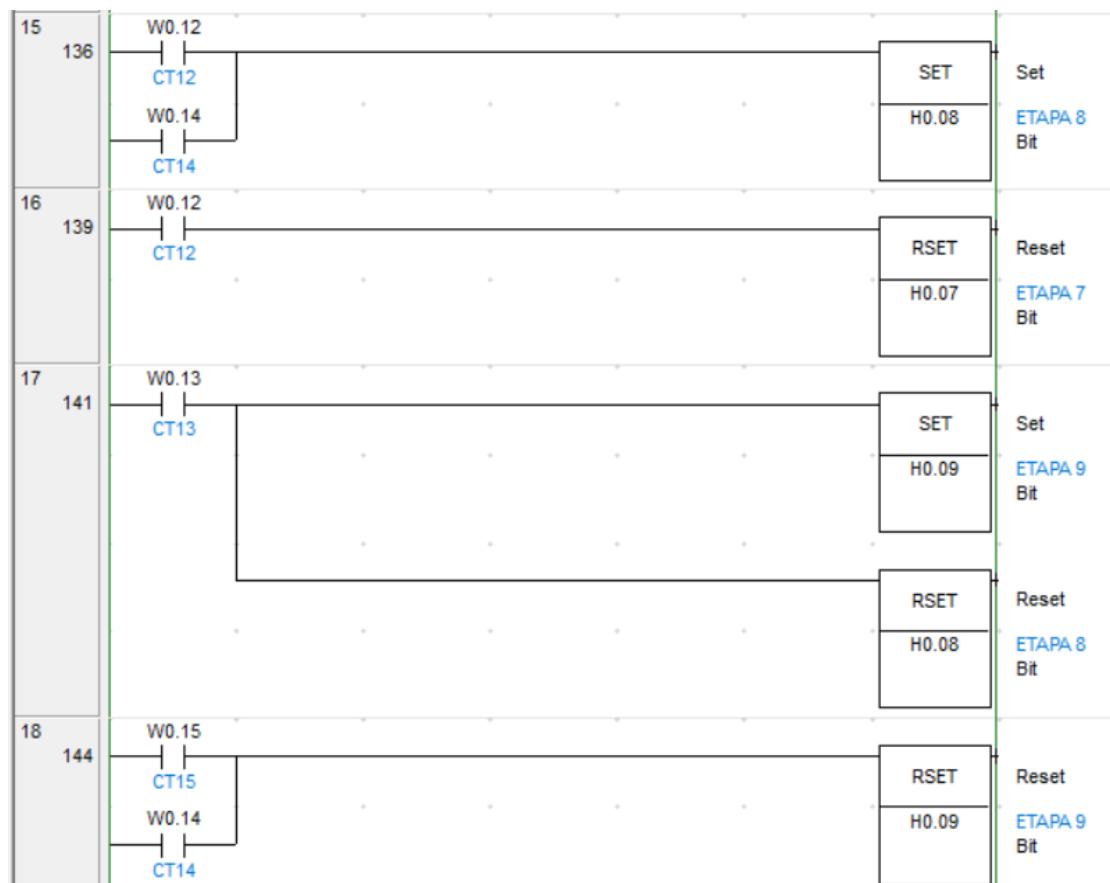


Figura 4.59 - Código da ativação e desativação das etapas

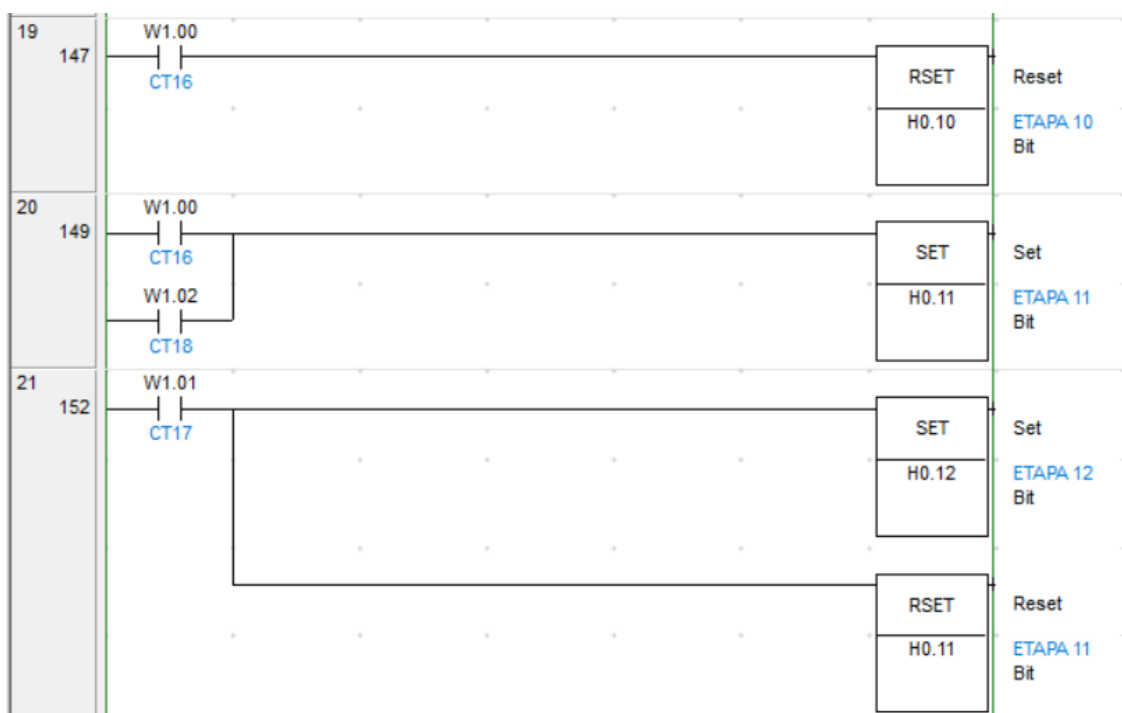


Figura 4.60 - Código da ativação e desativação das etapas



Figura 4.61 - Código da ativação e desativação das etapas

4.3.4.3. PROGRAMAÇÃO DAS AÇÕES POR ETAPA

Este programa em linguagem *Ladder* corresponde à programação das ações associadas a cada etapa do processo definido no *grafcet*.

Cada etapa (H0.xx) funciona como condição de ativação para as saídas e funções do sistema, nomeadamente a abertura de válvulas e a definição de bits auxiliares que controlam a sequência.

Quando uma determinada etapa é ativada, são verificadas condições adicionais, como temporizações (T001), botões de comando (BOT_Vx) ou permissivos (paragem_tapete_frente), antes de acionar a respetiva válvula de impacto (Q:100.xx). O temporizador permite alternar a abertura das válvulas, fazendo com que o sopro de ar saia em intervalos de tempo definidos na HMI. A entrada paragem_tapete_frente interrompe imediatamente o sopro quando o seu sinal é “0”, retomando apenas quando o tapete volta ao movimento. Adicionalmente, os botões BOT_V1 a BOT_V5 permitem abrir ou fechar manualmente as válvulas, mesmo fora do ciclo automático de limpeza.

O SET de bits auxiliares (W10.xx) permite manter a válvula de impacto ou ação ativa até que uma condição de *reset* seja cumprida, garantindo estabilidade no comando.

No final da sequência, a ETAPA 13 executa a função de *reset* geral, desativando todos os bits auxiliares e reiniciando as condições iniciais (inclusive o estado de sensores), de forma a preparar o sistema para um novo ciclo.

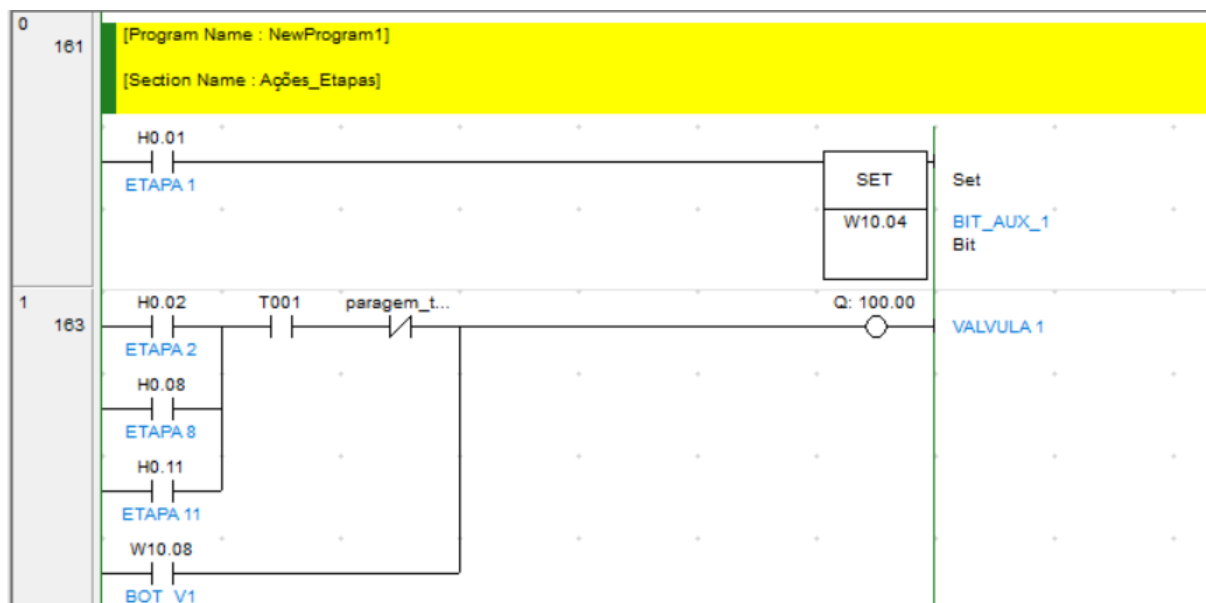


Figura 4.62 – Código da programação das ações associadas a cada etapa

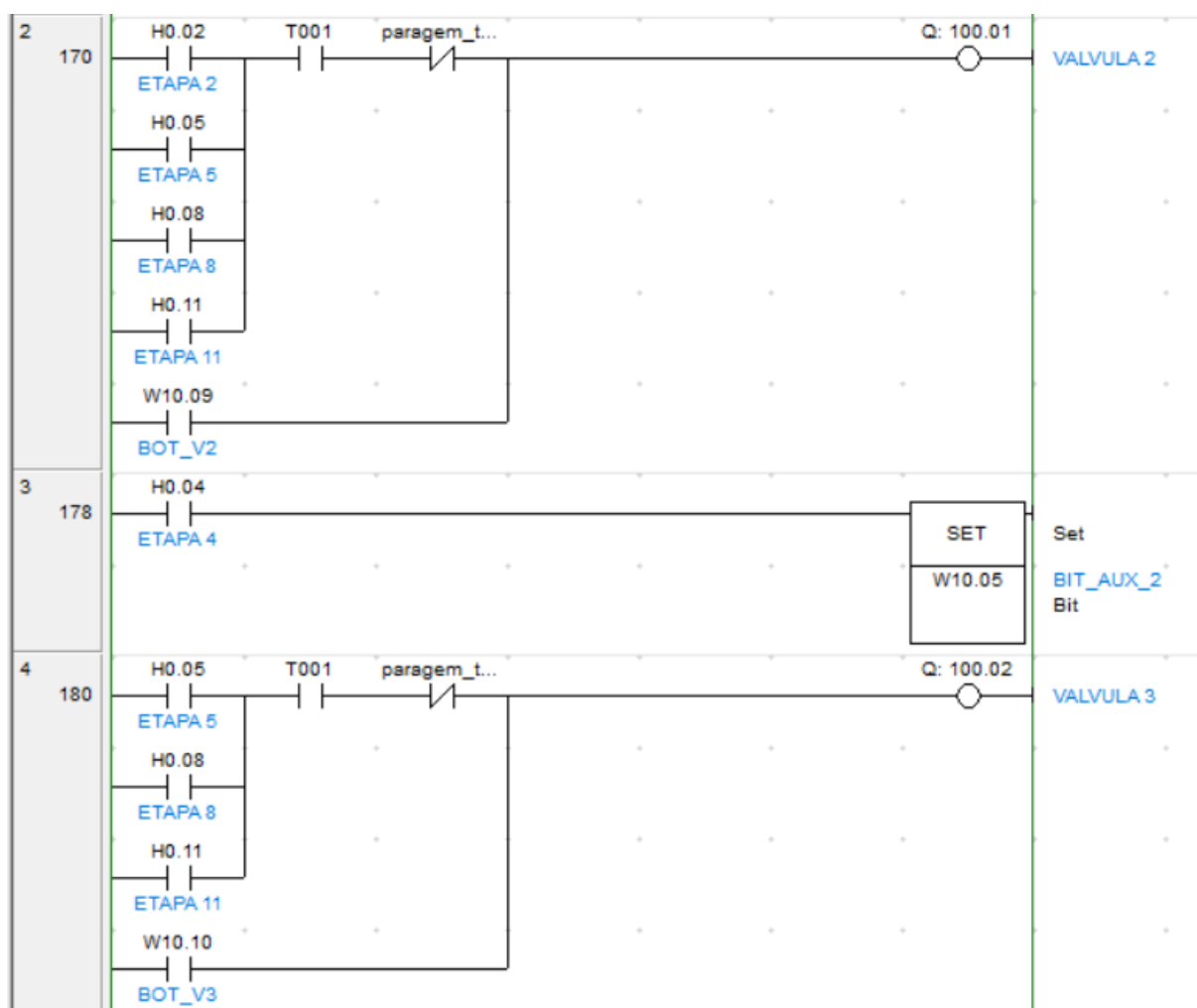


Figura 4.63 - Código da programação das ações associadas a cada etapa

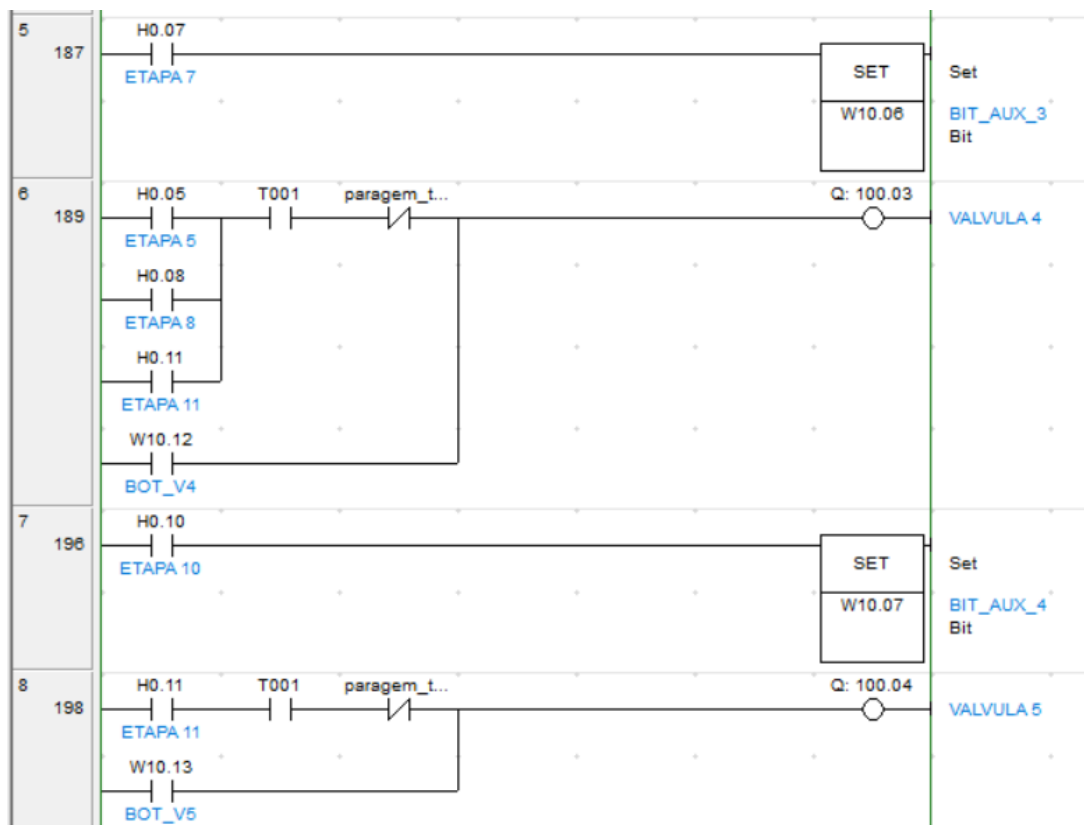


Figura 4.64 - Código da programação das ações associadas a cada etapa

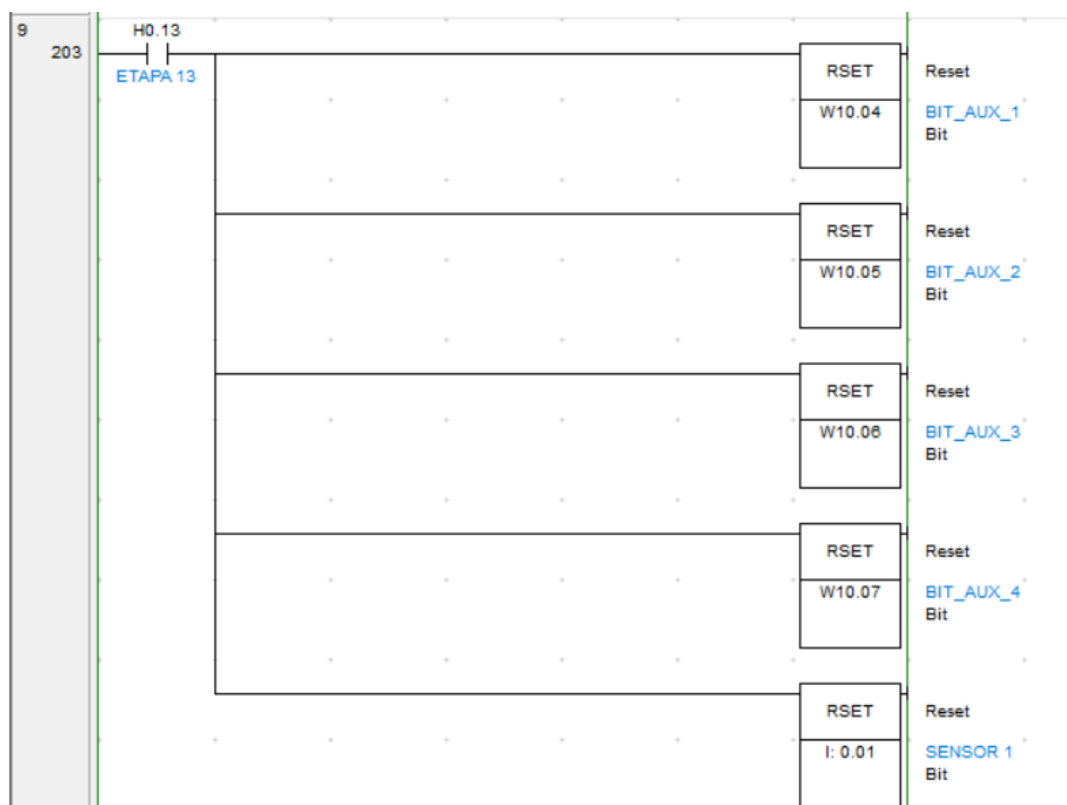


Figura 4.65 - Código da programação das ações associadas a cada etapa

Para além das três etapas anteriormente descritas, foram implementadas mais cinco secções adicionais no código, de forma a dar resposta e concretizar, na prática, os requisitos solicitados pela empresa. Seguem-se explicadas abaixo.

4.3.4.4. “CONTAGEM”

Nesta secção de código, o Sensor 1 é responsável por contar todas as cuvetses que passam na linha de produção. Para a contagem, foi utilizada a instrução DIFU (*Differentiated Up*), que ativa a saída apenas durante um ciclo de scan quando a entrada transita do estado OFF para ON. Esta instrução é particularmente útil para acionar eventos que devem ocorrer apenas uma vez por deteção, como no caso do incremento de um contador.

Adicionalmente, foi implementada uma restrição horária para que a contagem ocorra apenas dentro do período de funcionamento definido, ou seja, entre as 06:00 e as 00:00. Fora deste intervalo, é movido o valor 0 para a área de memória D302 (número de cuvetses), garantindo o *reset* automático da contagem.

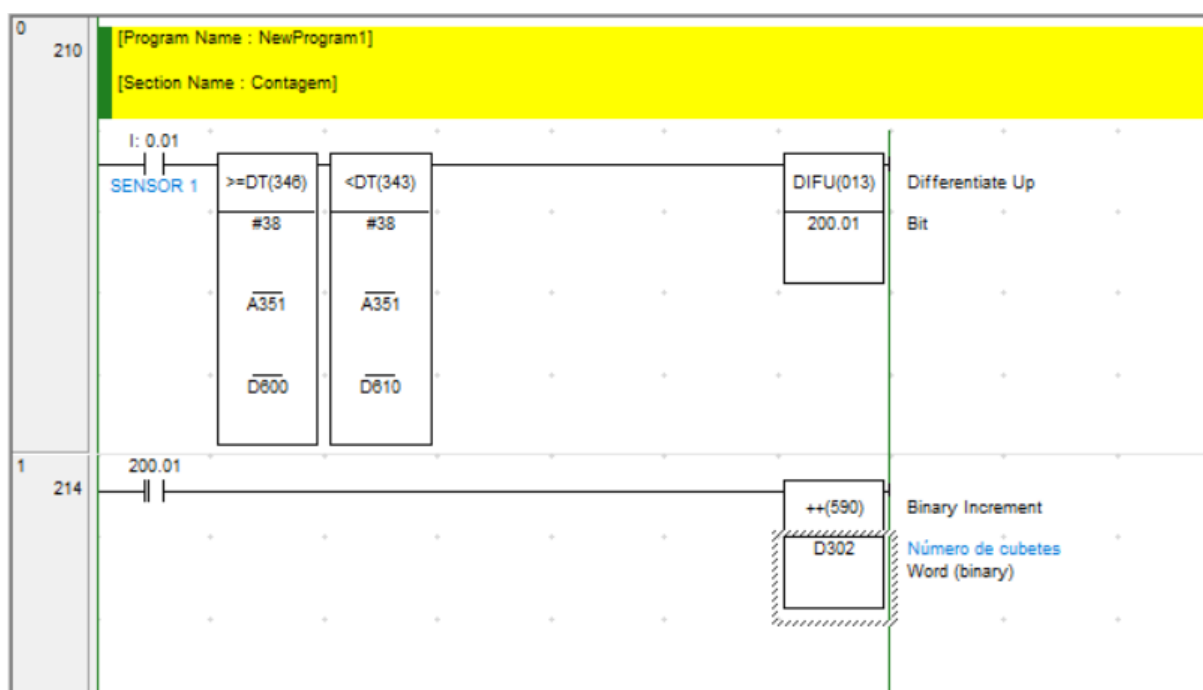


Figura 4.66 - Código da programação da contagem das cuvetses

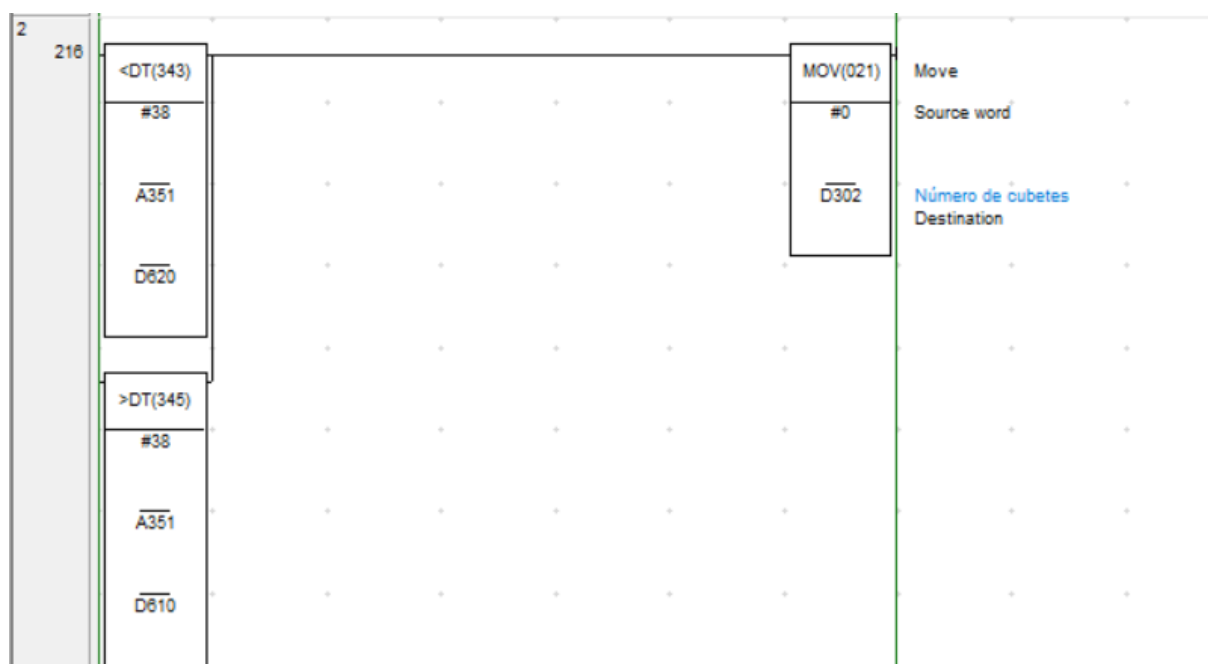


Figura 4.67 - Código da programação da contagem das cuvetes



Figura 4.68 - Código da programação da contagem das cuvetes

4.3.4.5. “TEMPORIZAÇÃO_VÁLVULAS”

Nesta secção de código, são utilizados os temporizadores T000 e T001 para controlar o sopro das válvulas em intervalos definidos pelo valor armazenado na área de memória D100. Este tempo é configurado pelo operador através da consola HMI, sendo necessário clicar no botão “GRAVAR VALOR” para que o valor introduzido seja memorizado em D100 e utilizado pelo sistema no controlo da temporização.

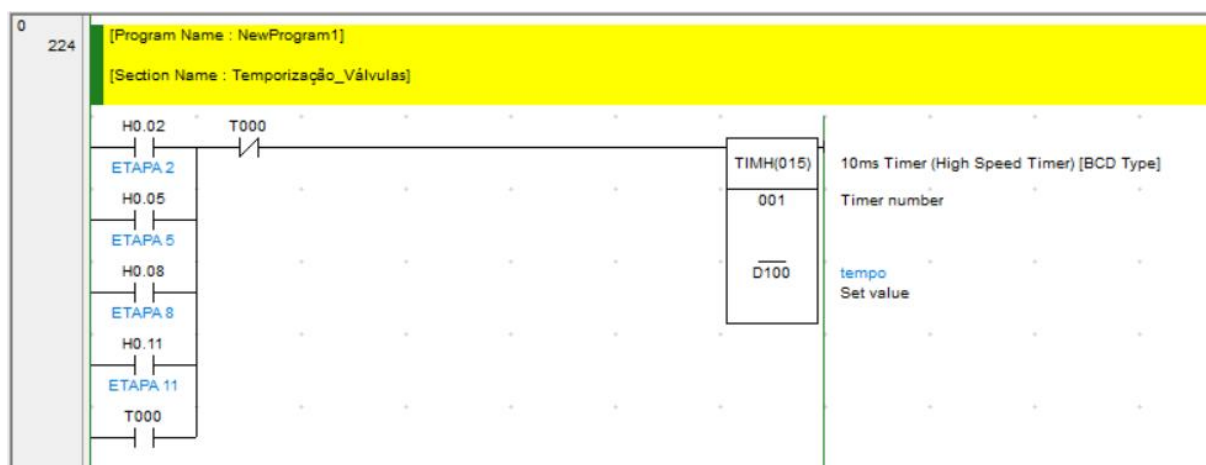


Figura 4.69 - Código da programação da temporização do sopro das válvulas

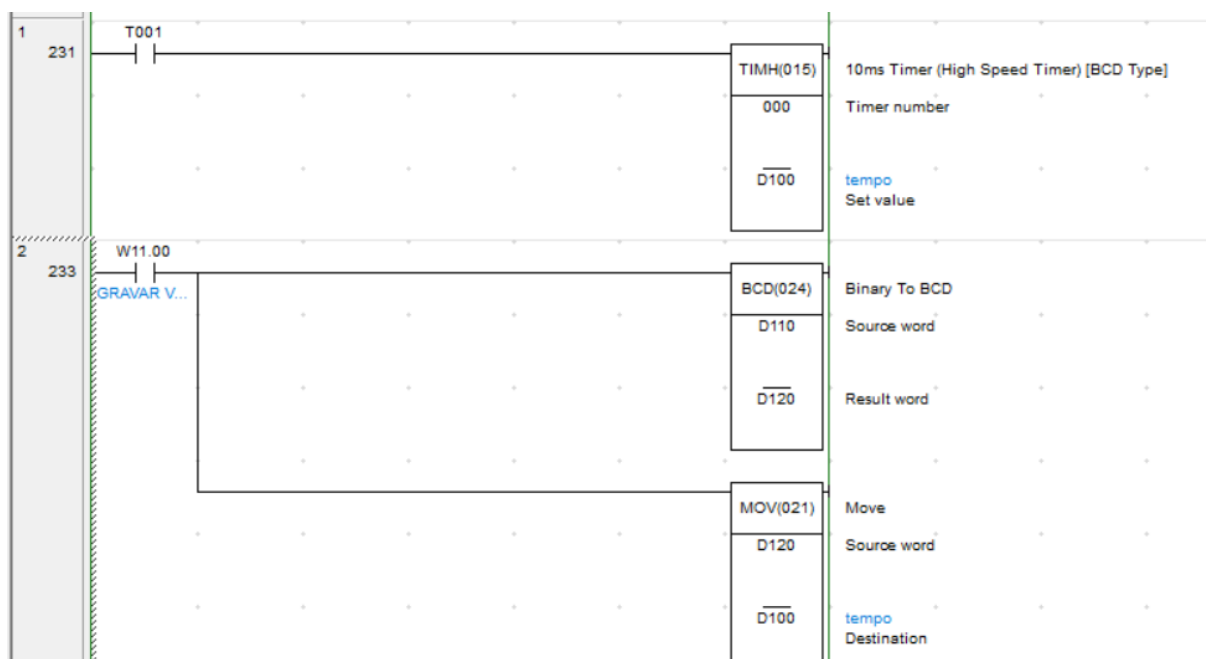


Figura 4.70 - Código da programação da contagem das cuvetes

O controlo da duração e espaçamento dos sopros é realizado com dois temporizadores rápidos TIMH(015), ambos com base de 10 ms e valor de preset definido na área de memória D100.

A razão para o uso de dois temporizadores:

-
- T001 (Nº 001) DEFINE O TEMPO EFETIVO DE SOPRO QUANDO A ETAPA ESTÁ ATIVA;
 - T000 (Nº 000) ATUA COMO JANELA DE BLOQUEIO/RETARDO ENTRE CICLOS, PREVENINDO REATIVAÇÕES IMEDIATAS CASO A ETAPA PERMANEÇA VERDADEIRA OU VOLTE A FICAR VERDADEIRA MUITO RAPIDAMENTE (EFEITO *ANTI-BOUNCING* LÓGICO / *ANTI-RETRIGGER*);
 - EM CONJUNTO, ASSEGURAM PULSO DE SOPRO LIMPO, COM DURAÇÃO ESTÁVEL E ESPAÇAMENTO MÍNIMO ENTRE SOPROS.

O Contacto T000 no *Rung 0* é usado como condição de bloqueio para que o temporizador 001 só volte a disparar depois de cumprir o ciclo anterior. Este tipo de arquitetura evita sopros repetidos no mesmo produto e estabiliza o comportamento quando o sensor/etapa pode oscilar.

O valor de D100 é configurado pelo operador na HMI. Ao premir o botão “GRAVAR VALOR”, o valor introduzido (em binário) é convertido para BCD através da instrução BCD(024) e armazenado em D100 via MOV(021), uma vez que o temporizador TIMH(015) exige valores em BCD.

4.3.4.6. “PARAGEM_TAPETE_FRENTE”

Nesta secção do código, foi criado o bit PARAGEM_TAPETE_FRENTE com o objetivo de interromper o funcionamento das válvulas sempre que o tapete transportador posterior se encontra parado, neste caso o tapete da zona de embalamento.

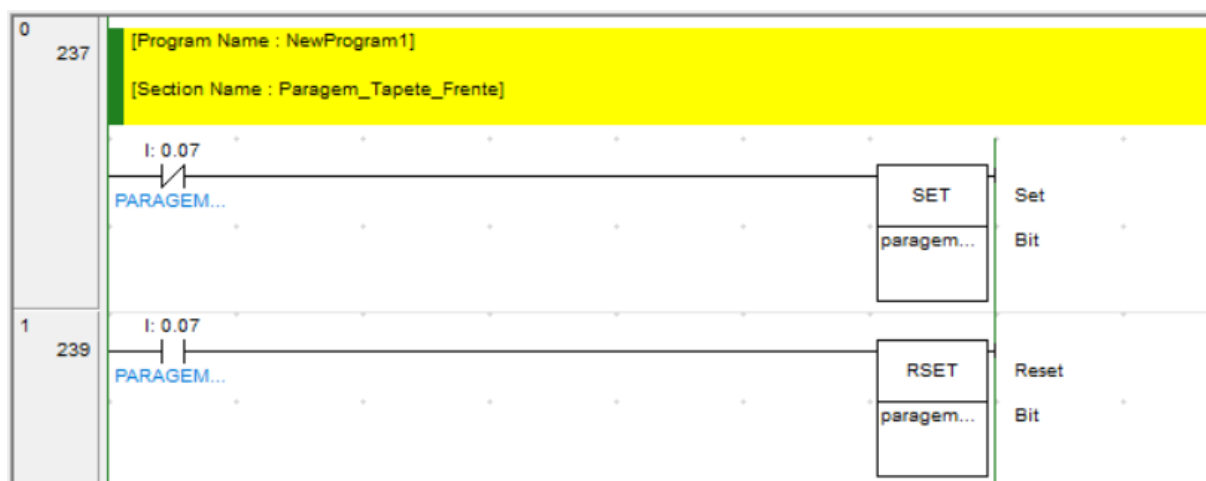


Figura 4.71 - Código da programação da paragem do tapete da zona de embalagem

O comando é controlado pelo contacto I:0.07, que representa o sinal de paragem do tapete. Quando este contacto é acionado, o bit PARAGEM_TAPETE_FRENTE é ativado através da instrução SET, permanecendo memorizado mesmo que a condição inicial deixe de estar presente momentaneamente. Quando o contacto I:0.07 retorna ao estado normal, é executada a instrução RSET para desativar o bit, restabelecendo o funcionamento normal do sistema.

A utilização de SET e RSET em vez de contactos diretos permite:

- GARANTIR QUE A ORDEM DE PARAGEM PERMANECE ATIVA ATÉ QUE HAJA UMA CONDIÇÃO EXPLÍCITA PARA RETOMAR O FUNCIONAMENTO;
- EVITAR FALSOS ARRANQUES CAUSADOS POR OSCILAÇÕES MOMENTÂNEAS DO SINAL;
- ASSEGURAR MAIOR ESTABILIDADE NA LÓGICA DE CONTROLO, ESPECIALMENTE EM SISTEMAS QUE DEPENDEM DE SINCRONIZAÇÃO COM MOVIMENTO MECÂNICO.

Com esta abordagem, mesmo que o sensor de deteção de cuvetes identifique um produto, o ciclo de sopro só é iniciado se o tapete estiver em movimento, prevenindo desperdício de ar comprimido e garantindo uma operação sincronizada.

4.3.4.7. “Caudalimetro_analog”

Nesta secção de código foi realizada a programação da carta analógica, permitindo a leitura dos valores fornecidos pelo caudalímetro instalado na linha (informações detalhadas no

Anexo B). Os parâmetros a monitorizar foram a pressão e caudal instantâneo, obtidos através de sinais analógicos.

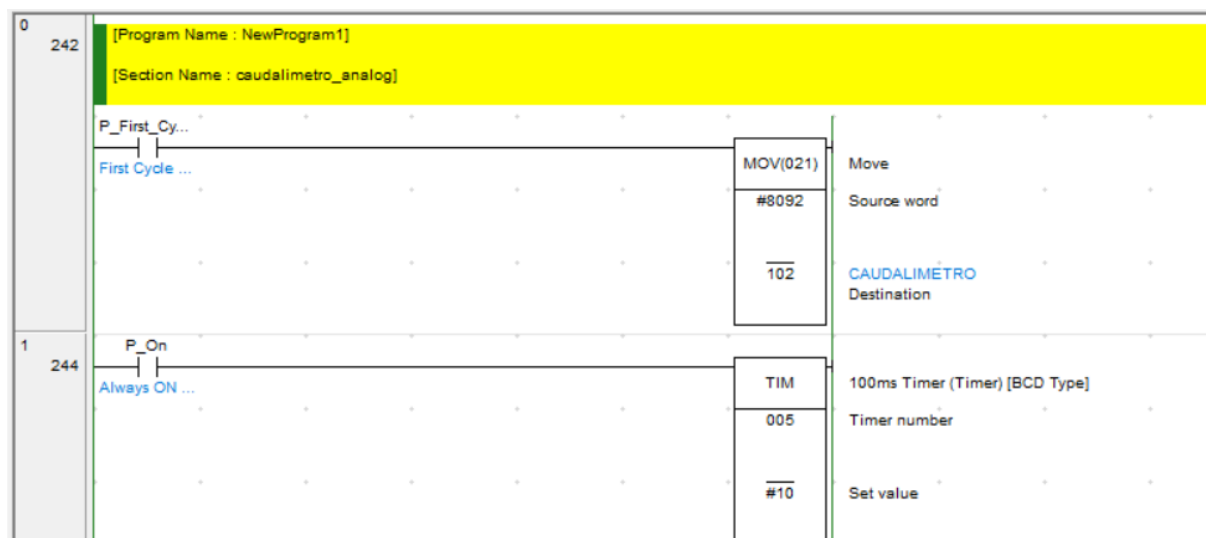


Figura 4.72 – Código da programação da carta analógica

O primeiro passo consistiu no escalonamento (scaling) dos valores analógicos recebidos (valores da pressão e caudal instantâneo), convertendo-os da forma “raw data” para valores em unidades físicas reais, correspondentes à gama de medição do sensor. Esta conversão foi implementada com base nas instruções e tabelas técnicas fornecidas no manual da carta analógica [41].

Os registos de memória D501 a D508 foram configurados para armazenar limites inferior e superior, assim como parâmetros de offset e ganho, garantindo que os valores lidos correspondem com precisão aos dados reais do processo. Desta forma, foi possível obter em tempo real o valor exato do caudal e da pressão, permitindo o seu uso posterior em cálculos e registos no sistema de supervisão.



Figura 4.73 -Código da programação da carta analógica

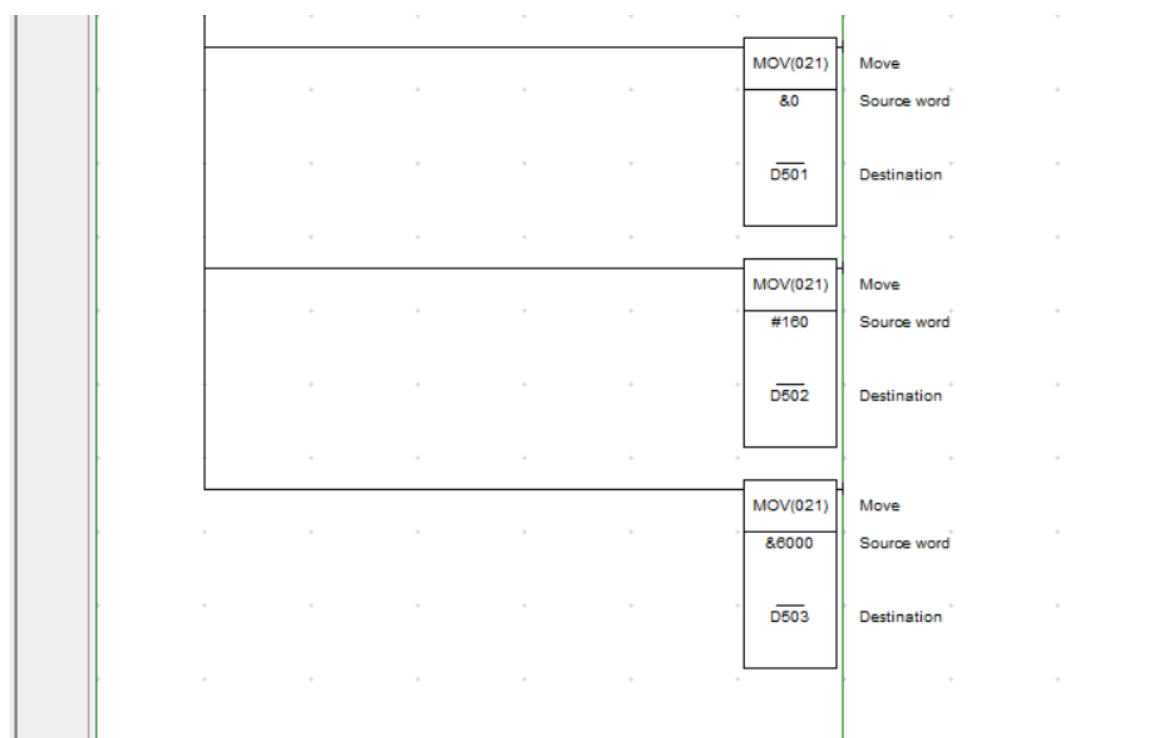


Figura 4.74 - Código da programação da carta analógica



Figura 4.75 - Código da programação da carta analógica

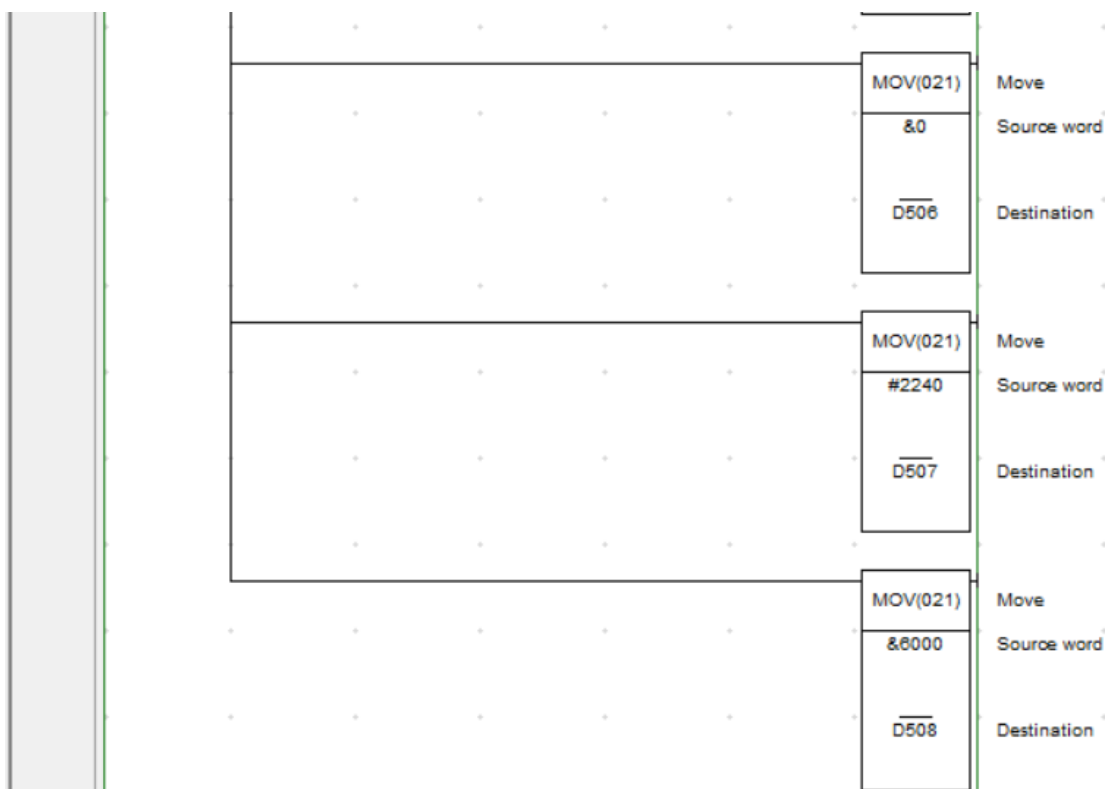


Figura 4.76 - Código da programação da carta analógica

4.3.4.8. “Consumo_TOTAL”

Nesta secção foi desenvolvido um código para calcular o consumo total de ar comprimido, uma vez que o caudalímetro instalado na linha apenas fornece o caudal instantâneo.

O processo inicia-se com a instrução FLT(452), que converte o valor do caudal instantâneo (em m³/h) para formato de número de ponto flutuante, permitindo efetuar operações matemáticas com maior precisão. De seguida, realiza-se a divisão desse valor de caudal instantâneo por um fator de conversão, obtendo-se assim o volume de ar consumido no intervalo de tempo definido. Este valor é acumulado continuamente na área de memória D530, representando o consumo total em m³ ao longo do dia.

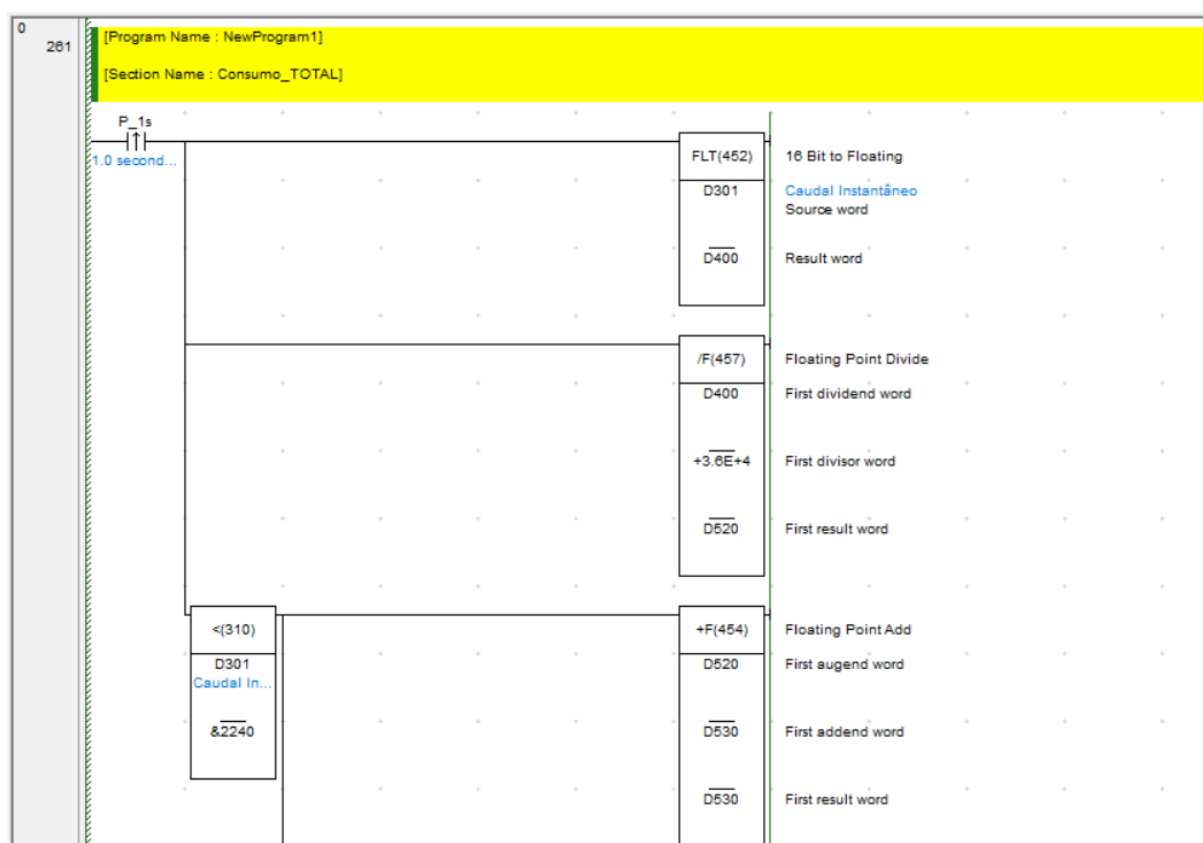


Figura 4.77 – Código da programação para calcular o consumo total de ar comprimido

Posteriormente, utilizou-se a instrução FIX(450) para converter o valor acumulado em ponto flutuante para um valor inteiro, armazenado na área de memória D303, de forma a facilitar a sua leitura e tratamento no sistema.

Foi também implementada uma rotina de reset automático, que zera o valor do consumo total fora do horário de funcionamento (entre as 00h00 e as 06h00), garantindo que o cálculo recomeça no início de cada dia útil.



Figura 4.78 - Código da programação para calcular o consumo total de ar comprimido

4.3.5. ARQUITETURA DE CONTROLO E SINCRONIZAÇÃO

A arquitetura de controlo foi concebida com foco na modularidade e na sincronização precisa entre os sensores de deteção e as válvulas pneumáticas de impacto.

Os principais elementos que compõem esta arquitetura são:

- SENSOR DE DETEÇÃO (E3Z-D61): DETETA A PASSAGEM DA CUVETE E ENVIA UM SINAL DIGITAL AO PLC;
- TEMPORIZADORES CONFIGURÁVEIS VIA HMI: CONTROLAM O TEMPO DE SOPRO E PERMITEM ALTERNAR A ABERTURA DAS VÁLVULAS EM INTERVALOS DEFINIDOS PELO OPERADOR;

- BITS AUXILIARES (H0.xx) E BITS DE TRABALHO (W10.xx): UTILIZADOS PARA MANTER O SISTEMA EM DIFERENTES ETAPAS DO PROCESSO E GARANTIR A ESTABILIDADE DAS AÇÕES ATÉ AO RESET, EVITANDO SOBREPOSIÇÕES DE COMANDOS.
- VALIDAÇÃO DE MOVIMENTO DA LINHA: ATRAVÉS DA ENTRADA “PARAGEM_TAPETE_FRENTE”, O SISTEMA VERIFICA SE O TAPETE ESTÁ EM MOVIMENTO ANTES DE ACIONAR AS VÁLVULAS, PREVENINDO DESPERDÍCIO DE AR COMPRIMIDO.

A sincronização entre o sensor e as válvulas segue a seguinte lógica:

-
1. O SENSOR DETETA A PRESENÇA DA CUVETE E, CASO O TAPETE ESTEJA EM MOVIMENTO E O TAPETE DA ZONA DE EMBALAMENTO ESTEJA ATIVA, INICIA O CICLO DE SOPRO;
 2. A PMS SELECIONADA DEFINE QUAIS AS VÁLVULAS QUE DEVEM SER ACIONADAS;
 3. O TEMPO DE SOPRO É DEFINIDO NA HMI E CONTROLADO PELO TEMPORIZADOR;
 4. O CICLO MANTÉM-SE ATIVO ATÉ QUE O OPERADOR PRESSIONE O BOTÃO “TERMINAR PROCESSO”, QUE ESTÁ ASSOCIADO À FUNÇÃO DE STOP NO LADDER E EXECUTA A PARAGEM SEGURA DE TODAS AS AÇÕES;
 5. QUANDO O CICLO É TERMINADO, A ETAPA 13 EXECUTA O RESET GERAL, RETORNANDO O SISTEMA À ETAPA 0, FICANDO PRONTO PARA A PRÓXIMA DETECÇÃO.

Adicionalmente, a programação foi estruturada para permitir ajustes manuais de parâmetros (como o tempo de sopro) e para impedir o funcionamento em caso de paragem da linha, aumentando a eficiência e a segurança do processo. Os botões “BOT_V1” a “BOT_V5” permitem ainda o acionamento manual das válvulas, mesmo fora do ciclo automático, proporcionando maior flexibilidade operacional.

5. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Neste capítulo é apresentada a implementação prática do projeto descrito anteriormente, incluindo a montagem do equipamento no local da fábrica e a instalação dos componentes eletrônicos. Seguidamente, são apresentadas várias figuras que ilustram a aplicação real do sistema e a sua integração no processo produtivo. Inicialmente, o equipamento assumia a configuração mostrada na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Configuração inicial do equipamento

Posteriormente, optou-se por associar este conjunto de válvulas a um reservatório de ar comprimido, representado na Figura 5.2. Este reservatório tem como função garantir um

fornecimento estável de ar durante o processo de limpeza, evitando quedas de pressão e assegurando a eficiência e uniformidade do sopro ao longo do ciclo de operação.



Figura 5.2 – Configuração final do equipamento com o reservatório de ar implementado

A Figura 5.3 e Figura 5.4 assumem a forma final do equipamento que foi desenvolvido na área da manutenção e posteriormente automatizado.



Figura 5.3 - Forma final do equipamento



Figura 5.4 - Forma final do equipamento

Na Figura 5.5 é possível ver a alimentação de ar comprimido para o pequeno reservatório e a alimentação elétrica das válvulas de impacto.



Figura 5.5 -Tubo de alimentação de ar comprimido para o reservatório de ar e cabos de alimentação elétrica

Na Figura 5.6 é possível ver a parte lateral do equipamento com a possibilidade de ajuste de altura.



Figura 5.6 - Vista lateral do equipamento

Na Figura 5.7 e Figura 5.8 está representada a colocação do sensor que reconhece a presença de cuvetes na linha.



Figura 5.7 – Vista de trás do sensor



Figura 5.8 -Vista lateral da posição do sensor e suporte para o mesmo

Na Figura 5.9 encontra-se o caudalímetro instalado na linha.



Figura 5.9 - Caudalímetro instalado na linha

Na Figura 5.10 está representado o controlador de pressão manual que foi instalado na rede para conseguir regular a pressão de ar comprimido.



Figura 5.10 – Controlador de pressão manual instalado na rede

Na Figura 5.11 encontram-se a consola HMI e o botão de emergência.



Figura 5.11 – Consola HMI e botão de emergência instalados

Na Figura 5.12 está representado o interruptor de corte geral do sistema.



Figura 5.12 - Interruptor de corte geral do sistema instalado

Na Figura 5.13 mostra-se o quadro elétrico em processos de montagem.



Figura 5.13 - Processo de montagem do quadro elétrico

Quadro elétrico

O quadro elétrico deste equipamento é formado por vários componentes como se vê na Figura 5.14 e Figura 5.15 e encontram-se legendados na Tabela 12.

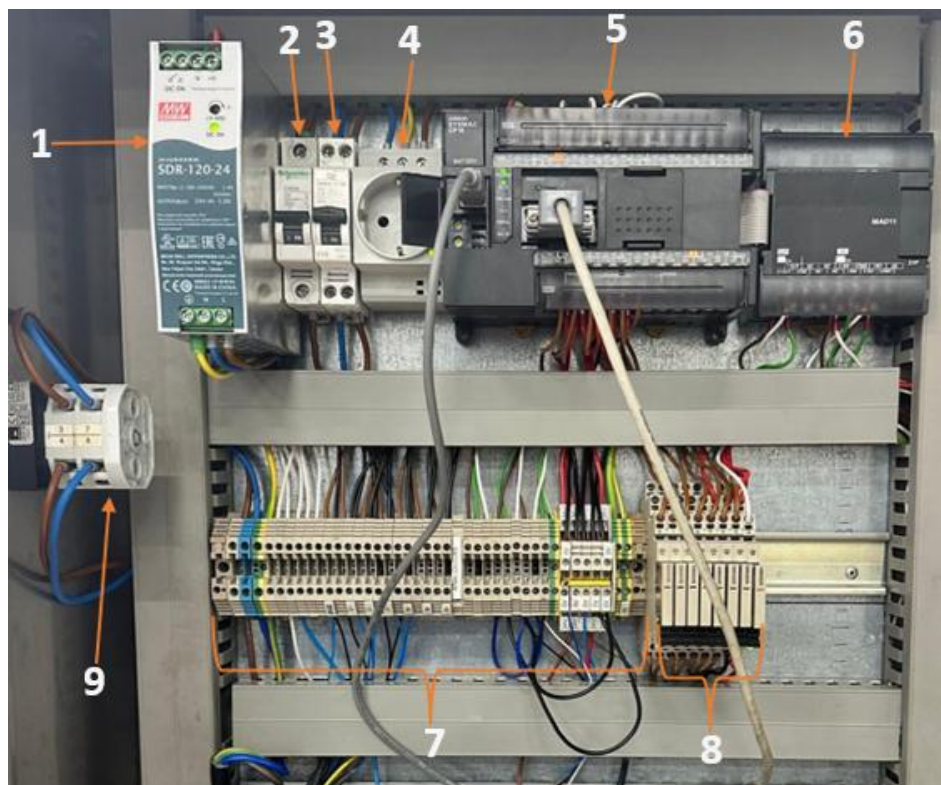


Figura 5.14 - Quadro elétrico completo com numeração dos componentes



Figura 5.15 - Quadro elétrico com numeração dos componentes

Tabela 12 – Identificação dos componentes do quadro elétrico. **Fonte:** elaboração própria.

Nº do componente	Descrição
1	Fonte de alimentação 220 Vac – 24 Vdc
2	Disjuntor proteção à fonte
3	Disjuntor tomada monofásica
4	Tomada monofásica
5	PLC OMRON CP1E-N40
6	Carta analógica OMRON CP1W-MAD11
7	Bornes de alimentação
8	Relés 24Vdc
9	Interruptor corte geral de energia
10	Consola HMI OMRON NB7W-TW01B
11	Interruptor de emergência

5.1. TESTES E VALIDAÇÃO

A fase de testes e validação assume um papel essencial no desenvolvimento de sistemas automatizados, permitindo verificar o correto funcionamento dos componentes implementados, validar a lógica de controlo programada e aferir o desempenho global da solução desenvolvida. Assim, serão apresentados os ensaios realizados ao longo do processo, desde os primeiros testes de bancada até à validação final do sistema em ambiente industrial.

Os testes incidiram sobre vários aspetos fundamentais, como a resposta dos sensores, a atuação das válvulas pneumáticas de impacto, o controlo sequencial via PLC, a interface com a HMI e o desempenho do sistema em condições reais de operação. Serão ainda analisados parâmetros como o consumo de ar comprimido por cuvette e total e a fiabilidade do processo automatizado, com o objetivo de garantir que a solução proposta cumpre os requisitos funcionais e ergonómicos definidos inicialmente.

5.1.1. PRIMEIROS TESTES

Nestes primeiros testes, começou-se por verificar se as válvulas de impacto reagiam corretamente à passagem das cuvetes, ou seja, ao sinal do sensor, avaliando se o acionamento

ocorria de forma antecipada ou tardia. Constatou-se que, logo após a deteção da cuvette, as válvulas eram acionadas de imediato e desligavam-se assim que esta deixava a zona de sopro, evitando desperdício de ar comprimido

No entanto, observou-se que, durante o sopro, a elevada pressão da rede de ar comprimido provocava, na maioria dos casos, a projeção do conteúdo das cuvetes para fora. Para corrigir esta situação, foi instalado na rede um regulador de pressão de ar comprimido, modelo SMC AR50-F06-B (Figura 5.16), permitindo ajustar a pressão a um valor mais adequado ao processo. Informações técnicas detalhadas sobre este componente encontram-se no Anexo C: Regulador de Pressão SMC AR50-F06-B.

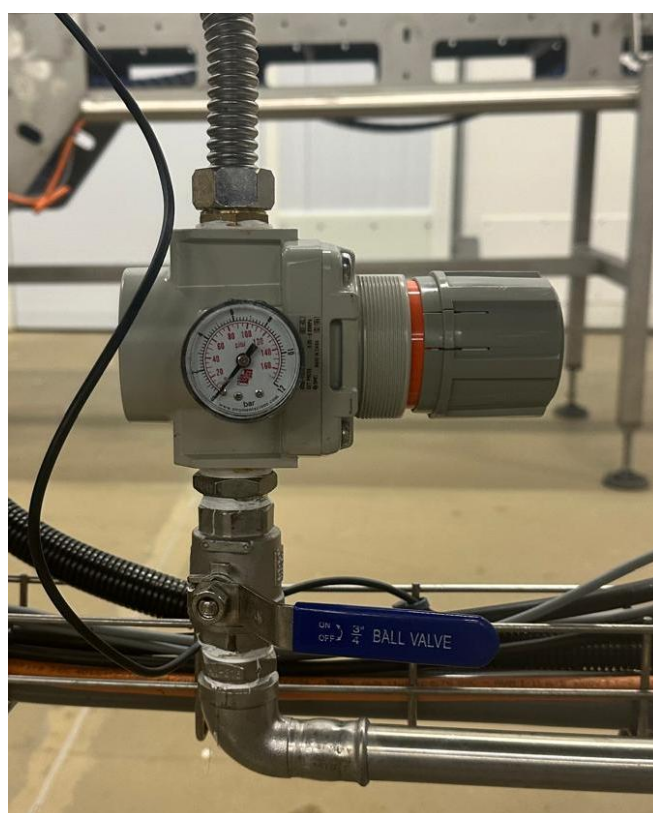


Figura 5.16 – Regulador de pressão manual inserido na rede da linha

No Anexo F: Material Suplementar e Recursos Multimédia, em F.1., o vídeo com o código QR2 demonstra a reação do sensor e a resposta das válvulas de impacto e também é possível ter uma noção do congelado a saltar, mas não na totalidade.

Após a análise de diversas cuvetes, constatou-se que a remoção do gelo era parcial, ocorrendo apenas em zonas específicas do produto congelado, como se vê na Figura 5.17.



Figura 5.17 - Cuvete com limpeza não uniformizada

Com a pressão da rede já regulada e a altura das válvulas ajustada, procedeu-se à afinação dos temporizadores responsáveis pelos tempos de sopro das válvulas. Dado que estas são válvulas de impacto, capazes de libertar rajadas de ar de elevada intensidade, testou-se a utilização de tempos de acionamento mais curtos e a emissão de um maior número de rajadas dentro do mesmo intervalo de operação. O objetivo desta alteração foi aumentar a intensidade da limpeza potenciando a remoção do gelo acumulado.

5.2. ENSAIO CONTROLADO E PRODUTIVIDADE DO TURNO

5.2.1. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS E METODOLOGIA

Com o objetivo de comparar de forma rigorosa o desempenho entre o método manual tradicional e o sistema de limpeza automatizado desenvolvido, foram realizados dois níveis de ensaio:

-
- ENSAIO CONTROLADO → 15 CUVETES LIMPAS POR CADA MÉTODO, EM CONDIÇÕES IDÊNTICAS, PERMITINDO UMA COMPARAÇÃO DIRETA ENTRE AMBOS;
 - PRODUTIVIDADE REAL DO TURNO → AVALIAÇÃO DO SISTEMA EM FUNCIONAMENTO CONTÍNUO, COM REGISTO DO NÚMERO TOTAL DE CUVETES PROCESSADAS E DO CONSUMO AGREGADO DE AR COMPRIMIDO.

Em ambos os ensaios foram garantidas as condições experimentais equivalentes:

- O MESMO OPERADOR EXECUTOU AS OPERAÇÕES DE LIMPEZA NOS DOIS MÉTODOS, REDUZINDO A VARIABILIDADE HUMANA;
- A PRESSÃO DE REDE MANTEVE-SE CONSTANTE EM 7 BAR, REGULADA ATRAVÉS DO CONJUNTO SMC AR50-F06-B;
- O TIPO DE CUVETE E O PRODUTO CONGELADO (POLVO) FORAM IDÊNTICOS EM AMBOS OS CASOS;
- O TEMPO MÉDIO DE CICLO POR CUVETE SITUOU-SE ENTRE 5 E 7 SEGUNDOS;
- AS CONDIÇÕES AMBIENTAIS (TEMPERATURA E QUANTIDADE DE GELO INICIAL) MANTIVERAM-SE SEMELHANTES.

Durante os ensaios, ocorreram paragens ocasionais do tapete de embalagem a jusante, o que levou à interrupção temporária do transporte de cuvetes na zona de limpeza. Esses períodos de inatividade foram excluídos da análise, garantindo que os resultados refletem apenas os períodos efetivos de funcionamento dos sistemas de limpeza.

5.2.2. ENSAIO CONTROLADO (N = 15 CUVETES POR MÉTODO)

O ensaio controlado foi realizado com 15 cuvetes em cada método, sob as mesmas condições de operação, de forma a permitir uma comparação direta do consumo de ar comprimido e da eficácia de limpeza.

Na Figura 5.18 encontra-se a cuvete antes da limpeza manual.



Figura 5.18 – Cuvete de teste antes da limpeza manual

O resultado da limpeza manual da cuvete anterior encontra-se na Figura 5.19.



Figura 5.19 - Cuvete de teste depois da limpeza manual

No Anexo F: Material Suplementar e Recursos Multimédia, em F.1., o vídeo com o código QR1 demonstra a limpeza manual.

Na Figura 5.20 encontra-se a cuvete antes da limpeza automatizada.



Figura 5.20 - Cuvete de teste antes da limpeza automatizada

Na Figura 5.21 encontra-se a cuvete depois da limpeza.



Figura 5.21 - Cuvete de teste depois da limpeza automatizada

No Anexo F: Material Suplementar e Recursos Multimédia, em F.1., o vídeo com o código QR2 demonstra a limpeza automatizada.

A Tabela 13 apresenta os valores médios de consumo de ar e tempo de ciclo, bem como os respetivos desvios-padrão e intervalos de confiança a 95 %.

Tabela 13 - Resultados experimentais do ensaio controlado. **Fonte:** elaboração própria.

Método de Limpeza	n	Consumo médio (m ³ /cuvete)	DP	IC95%	Tempo médio	DP	IC95%
Manual	15	0,30	0,0086	±0,0048	6,15	0,58	±0,32
Automatizado	15	0,23	0,0070	±0,0039	5,51	0,58	±0,17
Δ (%)	-	- 23 %	-	-	-10 %		

Notas:

- IC95% = INTERVALO DE CONFIANÇA PARA N=15, $\alpha=0,05$.

No Anexo F em F.1. Lista de ficheiros e vídeos, com o código QR4, há a possibilidade de aceder ao ficheiro Excel com todos os cálculos estatísticos e valores do ensaio experimental controlado.

O sistema automatizado apresentou um consumo médio de $0,23 \pm 0,0039 \text{ m}^3/\text{cuvete}$, enquanto o método manual registou $0,30 \pm 0,0048 \text{ m}^3/\text{cuvete}$, correspondendo a uma redução de cerca de 23 % no consumo específico. O teste t de *Student* (bicaudal, variâncias não assumidas iguais) revelou uma diferença estatisticamente significativa ($p = 3,82 \times 10^{-21}$), confirmando o ganho energético obtido pela automação.

No que respeita ao tempo de ciclo, o método automatizado apresentou $5,51 \pm 0,17 \text{ s}$, face a $6,15 \pm 0,32 \text{ s}$ no processo manual, o que representa uma redução média de 10 %. O teste t resultou em $p = 8,63 \times 10^{-4}$, indicando uma diferença estatisticamente significativa.

A Figura 5.22 e a Figura 5.23 apresentam os gráficos comparativos de consumo específico e tempo por cuvette.

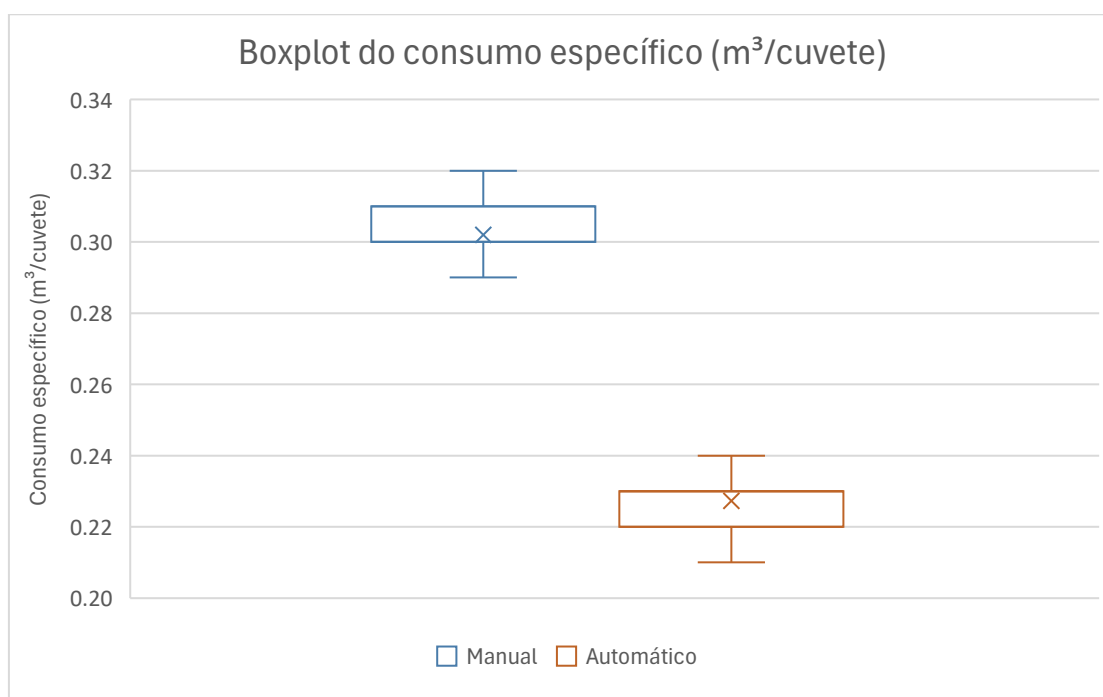


Figura 5.22 - Consumo Específico de Ar (m^3/cuvete). **Fonte:** elaboração própria.

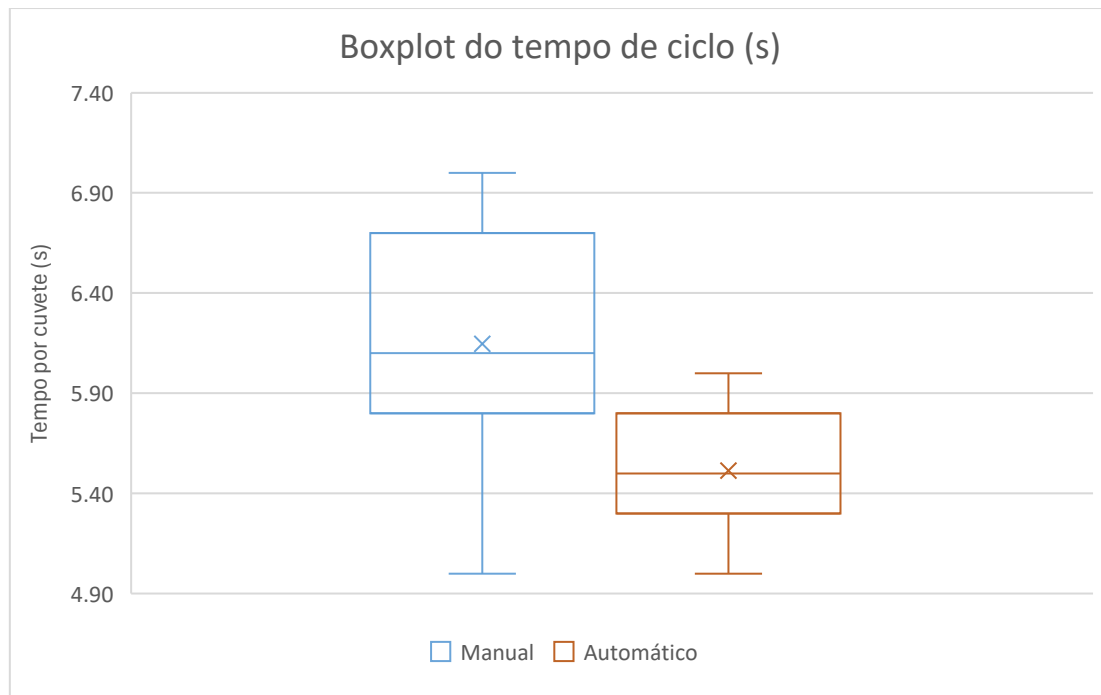


Figura 5.23 - Tempo por Cuvete (s). **Fonte:** elaboração própria.

A Figura 5.22 e a Figura 5.23 evidenciam graficamente as diferenças observadas:

- O BOXPLOT DO CONSUMO MOSTRA MENOR DISPERSÃO E VALORES MEDIANOS MAIS BAIXOS PARA O MÉTODO AUTOMATIZADO, DEMONSTRANDO MAIOR CONSISTÊNCIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA;
- O BOXPLOT DO TEMPO DE CICLO MOSTRA UMA **REDUÇÃO DA MEDIANA** NO MÉTODO AUTOMATIZADO, EMBORA COM **SOBREPOSIÇÃO PARCIAL DOS INTERVALOS INTERQUARTIS**, O QUE É **COERENTE COM O P-VALOR OBTIDO ($p = 8,63 \times 10^{-4}$)** E INDICA UMA **DIFERENÇA ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVA** AINDA QUE DE MAGNITUDE MODERADA.

Em síntese, o sistema automatizado alcança melhor desempenho energético, menor variabilidade e tempos de ciclo equivalentes ou inferiores, validando a eficácia e robustez da automação no processo de limpeza de cuvetes.

5.2.3. PRODUTIVIDADE REAL NO TURNO

Após a validação do ensaio controlado, realizou-se a análise da produtividade real em contexto industrial, com base nos registos de consumo e de número de cuvetes limpas durante um turno completo, que estão presentes no ficheiro Excel no Anexo F, em F.1. Lista de ficheiros e vídeos, com o código QR3.

Tabela 14 – Valores do desempenho entre os métodos de limpeza. **Fonte:** elaboração própria.

Método de limpeza	Cuvetes limpas	Tempo de operação (min)	Consumo total (m³)	Consumo médio (m³/cuvete)	Observações
Manual	1018	123	333,07	0,30	Limpeza contínua
Automatizado	1393	123	321,67	0,23	Operação sujeita a paragens a jusante

Os resultados do turno refletem condições reais de operação na linha industrial, incluindo paragens ocasionais e variações de fluxo a jusante.

Por esse motivo, estes dados não são comparáveis aos ensaios controlados, servindo apenas para evidenciar ganhos de produtividade e consumo total.

Após a análise dos resultados da Tabela 14, é possível comparar o desempenho entre os métodos de limpeza manual e automatizado. O sistema automatizado no mesmo período de operação limpou mais cuvetes, obtendo um consumo total inferior e redução média de 23% no consumo de ar comprimido por unidade.

5.3. ENERGIA E CUSTO (kWh/cuvete, €/cuvete)

Nesta secção procede-se à conversão dos consumos de ar comprimido registados nos ensaios em equivalentes de energia elétrica (kWh), de modo a quantificar o impacto energético e económico dos dois métodos de limpeza analisados: manual e automatizado.

Os cálculos detalhados encontram-se no Anexo D: Cálculo Energético e Económico Detalhado.

Tabela 15 – Energia e custo por método de limpeza. **Fonte:** elaboração própria.

Método	Energia (kWh/cuvete) *	Custo (€ / cuvete) **	Consumo médio (m³/cuvete)
Manual	0,030	0,0060	0,30
Automático	0,023	0,0046	0,23
Redução (%)	23	23	23

* conversão considerando 0,10 kWh/m³ (Anexo A: Compressor Kaeser ASD 37 SFC).

** custo unitário 0,20 €/kWh.

A conversão do consumo de ar em energia (kWh) baseou-se na potência específica do compressor (0,10 kWh/m³).

O método automático apresentou uma poupança média de 0,007 kWh/cuvete, equivalente a cerca de 0,0046€ por unidade.

Considerando uma produção anual de 1 518 000 cuvetes, a economia potencial ascende a 10626kWh/ano (~ 2125,20 €/ano), com *payback* inferior a 5 meses.

Na Figura 5.24 encontra-se o gráfico de comparação da energia consumida por cuvette (kWh/cuvete) e do custo associado (€).

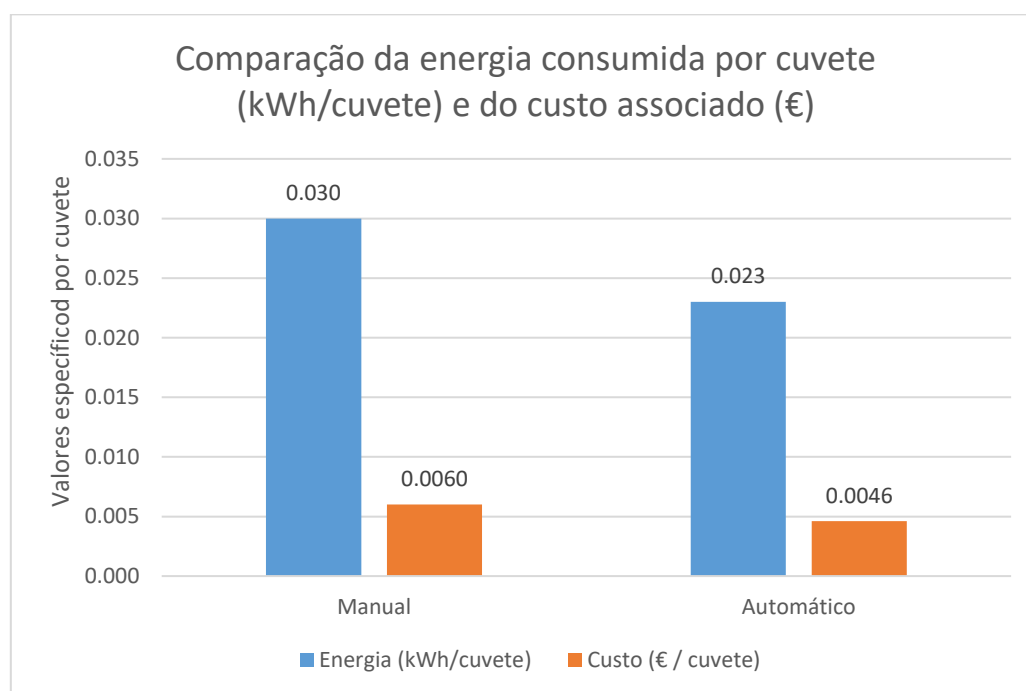


Figura 5.24 - Comparação da energia consumida por cuvette (kWh/cuvete) e do custo associado (€). **Fonte:** elaboração própria.

Observa-se uma redução de cerca de 23% tanto na energia como no custo por cuvette no método automatizado, evidenciando a maior eficiência global do sistema desenvolvido.

A incerteza do caudalímetro ($\pm 0,3$ % f.v.) traduz-se num erro máximo de $\pm 0,002$ m³/cuvete, considerado irrelevante face à diferença observada entre métodos. A incerteza do caudalímetro é descrita no Anexo E: Avaliação da Incerteza do Caudalímetro.

5.4. ERGONOMIA E SEGURANÇA FUNCIONAL

A introdução da automação no processo de limpeza das cuvetes teve impacto não apenas na eficiência produtiva e energética, mas também nas condições de ergonomia e segurança funcional do posto de trabalho. O novo sistema foi concebido com o objetivo de reduzir o esforço físico do operador, melhorar a postura de trabalho e garantir a segurança operacional durante todo o ciclo de limpeza (segundo **ISO 11201** [47] para ruído e **ISO 13849-1** [48] para segurança funcional).

Não foi possível realizar sonometria.

Na Tabela 16 encontra-se uma avaliação qualitativa de ergonomia e ruído.

Tabela 16 - Avaliação qualitativa de ergonomia e ruído. **Fonte:** elaboração própria.

Critério	Método manual	Método automatizado	Observação
Esforço físico dos membros superiores	Elevado	Reduzido	Supressão do uso contínuo da pistola manual
Exposição ao ruído	Contínua (≈ 85 dB(A))	Intermitente (~ 80 dB(A))	Menor exposição global
Postura prolongada	Em pé, braços elevados	Em pé, braços neutros	Melhoria ergonómica
Segurança funcional	Apenas E-STOP	E-STOP + barreira + permissiva tapete	Cumprimento Categoria 3 (ISO 13849-1)

Apesar de não terem sido recolhidos valores quantitativos de nível de pressão sonora, foi possível realizar uma avaliação qualitativa do ruído gerado pelo sistema automático com base na observação direta e no feedback dos operadores.

O ruído proveniente do acionamento das válvulas de impacto foi classificado como moderado a elevado, especialmente durante ciclos contínuos de sopro, mas dentro dos limites aceitáveis em ambiente industrial. A empresa recomendou a instalação de isolamentos acústicos

parciais na estrutura metálica e a substituição futura das válvulas por modelos de baixo ruído (≤ 70 dB).

Na componente ergonómica, observou-se uma redução significativa do esforço físico e da repetibilidade de movimentos, eliminando a necessidade de manipular a pistola de ar comprimido. Este aspeto traduz-se numa melhoria evidente das condições de conforto e segurança do operador. Recomenda-se avaliação RULA/REBA numa iteração futura.

O sistema integra E-STOP com retenção e rearme, permissiva 'paragem do tapete de embalagem' e intertravamentos das válvulas. A arquitetura é compatível com Categoria 3 (ISO 13849-1 [48]), carecendo de validação formal na integração definitiva.

5.5. DISCUSSÃO FINAL E PROPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO

5.5.1. PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL (DOE 2^3)

Um planeamento fatorial 2^3 é proposto para avaliar os efeitos combinados de pressão, tempo de pulso e número de válvulas na eficácia de limpeza.

As respostas analisadas serão: % de área limpa, consumo específico (m^3/cuvete) e tempo de ciclo (s).

O objetivo de otimização visa atingir $\geq 95\%$ de área limpa com $\leq 0,23 \text{ m}^3/\text{cuvete}$ e tempo ≤ 5 s.

Na Tabela 17 encontra-se uma proposta de planeamento para otimização do processo.

Tabela 17 - Planeamento 2^3 para otimização do processo. **Fonte:** elaboração própria.

Ensaio	Pressão (bar)	Tempo de Pulso (ms)	Nº de Válvulas Ativas	% Área Limpa (Y_1)	Consumo (m^3/cuvete , Y_2)	Tempo (s, Y_3)
1	-	-	-			
2	+	-	-			
3	-	+	-			
4	+	+	-			
5	-	-	+			
6	+	-	+			

7	-	+	+			
8	+	+	+			

Níveis: – (baixo), + (alto)

5.5.2. DIGITALIZAÇÃO E INTEGRAÇÃO (INDÚSTRIA 4.0)

Atualmente, os dados de consumo e desempenho são exportados manualmente através do HMI.

Como proposta de evolução, recomenda-se a integração digital do sistema com OPC-UA entre o PLC e o sistema de supervisão, publicando as variáveis principais (flow_inst, cycle_time, fault_code, unit_ok/ng).

Estas tags poderão alimentar *dashboards* de KPI, permitindo o cálculo automático dem³/cuvete, kWh/cuvete, OEE e disponibilidade (A) em tempo real.

Em alternativa, a publicação MQTT permitiria recolha em nuvem para manutenção preditiva e análise energética.

Na Tabela 18 encontra-se um exemplo de uma *dashboard* de KPI para integrar no sistema de maneira a melhorar a digitalização e integração.

Tabela 18 - Tags OPC-UA / MQTT sugeridos. **Fonte:** elaboração própria.

Variável	Descrição	Unidade	Frequência	Objetivo
flow_inst	Caudal instantâneo	m ³ /h	1 Hz	Monitorização em tempo real
flow_total	Consumo acumulado	m ³	0,1 Hz	Cálculo energético
cycle_time	Tempo de ciclo	s	1 Hz	Performance (P)
unit_ok/ng	Unidade boa / rejeitada	–	Evento	Qualidade (Q)
fault_code	Código de falha PLC	–	Evento	MTBF/MTTR
OEE	KPI calculado	%	1 min	Efetividade global

5.6. CONFIABILIDADE E EFETIVIDADE GLOBAL (RAM/OEE)

A análise de fiabilidade apresentada segue as orientações da norma **IEC 60300-3-11** [49], que estabelece diretrizes para a recolha e tratamento de dados de fiabilidade em sistemas industriais, e da norma **ISO 12489:2013** [50], aplicável à avaliação de fiabilidade operacional em equipamentos de processos.

Importa ressaltar que os valores de MTBF, MTTR e OEE apresentados na Tabela 19 constituem estimativas.

Para uma avaliação futura mais rigorosa, recomenda-se a implementação de um registo automático de falhas, paragens, tempos de reparação e produção efetiva através dos logs do PLC/HMI, permitindo a atualização contínua das métricas de disponibilidade, desempenho e qualidade.

Na Tabela 19 encontra-se um modelo para calcular a confiabilidade e efetividade global de um sistema.

Tabela 19 - Indicadores de confiabilidade e OEE (modelo). **Fonte:** elaboração própria.

Turno	Tempo de planeamento (h)	Tempo operacional (h)	Nº falhas	MTBF (min)	MTTR (min)	Disponibilidade de A (%)	Performance P (%)	Qualidade Q (%)	OEE (%)
Manual	8	7,6	4	114	10	91	87	95	75
Automatizado	8	7,9	2	237	8	96	92	97	86

Os valores da Tabela 19 são estimativas baseadas em observação e simulação coerente com o comportamento registado. Numa fase seguinte recomenda-se cálculo automático de MTBF/MTTR/A/OEE via logs PLC/HMI.

A confiabilidade de um sistema pode ser expressa por $R(t) = e^{-\lambda t}$, assumindo taxa de falhas constante $\lambda = 1/\text{MTBF}$.

Para sistemas reparáveis, define-se:

$$MTBF = \frac{T_{op}}{N_{falhas}}, MTTR = \frac{\sum T_{reparação}}{N_{falhas}}, A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

A Efetividade Global do Equipamento (OEE), dada pela equação 1, combina disponibilidade (A), desempenho (P) e qualidade (Q):

$$OEE = A * P * Q \quad (1)$$

Através do registo de eventos do PLC/HMI (FAULT, RESET, START_CYCLE, END_CYCLE e unit_ok/ng), é possível calcular automaticamente MTBF, MTTR e OEE.

Por limitação de acesso à empresa, estes valores foram apenas modelados, sendo recomendada a sua implementação na fase seguinte de digitalização.

5.7. CONCLUSÕES

O sistema automatizado desenvolvido demonstrou ganhos relevantes no desempenho da limpeza de cuvetes. Em particular, verificou-se uma **redução de aproximadamente 23 % no consumo específico** de ar comprimido (**0,30 → 0,23 m³/cuvete**), mantendo um **tempo médio de ciclo similar** ao processo manual (**variação de 20 %**). Estes resultados confirmam que a automação permite uma utilização mais eficiente dos recursos, sem penalizar o ritmo produtivo.

Para além dos benefícios de eficiência, a solução proposta apresenta melhorias claras de ergonomia e segurança. A eliminação do uso contínuo da pistola de ar comprimido reduz o esforço repetitivo dos membros superiores, bem como a exposição do operador ao ruído constante típico do sopro manual. A arquitetura de controlo implementada permite ainda conformidade com aspetos da ISO 13849-1 [48] Categoria 3, assegurando maior integridade de segurança operacional.

Do ponto de vista energético, a redução de consumo traduz-se em impactos económicos e ambientais positivos. Considerando os volumes anuais de produção, estima-se uma poupança de **10626 kWh/ano**, correspondente a **≈ 2125,20 €/ano**, e uma redução aproximada de **2,48 t CO₂/ano** associada à operação do compressor. Estes valores permitem antecipar um período de retorno (payback) de cerca de 5 meses, reforçando a viabilidade técnica e financeira da solução.

Numa fase futura, recomenda-se a otimização sistemática dos parâmetros de operação através de um DOE 2³ (pressão, tempo de pulso, número/ângulo dos bicos), bem como a

avaliação da % de área limpa com recurso a visão artificial. Propõe-se ainda evoluir para um sistema com monitorização RAM-OEE contínua via OPC-UA/MQTT e integração num gémeo digital do processo, promovendo maior rastreabilidade, eficiência energética e alinhamento com os princípios da Indústria 4.0.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação visou a implementação e automatização do processo de limpeza de gelo de cuvetes na empresa Brasmar, neste caso para melhorar as condições de trabalho dos operadores, diminuir a dependência de mão-de-obra e melhorar a eficiência do processo.

6.1. CONCLUSÕES

O presente projeto teve como principal objetivo a automatização do processo de limpeza de cuvetes de polvo, contribuindo simultaneamente para a melhoria das condições ergonómicas do posto de trabalho e para uma maior eficiência no consumo de ar comprimido.

Ao longo desta dissertação, foi possível desenvolver uma solução funcional, devidamente ajustada às necessidades da empresa Brasmar, a qual integrou os seguintes elementos:

-
- A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA BASEADO EM PLC, RESPONSÁVEL PELO COMANDO DE VÁLVULAS PNEUMÁTICAS DE IMPACTO SINCRONIZADAS COM SENSORES DE DETECÇÃO;
 - A INTEGRAÇÃO DE UMA CONSOLA HMI, PERMITINDO A VISUALIZAÇÃO E O CONTROLO EM TEMPO REAL DO PROCESSO;
 - A INSTALAÇÃO DE UM CAUDALÍMETRO, QUE POSSIBILITOU O REGISTO CONTÍNUO DO CONSUMO ENERGÉTICO E A DEFINIÇÃO DE MÉTRICAS OBJETIVAS DE DESEMPENHO;
 - A ADOÇÃO DE PRINCÍPIOS DE ERGONOMIA INDUSTRIAL, QUE RESULTARAM NA REDUÇÃO DO ESFORÇO FÍSICO DOS OPERADORES E NA CRIAÇÃO DE UM AMBIENTE DE TRABALHO MAIS SAUDÁVEL.

A decisão de reutilizar equipamentos já existentes na empresa revelou-se eficaz na otimização de recursos e na contenção de custos, aproveitando ao máximo a infraestrutura previamente instalada.

Os testes efetuados demonstraram que o sistema automatizado implementado constitui uma solução energeticamente mais eficiente do que o método tradicional, proporcionando uma redução no consumo de ar comprimido por cuvette, sem comprometer a eficácia do processo.

Contudo, constatou-se que a limitação do campo de atuação dos bicos dificultou, em alguns casos, a remoção completa do gelo acumulado.

Entre os principais resultados positivos obtidos, destacam-se:

-
- A REDUÇÃO EFETIVA DO ESFORÇO FÍSICO EXIGIDO AO OPERADOR;
 - O CONTROLO AUTOMÁTICO E ADAPTATIVO DAS VÁLVULAS COM BASE EM SINAIS DO SENSOR;
 - A MONITORIZAÇÃO EM TEMPO REAL DO CAUDAL E DA PRESSÃO, COM POSSIBILIDADE DE REGISTO HISTÓRICO;
 - A EXISTÊNCIA DE UMA INTERFACE HOMEM-MÁQUINA INTUITIVA E DE FÁCIL UTILIZAÇÃO;
 - A MELHORIA DA RASTREABILIDADE DO PROCESSO E A POSSIBILIDADE DE REALIZAR ANÁLISES ENERGÉTICAS DIÁRIAS COM BASE EM DADOS FIÁVEIS.

De forma geral, este trabalho validou a viabilidade técnica e operacional de automatizar um processo industrial que, até então, dependia fortemente da intervenção manual, demonstrando que é possível obter ganhos substanciais em termos de eficiência energética, ergonomia e monitorização. Para além da sua aplicabilidade direta na realidade da Brasmar, a solução proposta poderá servir de base para outras aplicações industriais com características semelhantes, contribuindo para a modernização e digitalização dos processos produtivos no setor alimentar.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Apesar de os objetivos principais do projeto terem sido na maior parte atingidos, foram identificados diversos aspetos técnicos e funcionais que poderão ser otimizados numa versão futura do sistema. As propostas de melhoria aqui apresentadas visam não só ultrapassar as limitações observadas durante os ensaios, como também maior flexibilidade, rastreabilidade, integração e eficiência energética.

-
- | | | | | | |
|---|---|-----------|----------------|-----------|-----------------|
| • | UNIFORMIZAÇÃO | DA | LIMPEZA | DA | CUVETE: |
| | O RESULTADO FINAL DA LIMPEZA DAS CUVETES PODERÁ AINDA SER MELHORADO, DADO QUE PERSISTEM ZONAS DO CONGELADO ONDE PERMANECE GELO. ESTE PROBLEMA ESTÁ RELACIONADO COM A LIMITAÇÃO DO CAMPO DE AÇÃO DOS BICOS DE SOPRO. UMA SOLUÇÃO PASSARÁ PELA ADIÇÃO DE MAIS BICOS AO EQUIPAMENTO, ESTRATEGICAMENTE POSICIONADOS, PERMITINDO UMA COBERTURA MAIS ABRANGENTE E UM SOPRO MAIS DIRECIONADO, GARANTINDO ASSIM UMA LIMPEZA MAIS UNIFORME E EFICAZ. | | | | |
| • | PARAMETRIZAÇÃO | | DE | | CUVETES: |
| | ADICIONALMENTE, SERIA PERTINENTE PERMITIR, ATRAVÉS DA INTERFACE HMI, A INSERÇÃO DE NOVOS TIPOS DE CUVETES E A CONFIGURAÇÃO DO NÚMERO DE VÁLVULAS ASSOCIADAS A CADA PMS, AUMENTANDO A FLEXIBILIDADE DO SISTEMA. | | | | |

- CONTROLO DA PRESSÃO DE SOPRO:**
 NESTE PROJETO, A PRESSÃO DO AR COMPRIMIDO É AJUSTADA MANUALMENTE ATRAVÉS DE UM REGULADOR MECÂNICO. PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E A ADAPTABILIDADE DO SISTEMA, RECOMENDA-SE A SUBSTITUIÇÃO POR UMA VÁLVULA PROPORCIONAL CONTROLADA PELO PLC, PERMITINDO O AJUSTE AUTOMÁTICO DA PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE CUVETE.
- EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AVALIAÇÃO COM OUTROS PRODUTOS:**
 PARA ALÉM DAS MELHORIAS AO NÍVEL DO CONTROLO DE PRESSÃO, O SISTEMA PODERÁ SER TESTADO E VALIDADO COM OUTROS TIPOS DE PRODUTOS CONGELADOS (COMO POTA OU MARISCO), DE FORMA A COMPROVAR A SUA VERSATILIDADE E ADAPTABILIDADE. ESTAS ALTERAÇÕES PODERÃO AINDA JUSTIFICAR A ADOÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE POUPANÇA ENERGÉTICA, COMO SEQUÊNCIAS DE SOPRO OTIMIZADAS E MODOS DE OPERAÇÃO ADAPTATIVOS.
- INTEGRAÇÃO E COMUNICAÇÃO COM SISTEMAS EXTERNOS:**
 ATUALMENTE, O REGISTO DOS CONSUMOS É REALIZADO LOCALMENTE, VIA FICHEIRO EXCEL EXPORTADO POR USB. COMO EVOLUÇÃO, SERÁ VANTAJOSA A CRIAÇÃO DE UMA LIGAÇÃO POR ETHERNET A UM SERVIDOR CENTRAL, SISTEMA SCADA OU PLATAFORMAS CLOUD, POSSIBILITANDO A ANÁLISE DE DADOS EM TEMPO REAL, RASTREABILIDADE COMPLETA E INTEGRAÇÃO COM SISTEMAS DE GESTÃO DE PRODUÇÃO (MES/ERP). ESTA INTEGRAÇÃO CONTRIBUIRÁ PARA A DIGITALIZAÇÃO DA FÁBRICA E PARA UMA MONITORIZAÇÃO CENTRALIZADA DO DESEMPENHO ENERGÉTICO.
- SISTEMA DE VISÃO E CONTROLO DE QUALIDADE:**
 A INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL PERMITIRIA A DETEÇÃO AUTOMÁTICA DE CUVETES QUE SAEM DA LINHA COM ZONAS DE GELO AINDA POR LIMPAR. ESTE SISTEMA PODERÁ COMUNICAR COM A HMI, EMITINDO UM AVISO VISUAL E SONORO QUE ALERTE O OPERADOR PARA A NECESSIDADE DE INTERVENÇÃO MANUAL, REFORÇANDO ASSIM O CONTROLO DE QUALIDADE DO PROCESSO.
- ESTRUTURA MECÂNICA E MANUTENÇÃO:**
 A ESTRUTURA ATUAL PODERÁ SER OTIMIZADA DE FORMA A PERMITIR UMA SUBSTITUIÇÃO MAIS SIMPLES DAS VÁLVULAS E UMA RECONFIGURAÇÃO MAIS RÁPIDA DA BARRA DE SOPRO. DO PONTO DE VISTA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA, PODERÁ SER INCORPORADA UMA LÓGICA DE CONTAGEM DE CICLOS DE ATIVAÇÃO DAS VÁLVULAS, COM EMISSÃO DE ALARMES AUTOMÁTICOS QUE INDIQUEM A NECESSIDADE DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA, EVITANDO FALHAS INESPERADAS E PROLONGANDO A VIDA ÚTIL DOS COMPONENTES.

- **IMPLEMENTAÇÃO DE MONITORIZAÇÃO SONORA COM SENSOR SPL E INTEGRAÇÃO OPC-UA PARA CONTROLO ADAPTATIVO DO RUÍDO:** A INSTALAÇÃO DE UM SENSOR ACÚSTICO (SPL – SOUND PRESSURE LEVEL) PERMITIRIA MONITORIZAR EM TEMPO REAL O NÍVEL DE RUÍDO GERADO PELO SISTEMA DE SOPRO.
- **CONECTIVIDADE REMOTA E SUPERVISÃO À DISTÂNCIA:** POR FIM, O ACESSO REMOTO AO SISTEMA HMI, TANTO A PARTIR DO COMPUTADOR LOCAL COMO ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS EXTERNOS (DENTRO OU FORA DA REDE LOCAL), CONSTITUIRÁ UMA FUNCIONALIDADE RELEVANTE PARA A MONITORIZAÇÃO EM TEMPO REAL E PARA O SUPORTE TÉCNICO À DISTÂNCIA, FACILITANDO INTERVENÇÕES RÁPIDAS E AUMENTANDO A DISPONIBILIDADE DO SISTEMA.

Em conjunto, estas propostas de melhoria representam o caminho natural de evolução do sistema, promovendo uma solução mais robusta, inteligente, conectada e alinhada com os desafios atuais da indústria alimentar automatizada.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Brasmar Group, “Quem somos,” [Online]. Available: <https://brasmargroup.com/pt-pt/quem-somos/>.
- [2] Brasmar, “Fundado no aço e conservado no frio,” 1 setembro 2017. [Online]. Available: <https://brasmar.com/pt-pt/fundado-no-aco-e-conservado-no-frio>.
- [3] Agência Lusa, “Portuguesa Brasmar compra congénere britânica Holmes Seafood,” 25 janeiro 2023. [Online]. Available: <https://expresso.pt/economia/2023-01-25-Portuguesa-Brasmar-compra-congenere-britanica-Holmes-Seafood-61cef090>.
- [4] P. P. Groumpos, “A Critical Historical and Scientific Overview of all Industrial Revolutions,” *ScienceDirect*, p. 8, 2021.
- [5] S. Chand, “FROM ELECTRIC MOTORS TO FLEXIBLE MANUFACTURING: CONTROL TECHNOLOGY DRIVES INDUSTRIAL AUTOMATION,” *ScienceDirect*, p. 6, 2008.
- [6] A. P. F. Romero, “A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept,” *Elsevier B.V.*, p. 9, 2017.
- [7] M. J. M. L. S. M. M. B. V.-H. K. M. Sascha Julian Oks, “Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook,” 2022.
- [8] Redação Murrelektronik, “Como usar a automação a seu favor na indústria alimentícia?,” [Online]. Available: <https://blog.murrelektronik.com.br/industria-alimenticia/>.
- [9] Equipe Fortress, “Como a automação industrial influencia a produção de alimentos?,” 6 novembro 2024. [Online]. Available: <https://blog.fortresstechnology.com.br/automacao-industrial-producao-de-alimentos/>.
- [10] M. Khan, “Automation of Food Industry,” 2018.

- [11] I. C. BORTOLOTTI, “AUTOMAÇÃO ELETROPNEUMÁTICA E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA EM FORNALHAS DE SECADORES DE GRÃOS DO TIPO ROTATIVO HORIZONTAL,” SÃO MATEUS, 2021.
- [12] A. O. A. E. E. R. Ø. J. R. M. Ekrem Misimi, “Robotic Handling of Compliant Food Objects by Robust Learning from Demonstration,” p. 8, 6 janeiro 2019.
- [13] P. CANNONERO, “Validation of an Automated Distribution Center in the Food and Beverage,” Milão, 2021.
- [14] duratta, “Entenda os Três Tipos de Ergonomia e Sua Importância no Ambiente de Trabalho,” 19 Abril 2025. [Online]. Available: <https://duratta.com.br/entenda-os-tres-tipos-de-ergonomia-e-sua-importancia-no-ambiente-de-trabalho/>.
- [15] P. V. J. S. G. R. M. C. (. K. P. P. v. D. (. v. h. p. I. I. (. Jan de Kok, “Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU,” 2019.
- [16] Osha, “Ergonomics,” [Online]. Available: <https://www.osha.gov/ergonomics>.
- [17] M. M. Sobral, “Transporte manual de carga – Qual o peso que o trabalhador pode transportar,” [Online]. Available: <https://segurancadotrabalhonwn.com/transporte-manual-peso-trabalhador-pode-transportar/>.
- [18] M. Gallant, “Visibility, Affordance & Feedback,” 11 Abril 2009. [Online]. Available: <https://gangles.ca/2009/04/11/visibility-affordance-feedback/>.
- [19] M. Mello, “IHM: o que é, para que serve e principais tipos,” 24 janeiro 2023. [Online]. Available: <https://victorvision.com.br/blog/ihm/>.
- [20] P. S. G. N. Rick Goggins, *Estimating the effectiveness of ergonomics interventions through case studies: Implications for predictive cost-benefit analysis*, 28 Abril 2008.
- [21] L. D. N. A. P. Maija Breque, “Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry,” 2021.

- [22] C. L. Luís Ribeiro, “Quando se compra água ao preço do peixe,” *Visão*, 20 Março 2018. [Online]. Available: <https://visao.pt/atualidade/sociedade/2018-03-20-quando-se-compra-agua-ao-preco-do-peixe/>.
- [23] “Escova Rotativa,” [Online]. Available: <https://www.martin-eng.com.br/content/product/3976/escova-rotativa>.
- [24] “Assis escovas industriais,” [Online]. Available: <https://www.jassisescovas.com.br/escovas-para-industria-alimentar.php>.
- [25] L. C. P. Magalhães, “Elaboração do projeto de uma máquina de contagem de cabos automática,” 2023.
- [26] H. Mattede, “Mundo da Elétrica,” [Online]. Available: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-sensores-indutivos-capacitivos-caracteristicas-funcionamento/>.
- [27] H. Mattede, “Mundo da Elétrica,” [Online]. Available: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-sensores-indutivos-capacitivos-caracteristicas-funcionamento/>.
- [28] “Blog Sense,” [Online]. Available: <https://www.blog.sense.com.br/2019/02/sensores-fotoeletricos-o-que-sao-quais.html>.
- [29] KEYENCE. [Online]. Available: <https://www.keyence.com.br/products/sensor/fiber-optic/>.
- [30] “OMRON Automação Industrial,” [Online]. Available: <https://industrial.omron.pt/pt/products/E3Z-D61-M1J-0-3M>.
- [31] “Emerson,” [Online]. Available: <https://www.emerson.com/pt-pt/automation/solenoids-pneumatics/pneumatic-valves>.
- [32] “Loja do mecanico,” [Online]. Available: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/402522/43/416/valvula-pneumatica-de-bloqueio-de-fluxo-registro-tubo-12mm-at-402522>.

- [33] “MPA Pneumática,” [Online]. Available: <https://www.mpapneumatica.com.br/regulador-pressao-ar-comprimido>.
- [34] “STNC,” [Online]. Available: <https://www.stncdobrasil.com.br/produto/valvula-reguladora-de-fluxo-em-linha-nsf/>.
- [35] “Puma Brasil,” [Online]. Available: <https://pumabrasil.com.br/entenda-os-tipos-de-valvulas-pneumaticas/>.
- [36] “Endevor,” [Online]. Available: <https://endevoronline.com/pt/eletrovalvulas/3027-eletrovalvula-pneumatica-origa-parker-pa10297.html>.
- [37] SMC, “Válvula de impacto,” [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcgicfindmkaj/https://smc-static-resources-prd.s3.eu-central-1.amazonaws.com/products/catalogues/IBV_Info_en.pdf.
- [38] velki, “PLCs: O que são e quais as suas vantagens,” [Online]. Available: <https://velki.com.br/pt/blog/aprenda-com-a-velki/plcs--o-que-sao-e-quais-as-suas-vantagens>.
- [39] OMRON Automação Industrial, “CP1E-NA20DT1-D,” [Online]. Available: <https://industrial.omron.pt/pt/products/CP1E-NA20DT1-D>.
- [40] ARTISAN , “CP1E-N40DR-D OMRON CPU Unit,” [Online]. Available: <https://www.artisanng.com/TestMeasurement/56453-1/OMRON-CP1E-N40DR-D-CPU-Unit>.
- [41] OMRON, “CP1W-MAD11,” [Online]. Available: <https://industrial.omron.pt/pt/products/CP1W-MAD11>.
- [42] “F.Fonseca,” [Online]. Available: <https://www.ffonseca.com/pt/prod-consola-tátil-hmi-cmt3102x-weintek?>.
- [43] “RS,” [Online].

- [44] [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://docs.rs-online.com/8b6d/0900766b8130a674.pdf.
- [45] M. Eletronics. [Online]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/MEAN-WELL/SDR-120-24?qs=2Nzy6JaqJsntOCD78z8GMg%3D%3D&srsId=AfmBOoqa-QIny5S7Z6K0xGprsmcwueEM2m60R6KAJlb3jalkehX8axy>.
- [46] “TEM Eletronic Components,” [Online]. Available: <https://www.tme.eu/pt/details/g2rvsl50024acdc/reles-eletromagnetico-conjuntos/omron/g2rv-sl500-24vac-dc/>.
- [47] “ISO 11201:2010,” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11201:ed-2:v1:en>.
- [48] “EN ISO 13849-1: norma para a segurança funcional, base para o nível de performance (PL),” [Online]. Available: <https://www.pilz.com/pt-PT/support/law-standards-norms/functional-safety/en-iso-13849-1>.
- [49] “INTERNATIONAL STANDARD, IEC 60300-3-11,” [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://cdn.standards.iteh.ai/samples/13917/a068ea0b967b4739b60443231bc9329b/IEC-60300-3-11-2009.pdf.
- [50] ISO, “ISO org, ISO/TR 12489:2013,” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:tr:12489:ed-1:v1:en>.
- [51] Testo, “testo 6452 - Compressed air meter DN25 (1”),” [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://static.testo.com/image/upload/HQ/testo-6451-6454-datasheet-en.pdf.
- [52] SMC, “Regulador de pressão,” [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://smccatalog.partbuilder.smc pneumatics.com/dl_catalogs/assets/manual/en-jp/files/AR-OMS0056.pdf.
- [53] “AIGNEP,” [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/aignep/product-20091-1041657.html>.

[54] [Online]. Available: <https://pt.rs-online.com/web/p/pantallas-hmi/8211807>.

ANEXOS

ANEXO A: COMPRESSOR KAESER ASD 37 SFC

O ar comprimido utilizado no sistema de limpeza automatizado é fornecido por um compressor de parafuso da marca Kaeser, modelo ASD 37 SFC, concebido para aplicações industriais que exigem um fornecimento contínuo, eficiente e fiável de ar.

Características principais:

-
- TIPO: COMPRESSOR DE PARAFUSO COM INJEÇÃO DE ÓLEO;
 - MODELO: KAESER ASD 37 SFC;
 - POTÊNCIA NOMINAL DO MOTOR: 37 kW;
 - POTÊNCIA ESPECÍFICA DO COMPRESSOR: 0,10 kWh/m³;
 - CAUDAL LIVRE (FAD): 2,35 A 6,90 m³/MIN (DEPENDENTE DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO);
 - PRESSÃO MÁXIMA DE SERVIÇO: 13 BAR;
 - SISTEMA DE CONTROLO: *SIGMA CONTROL 2*, COM REGULAÇÃO AUTOMÁTICA POR VARIADOR DE FREQUÊNCIA (*SIGMA FREQUENCY CONTROL*);
 - TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO: 400 V / 50 Hz;
 - TIPO DE ÓLEO LUBRIFICANTE: KAESER SIGMA FG-460 – ÓLEO SINTÉTICO DE GRAU ALIMENTAR (NSF H1).

Função no sistema

O compressor assegura o fornecimento contínuo de ar comprimido às válvulas pneumáticas de impacto utilizadas no processo de limpeza das cuvetes. Graças ao variador de frequência, o equipamento ajusta automaticamente a rotação do motor de acordo com a procura de ar, reduzindo picos de consumo energético e garantindo pressão estável na rede durante todo o ciclo de funcionamento.

Adequação à indústria alimentar

O compressor Kaeser ASD 37 SFC utiliza o óleo SIGMA FG-460, desenvolvido especificamente para utilização em ambientes alimentares. Este lubrificante é totalmente aprovado para uso na indústria alimentar segundo as normas USDA H-1 e NSF H1, garantindo que, mesmo em caso de contacto accidental com o produto final, não ocorre risco de contaminação.

O óleo SIGMA FG-460 apresenta as seguintes vantagens:

-
- COMPATIBILIDADE TOTAL COM OS REQUISITOS DE HIGIENE DA INDÚSTRIA ALIMENTAR;
 - CUMPRIMENTO DAS NORMAS **USDA H-1, NSF H1 E FDA 21 CFR 178.3570;**
 - EXCELENTE ESTABILIDADE TÉRMICA E RESISTÊNCIA À OXIDAÇÃO;
 - REDUZ A FORMAÇÃO DE RESÍDUOS E PROLONGA A VIDA ÚTIL DO COMPRESSOR;
 - PRODUZ AR COMPRIMIDO LIMPO E SEGURO, ADEQUADO A ZONAS DE MANIPULAÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTARES.

Importância no sistema

A utilização de um compressor com óleo lubrificante certificado para a indústria alimentar garante que o ar comprimido aplicado diretamente sobre produtos congelados cumpre os padrões de segurança e higiene alimentar. Esta escolha é essencial em ambientes de produção como o da Brasmar, onde se manipula produto alimentar destinado ao consumo humano.

ANEXO B: CAUDALÍMETRO TESTO 6452 DN25

O caudalímetro Testo 6452 foi utilizado para monitorizar o consumo de ar comprimido durante os ensaios de limpeza automática. Este sensor baseia-se no princípio térmico de medição de massa, não possuindo partes móveis, o que reduz perdas de carga e manutenção.

Características técnicas [51]:

-
- **MODELO:** TESTO 6452 – MEDIDOR DE AR COMPRIMIDO DN25 (1");
 - **PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO:** ANEMOMETRIA TÉRMICA;
 - **FAIXA DE MEDIÇÃO:** 3 A 700 M³/H (AJUSTÁVEL CONFORME INSTALAÇÃO);
 - **SINAL DE SAÍDA:** 4–20 MA PROPORCIONAL AO CAUDAL (M³/H);
 - **TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO:** 18–30 VDC;
 - **ROSCA:** G 1" (MACHO);
 - **MATERIAL DO CORPO:** AÇO INOXIDÁVEL;
 - **TEMPERATURA DE OPERAÇÃO:** 0 A 60 °C.

Integração com o sistema

O sinal analógico (4–20 mA) do Testo 6452 é lido pela entrada analógica do módulo Omron CP1W-MAD11, permitindo:

-
- A MEDIÇÃO EM TEMPO REAL DO CAUDAL INSTANTÂNEO DE AR COMPRIMIDO;
 - O CÁLCULO DO CONSUMO TOTAL DURANTE CADA CICLO DE LIMPEZA, ATRAVÉS DA SOMA DOS VALORES REGISTRADOS AO LONGO DO TEMPO;
 - A COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE LIMPEZA (MANUAL E AUTOMÁTICO).

Vantagens:

-
- ELEVADA PRECISÃO E REPETIBILIDADE;
 - INSTALAÇÃO SIMPLES E SEM CALIBRAÇÃO FREQUENTE;
 - AUSÊNCIA DE PARTES MÓVEIS (BAIXO DESGASTE E MANUTENÇÃO MÍNIMA).

ANEXO C: REGULADOR DE PRESSÃO SMC AR50-F06-B

O regulador manual de pressão SMC AR50-F06-B é responsável por manter a pressão de trabalho constante no circuito pneumático que alimenta as válvulas de impacto.

Características técnicas [52]:

-
- **MODELO:** SMC AR50-F06-B;
 - **FAIXA DE REGULAÇÃO:** 0,05 – 0,85 MPa (0,5 – 8,5 BAR);
 - **PRESSÃO MÁXIMA DE ENTRADA:** 1,0 MPa (10 BAR);
 - **CAUDAL MÁXIMO:** 6000 L/MIN (A 0,7 MPa E $\Delta P = 0,1$ MPa);
 - **ROSCA DE LIGAÇÃO:** 3/4" BSP;
 - **PRECISÃO DE REGULAÇÃO:** $\pm 0,05$ MPa;
 - **TEMPERATURA DE OPERAÇÃO:** -5 °C A 60 °C.

Notas adicionais

-
- O REGULADOR INCLUI MANÓMETRO PARA LEITURA DIRETA DA PRESSÃO;
 - A SUA ROBUSTEZ E PRECISÃO PERMITEM MINIMIZAR FLUTUAÇÕES PROVOCADAS POR OSCILAÇÕES NA REDE.

ANEXO D: CÁLCULO ENERGÉTICO E ECONÓMICO DETALHADO

D.1. METODOLOGIA DE CONVERSÃO

O consumo de ar comprimido medido em metros cúbicos normalizados (m³) foi convertido em energia elétrica equivalente (kWh) e custo económico (€) segundo a metodologia seguinte:

$$E = V_{ar} \times k_{específico} \quad (2)$$

$$C = E * tarifa_{energia} \quad (3)$$

onde:

-
- V_{ar} = CONSUMO MÉDIO DE AR (M³/CUVETE);
 - $k_{específico}$ = POTÊNCIA ESPECÍFICA DO COMPRESSOR (KWH/M³);
 - C = CUSTO ENERGÉTICO POR CUVETE (€).

D.2. TABELA DE CÁLCULO EXEMPLIFICATIVA

Tabela 20 - Tabela de Cálculo energético. **Fonte:** elaboração própria.

Método	V_{ar} (m ³ /cuvete)	$k_{específico}$ (kWh/m ³)	Energia (kWh/cuvete)	Tarifa (€ / kWh)	Custo (€ / cuvete)
Manual	0,30	0,10	0,030	0,20	0,0060
Automatizado	0,23	0,10	0,023	0,20	0,0046
Δ (redução)	-	-	- 0,007	-	-0,0014

D.3. PROJEÇÃO ANUAL E BENEFÍCIO ECONÓMICO

$$E_{anual} = \Delta E_{cuvete} * N_{cuvetes/ano} \quad (4)$$

$$C_{anual} = \Delta C_{cuvete} * N_{cuvetes/ano} \quad (5)$$

Tabela 21 - Cálculo dos parâmetros para projeção anual e benefício económico. **Fonte:** elaboração própria.

Tabela A. 1 – Parâmetro	Valor
ΔE_{cuvete} (kWh/cuvete)	0,007
$N_{\text{cuvetes/ano}}$ (unidades)	1 518 000
E_{poupado} (kWh/ano)	10626
Tarifa média (€/kWh)	0,20
Poupança anual (€)	2125,20

D.4. PAYBACK ESTIMADO

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Poupança anual}} \quad (6)$$

O investimento na automação foi de 860€, resultando num Payback = $860/2125,20 = 0,40$ anos, ou seja, ≈ 5 meses.

D.5. IMPACTO AMBIENTAL (CO₂ EVITADO)

Com fator de emissão médio de 0,233 kg CO₂/kWh:

CO₂ evitado = $10626 \times 0,233 = \mathbf{2\,475,85\,kg\,CO_2/ano}$ ($\approx 2,48$ t/ano).

$\approx 2,48$ toneladas de CO₂ evitadas por ano, contribuindo para os objetivos de descarbonização Industrial.

ANEXO E: AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DO CAUDALÍMETRO

E.1. CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

- **MODELO:** SMC PFMB7501-F10-67-M-X;
- **TIPO:** CAUDALÍMETRO DIGITAL PARA AR COMPRIMIDO;
- **ESCALA:** 0–1000 L/MIN;
- **PRECISÃO NOMINAL:** $\pm 0,3$ % DA LEITURA PLENA ESCALA (F.V. – FULL VALUE);
- **RESOLUÇÃO:** 1 L/MIN;
- **F.V.** = 225 M³/H.

E.2. CÁLCULO DA INCERTEZA EXPANDIDA

A incerteza padrão de medição foi avaliada pela expressão:

$$u = \frac{E_r}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

onde E_r é o erro máximo admissível (em m³).

A incerteza expandida (95 % de confiança) é dada por:

$$U = k \times u \quad (8)$$

Com $k=2$.

E.3. APLICAÇÃO AO CONSUMO POR CUVETE

Tabela 22 - Cálculos dos parâmetros para aplicação ao consumo por cuvette. **Fonte:** elaboração própria.

Tabela B. 1 – Parâmetro	Valor	Unidade
Erro máximo E_r	0,3 % f.v.	---
Valor medido Var	0,23	m ³ /cuvete
$u = E_r / \sqrt{3}$	0,001	m ³
$U = 2u$	0,002	m ³

Logo, o erro absoluto máximo é de $\pm 0,002$ m³/cuvete, valor inferior à diferença média entre os métodos ($\Delta = 0,007$ m³/cuvete), sendo, portanto, negligenciável.

ANEXO F: MATERIAL SUPLEMENTAR E RECURSOS MULTIMÉDIA

F.1. LISTA DE FICHEIROS E VÍDEOS

Tabela 23 - Lista de ficheiros e vídeos. Fonte: elaboração própria.

Identificação	Descrição	Formato	Localização/QR Code
V1	Vídeo 1 – Limpeza manual com pistola de ar	MP4	QR1 
V2	Vídeo 2 – Limpeza automatizada com jatos sincronizados	MP4	QR2 
D1	Dataset dos valores de turno completo dos métodos (manual e automatizado)	XLSX	QR3 
R1	Script Excel de cálculo estatístico (médias, DP, IC95%) e Dataset experimental (ensaio n=15, consumos e tempos)	XLSX	QR4 
R2	Script Excel de cálculo energético e de custos	XLSX	QR5 

F.2. INSTRUÇÕES DE ACESSO

Todos os materiais complementares estão alojados em repositório de acesso restrito, apenas para efeitos de validação científica e preservação de dados experimentais.

Os QR Codes apresentados permitem aceder diretamente aos ficheiros através de um leitor padrão (câmara de smartphone).

F.3. DECLARAÇÃO DE AUTENTICIDADE

Os ficheiros apresentados neste anexo correspondem a registos originais produzidos no âmbito do trabalho experimental desta dissertação, não tendo sido objeto de edição ou manipulação de dados.