



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Gomes da Silva

**Otimização do Procedimento de
Monitorização de Fugas e das Perdas de
Carga do Sistema de Ar Comprimido**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Eurico Augusto Rodrigues Seabra

setembro de 2020

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.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

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

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer à Universidade do Minho e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo acolhimento ao longo dos últimos cinco anos e por constituírem um pilar de conhecimento e valores.

Agradeço à *BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems* Portugal pela oportunidade de desenvolver o projeto de dissertação de mestrado em meio industrial e pelas condições disponibilizadas. Em particular, à Dr^a. Sílvia Miranda que permitiu a integração no projeto.

Ao Eng. Pedro Veiga e ao Eng. André Seara gostaria de deixar um especial agradecimento pela disponibilidade, pelo acompanhamento incansável e, principalmente, pelos conhecimentos partilhados.

A todos os membros da *BorgWarner* Viana, o meu sincero obrigada. Em particular, aos membros do departamento *Manufacturing Services* – André Taveira, Raúl Cruz, Remi Araújo, Eduardo Rocha, Jonatan Oliver – e do departamento *Digital Transformation* – Eng. André Freitas e João Castro, pelo modo como me acolheram, por toda a preocupação e pelo apoio prestado, sem esquecer a boa disposição e espírito de equipa.

Agradeço ao orientador, Prof. Dr. Eurico Seabra, pelo apoio e orientação prestada ao longo de todo o projeto.

Um agradecimento muito especial à minha família, principalmente aos meus pais e ao meu irmão pelo carinho, apoio e, particularmente, pelos conselhos preciosos e pelo encorajamento nos momentos cruciais.

Ao meu namorado, Armando Ribeiro, pelo carinho, pelo apoio incondicional prestado ao longo destes anos para alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo deste percurso, especialmente à Mariana Jesus e ao Trio de Manufatura – Inês Leitão e Tiago Sá – pelo companheirismo e por serem o braço direito, sempre prontos para ajudar.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico 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 maioria dos processos produtivos da *BorgWarner Emissions, Thermal, and Turbo Systems* Portugal necessitam de ar comprimido. A empresa dispõe das principais práticas de monitorização do sistema de ar comprimido. Contudo, surgiu a necessidade de otimizar o sistema, em especial no que respeita às perdas a que é sujeito, nomeadamente as fugas e as perdas de carga.

Na monitorização das fugas de ar comprimido, em particular nas etapas identificação e verificação de fugas, foi introduzido o detetor de fugas ultrassónico que permite quantificar o caudal e os custos associados às fugas de ar comprimido. Deste modo, verificou-se que, até ao momento, foram gastos 2100 € em fugas, foram economizados 4300 € com a reparação de 68% das fugas e que ainda podem ser incrementados 1700 € com a reparação dos restantes 32% de fugas que estão em ativo. As fugas não reparadas representam 5% da produção de ar comprimido.

Recentemente, tinha sido detetada queda de pressão elevada numa linha de produção, impedindo o seu funcionamento correto. O estudo desse caso permitiu desenvolver um procedimento de análise e resolução deste tipo de problemáticas, com soluções imediatas e uma solução a longo prazo – projeto piloto. Foi também desenvolvida uma calculadora que permite verificar o diâmetro ideal normalizado da tubagem para cada caso em concreto. Além disso, foram sugeridas melhorias na cláusula pneumática do caderno de encargos.

No que concerne à rede de ar comprimido, verificou-se que as perdas de carga são admissíveis, variando entre 0,2 e 0,5 bar. No entanto, sugeriu-se a reformulação da rede de distribuição da zona onde foi detetada maior queda de pressão, de forma a garantir que a queda de pressão varie entre 0,2 e 0,3 bar. É natural que, com o decorrer do tempo, as fugas, as perdas de carga e os condensados tendam a aumentar, assim como os equipamentos tendem a degradar-se. Por essa razão, é fundamental que a rede de ar comprimido seja verificada anualmente. Para isso, foi concebido um plano de manutenção preventiva da rede.

PALAVRAS-CHAVE

Ar Comprimido; Fugas; Perdas de Carga; Eficiência Energética

ABSTRACT

Most of the production processes at *BorgWarner Emissions, Thermal, and Turbo Systems* Portugal needs to be supplied with compressed air. The company has the main practices for monitoring the compressed air system. However, there was a need to optimize the system, in particular with regard to the losses which the system is subjected, namely leakage and pressure drop.

In the monitoring of compressed air leaks, particularly in the identification and verification stages of leaks, the ultrasonic leak detector was introduced, which allows quantifying the flow rate and the costs associated with compressed air leaks. Thus, it has been found that, up to now, € 2100 has been spent on leaks, € 4300 has been saved with the repair 68% of the leaks and that € 1700 can still be increased with the repair of the remaining 32% of active leaks. Unrepaired leaks account for 5% of compressed air production.

Recently, a high-pressure drop had been detected in a production line, preventing it from working correctly. The study of this case allowed to develop an analysis and resolution procedure for this type of problems, with immediate solutions and a long-term solution – pilot project. A calculator has also been developed to verify the ideal normalized diameter of the pipe for each specific case. In addition, the pneumatic clause of the specifications was improved.

Regarding the compressed air network, the pressure drops are admissible, ranging from 0,2 to 0,5 bar. However, it was suggested to reformulate the distribution network of the area where the greatest pressure drop was found, in order to ensure that the pressure drop varies between 0,2 and 0,3 bar. It is natural that, over time, leaks, pressure drop and condensates tend to increase just as the equipment tends to deteriorate. For this reason, it is essential that the compressed air network is annually checked. For this, a preventive maintenance plan of the network was designed.

KEY-WORDS

Compressed Air; Leaks; Pressure Drop; Energy Efficiency

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo.....	ii
Abstract	ii
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. Motivação	3
1.3. Empresa	3
1.4. Objetivos.....	8
1.5. Contributos do trabalho	8
1.6. Organização da dissertação.....	9
2. Revisão Bibliográfica	10
2.1. Fontes de Energia	11
2.1.1. Transformação	11
2.1.2. Tipo de Fonte.....	12
2.1.3. Produção de Eletricidade	12
2.1.4. Pneumática.....	13
2.2. Ar Comprimido	14
2.2.1. Constituição do Ar	14
2.2.2. Instalação	15
2.2.3. Produção	16
2.2.4. Distribuição	19
2.2.5. Parâmetros de Qualidade	22
2.2.6. Custos	22

2.3.	Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido	23
2.3.1.	Fugas.....	23
2.3.2.	Perdas de Carga.....	24
2.4.	Ferramentas da Gestão da Qualidade.....	25
2.4.1.	PDCA.....	25
2.4.2.	8D	25
3.	Situação Atual do Sistema de Ar Comprimido da Empresa.....	28
3.1.	Sistema de Ar Comprimido.....	29
3.1.1.	Instalação	29
3.1.2.	Produção	30
3.1.3.	Distribuição	34
3.1.4.	Consumo de Ar Comprimido.....	35
3.2.	Medidas Implementadas.....	37
3.2.1.	Segurança	37
3.2.2.	Manutenção	38
3.2.3.	Eletroválvulas	38
3.2.4.	Monitorização de Consumos.....	39
3.2.5.	Monitorização de Fugas	40
4.	Oportunidades de Melhoria	42
4.1.	Fugas de Ar Comprimido	43
4.1.1.	Adição do Detetor de Fugas.....	43
4.1.2.	Sensibilização do Pessoal Técnico	45
4.1.3.	Desenvolvimento da Documentação de Gestão.....	45
4.1.4.	Otimização do Procedimento.....	47
4.1.5.	Plano de Auditorias	48

4.1.6	Discussão de Resultados	49
4.2	Queda de Pressão nas Linhas de Produção	50
4.2.1	Análise do Problema	51
4.2.2	Resolução Imediata	53
4.2.3	Causa Raiz.....	54
4.2.4	Soluções.....	56
4.2.5	Procedimento de Resolução	58
4.2.6	Caderno de Encargos.....	59
4.3	Rede de Ar Comprimido	60
4.3.1	Manutenção Preventiva	60
4.3.2	Perdas de Carga.....	61
4.3.3	Reformulação	63
5.	Considerações Finais.....	66
5.1.	Conclusões.....	67
5.2.	Trabalhos Futuros.....	68
	Referências Bibliográficas	71
	Anexo A – Caudal debitado e consumo do compressor em função da capacidade	76
	Anexo B – Custo do ar comprimido para o detetor de fugas.....	77
	Anexo C – Relatório digital de uma fuga, gerado pelo detetor de fugas.....	79
	Anexo D – Diagramas de pareto, gráficos e quadro resumo das fugas criados na documentação de gestão	80
	Anexo E – Plano de auditorias de fugas de ar comprimido	85
	Anexo F – Guião do procedimento de auditoria de fugas de ar comprimido	86
	Anexo G – <i>Booster</i> e acumulador adicionados na linha de produção da área ESD com queda de pressão	88
	Anexo H – Fórmula de cálculo do diâmetro interno da tubagem	89
	Anexo I – Medição do consumo das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão	90

Anexo J – Cálculo do diâmetro interno da tubagem de alimentação da linha de produção da área ESD com queda de pressão	92
Anexo K – Calculadora do diâmetro interno da tubagem de ar comprimido.....	94
Anexo L – Perdas de carga da rede de ar comprimido	95
Anexo M – Pontos de medição de pressão	96
Anexo N – Queda de pressão da rede de distribuição de ar comprimido da área ESD.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Logótipo da <i>BorgWarner</i> [5].....	4
Figura 1.2 – Produtos para veículos ligeiros de combustão, híbridos, elétricos e veículos pesados de combustão, híbridos e elétricos, respetivamente, produzidos pelo grupo <i>BorgWarner</i> [5].....	5
Figura 1.3 – Localização geográfica da empresa <i>BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems</i> Portugal e a entrada principal [5]	6
Figura 1.4 – <i>Layout</i> das instalações <i>BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems</i> Portugal [5].....	6
Figura 1.5 – Produtos fabricados na <i>BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems</i> Portugal [5].....	7
Figura 1.6 – Clientes da <i>BorgWarner</i> Viana [5].....	8
Figura 2.1 – Transformação das fontes de energia até ao uso final. Adaptado de: [8].....	11
Figura 2.2 – Fontes de energia usadas na produção de eletricidade em Portugal nos últimos 19 anos [10].....	12
Figura 2.3 – Fontes de energia usadas na produção de eletricidade em Portugal nos quatro primeiros meses de 2020 [10].....	13
Figura 2.4 – Esquema da pneumática: etapas e elementos [11].....	13
Figura 2.5 – Esquema da instalação de produção e tratamento de ar comprimido [12].....	15
Figura 2.6 –Tipos de compressores. Adaptado de: [1,17]	16
Figura 2.7 – Esquema do funcionamento dos secadores de: (a) refrigeração; (b) adsorção [1]	18
Figura 2.8 – Redes de distribuição de ar comprimido em: (a) circuito aberto; (b) circuito fechado [19]	20
Figura 2.9 – Rede de distribuição do ar comprimido [13]	21
Figura 2.10 – Custos associados ao ar comprimido. Adaptado de: [1,17].....	23
Figura 2.11 – Detetor de fugas ultrassónico LD 500 com: (a) trompete acústico e fones; (b) tubo de foco [21].....	24
Figura 3.1 – Instalação da central de ar comprimido: a preto está representada a instalação atual, linhas 1 e 2, e a vermelho está representada a possibilidade de instalação de uma terceira linha	29

Figura 3.2 – Diagrama de fluxo do compressor volumétrico rotativo de parafuso lubrificado [17]	31
Figura 3.3 – Princípio operativo do secador. Adaptado de: [30]	32
Figura 3.4 – Rede de distribuição de ar comprimido	35
Figura 3.5 – Perfil de potência consumida durante a semana pela central de ar comprimido	36
Figura 3.6 – Perfil de potência consumida durante o fim de semana pela central de ar comprimido	37
Figura 3.7 – Localização das eletroválvulas de seccionamento da rede de ar comprimido	38
Figura 3.8 – Esquema do procedimento de monitorização de fugas de ar comprimido usado antes do estágio	40
Figura 3.9 – Etiqueta usada na identificação de fugas de ar comprimido.....	40
Figura 4.1 – Esquema do procedimento seguimento de fugas de ar comprimido usado no início do projeto.....	43
Figura 4.2 – Exemplo da identificação de uma fuga de ar comprimido com o detetor de fugas ultrassónico	44
Figura 4.3 – Esquema dos custos e das poupanças associados a fugas: (a) não reparadas; (b) reparadas.....	46
Figura 4.4 – Esquema representativo do procedimento de seguimento de fugas de ar comprimido final	48
Figura 4.5 – Status das fugas de ar comprimido do 2º semestre 2019, 1º semestre 2020 e a previsão para o 2º semestre 2020.....	49
Figura 4.6 – Localização da linha de produção da área ESD com queda de pressão.....	51
Figura 4.7 – Linha de produção da área ESD com queda de pressão. A cor de laranja, estão assinaladas as máquinas com problemas	52
Figura 4.8 – Modelação do estado inicial da linha de produção da área ESD com queda de pressão	52
Figura 4.9 – Modelação da alteração efetuada na linha de produção da área ESD com queda de pressão: adição do <i>booster</i> e acumulador	54
Figura 4.10 – Reformulação da tubagem das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão	57
Figura 4.11 – Projeto piloto: (a) vista global ; (b) localização da válvula.....	58

Figura 4.12 – Valores médios de pressão, medidos nas linhas de distribuição de ar comprimido	62
Figura 4.13 – Valores médios de pressão, medidos nas entradas de ar comprimido das máquinas	63
Figura 4.14 – Rede de distribuição de ar comprimido da área ESD, zonas B1 a D3	64
Figura 4.15 – Proposta de melhoria da rede de distribuição de ar comprimido da área ESD, zonas A1 a D3	64
Figura I.1 – Caudalímetros usados para a medição dos consumos das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão: (a) alcance de 0 a 100 L/min; (b) alcance de 50 a 5000 L/min.....	90
Figura J.1 – Excerto do catálogo de tubagem da Festo [33]	93
Figura J.2 – Excerto do catálogo de tubagem da AIRNet [34].....	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classes de pureza do ar comprimido. Adaptado de: [1,20]	22
Tabela 3.1 – Características dos compressores [28].....	30
Tabela 3.2 – Características dos filtros de partículas sólidas [29]	32
Tabela 3.3 – Características dos secadores [31]	33
Tabela 3.4 – Características dos filtros de coalescência [29]	33
Tabela 3.5 – Características do reservatório	34
Tabela 3.6 – Planeamento das manutenções preventivas internas e externas de cada um dos equipamentos da central de ar comprimido	38
Tabela 3.7 – Consumos energéticos e custos associados à produção de ar comprimido nos meses de fevereiro a junho.....	39
Tabela 4.1 – Parâmetros do detetor de fugas que têm de se alterados previamente e durante a auditoria	43
Tabela 4.2 – Pressões das máquinas com o erro de queda de pressão (10 e 13) com e sem produção	53
Tabela 4.3 – Pressões das máquinas com o erro de queda de pressão (10 e 13) com e sem produção na situação atual: adição do <i>booster</i> e acumulador.....	54
Tabela 4.4 – Consumos máximos das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão, obtidos durante a produção de cinco peças, e para fugas.....	55
Tabela 4.5 – Diâmetros normalizados atuais e ideais da tubagem de alimentação das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão	56
Tabela 4.6 – Material necessário para a alteração da rede de distribuição da área ESD.....	65
Tabela A.1 – Valores de caudal e capacidade debitados e médias de ambos os compressores	77
Tabela A.2 – Conversão dos valores de caudal e energia elétrica para o período diário.....	78
Tabela I.1 – Consumos máximos das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão, obtidos durante a produção de cinco peças e para fugas.....	91
Tabela J.1 – Diâmetros interno e normalizado das tubagens das baixadas da situação inicial	92
Tabela J.2 – Diâmetros interno e normalizado das tubagens de alimentação da situação inicial	93

Tabela L.1 – Valores de pressão das linhas de distribuição de ar comprimido e a respetiva média.....	95
Tabela L.2 – Valores de pressão das entradas de ar comprimido das máquinas e a respetiva média.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
EPI	Equipamento de proteção individual
ESD	<i>Electro Static Discharge</i>
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
FAD	<i>Free Air Delivery</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PDCA	<i>Plan Do Check Act</i>
PL	<i>Product Leader</i>
REN	Redes Energéticas Nacionais
SAP	<i>Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung</i>

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação enquadra-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho e nas necessidades de otimização do sistema de ar comprimido da *BorgWarner Viana*.

Este capítulo descreve o enquadramento, a motivação, a empresa, os objetivos, os contributos do trabalho e a organização da dissertação.

1.1. Enquadramento

Atualmente, o elevado nível de automatização dos processos industriais, a necessidade de alta fiabilidade e disponibilidade total dos equipamentos, originam elevados consumos de energia [1]. A nível industrial, a eletricidade é a forma de energia mais utilizada, seguindo-se o ar comprimido [2].

O ar comprimido é transversal a toda a indústria devido à segurança, versatilidade e produtividade que garante, pelo que é considerado uma das fontes de energia mais importantes a nível industrial. Em muitos casos, chega a ser tão relevante que pode comprometer o funcionamento da produção. Em contrapartida, necessita de energia elétrica para ser produzido e tratado, ao invés de ser adquirido pronto a ser utilizado, tal como acontece, por exemplo, com a eletricidade. Por esse motivo é um recurso oneroso, que pode representar entre 5% e 20% dos custos globais da energia elétrica.

Devido à particularidade de ser dispendioso, o ar comprimido deve ser, por um lado usado de forma racional e apenas quando é imprescindível a sua utilização e, por outro ser sujeito a ações de gestão energética [3]. A gestão da energia deve ser suportada pela realização sistemática de diagnósticos energéticos às instalações consumidoras e concretizada em planos de atuação e de investimento que têm como finalidade a redução dos consumos e, conseqüentemente, a redução da fatura energética [4].

Deste modo, procura-se alcançar um sistema de ar comprimido energeticamente otimizado, ou seja, que garanta a produção de ar comprimido necessária, com o mínimo consumo energético, tendo em conta o parque de máquinas existente [1].

Nos dias que correm, a indústria automóvel carece de soluções personalizadas, cada vez mais complexas, com maior qualidade, menor custo e no menor tempo possível, o que torna o setor cada vez mais competitivo. Por essa razão, é fundamental que as empresas se adaptem e que estejam constantemente a evoluir, procurando a melhoria contínua, de forma modesta, mas constante.

Neste contexto, sendo a *BorgWarner Emission, Thermal & Turbo Systems* parte interessada na procura da melhoria contínua, surge a necessidade de acompanhamento ao sistema de ar comprimido com o objetivo de desenvolver melhorias que permitam otimizá-lo.

1.2. Motivação

A otimização dos sistemas de ar comprimido é imperativa para reduzir custos energéticos e, dessa forma, contribuir para a sustentabilidade. Através da monitorização dos sistemas de ar comprimido, é possível controlar os custos associados à produção e manter o sistema na sua máxima eficiência energética e, conseqüentemente, contribuir para o aumento da fiabilidade e do desempenho do sistema. Além disso, com a redução do consumo de energia elétrica é ainda possível minimizar as emissões equivalentes de CO₂ e, por conseguinte, minimizar também o impacto ambiental. Só desta forma é possível garantir uma produtividade sustentável [1].

A *BorgWarner* dispõe das principais práticas de monitorização do sistema de ar comprimido, nomeadamente medidas de segurança da sala de produção de ar comprimido, controlo diário e manutenção preventiva dos equipamentos, acompanhamento dos consumos, monitorização das fugas e eletroválvulas de seccionamento. Contudo, dada a necessidade de melhoria contínua, considerou-se que seria pertinente otimizar o procedimento de monitorização de fugas e analisar tanto a queda de pressão nas linhas de produção como a rede de ar comprimido, de modo a economizar ao máximo o recurso.

A exigência do setor automóvel implica não só dinamismo no dia a dia, mas também a constante evolução dos colaboradores, de forma a acompanhar todo o progresso. A *BorgWarner* além de possuir todas essas particularidades, por ser uma empresa do ramo automóvel, tem como lema um mundo limpo e eficiente, o que a torna diferenciadora, pois essa consciencialização é crucial, nos dias que correm. Além disso, a empresa preza, acima de tudo, pela segurança e pelo bem-estar dos colaboradores, constituindo um ambiente de trabalho notável.

1.3. Empresa

O grupo Americano *BorgWarner Inc* é líder global no fornecimento de componentes e peças para a indústria automóvel. A história iniciou-se em 1928 com a união das empresas *Borg & Beck*, *Marvel-Schebler*, *Warner Gear* e *Mechanics Universal Joint*. Atualmente, está sediado em Auburn Hills no estado de Michigan dos Estados Unidos da América.

Na Figura 1.1 encontra-se representado o logótipo do grupo *BorgWarner Inc* [5].



Figura 1.1 – Logótipo da *BorgWarner* [5]

Em 2019 a *BorgWarner* contou com 29000 funcionários repartidos por 67 localizações em 19 países, distribuídos praticamente de forma uniforme pela Europa, América e Ásia, e teve um volume de vendas de 9,37 biliões de euros. A vasta dispersão geográfica vai ao encontro da ideologia da *BorgWarner* em ser parceira dos clientes para oferecer a tecnologia certa com o valor certo no momento certo [5].

A organização tem como missão continuar a ser líder em sistemas de propulsão para veículos de combustão, híbridos e elétricos, tendo em vista um mundo com energia limpa e eficiente [5]. Na Figura 1.2 encontram-se representados os diversos produtos produzidos pelo grupo *BorgWarner*.



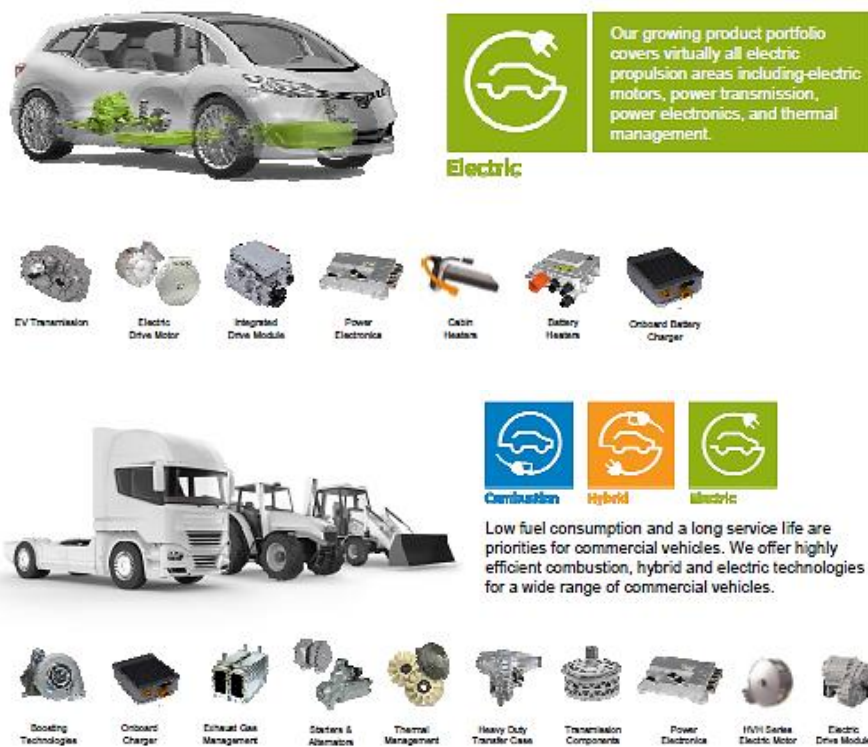


Figura 1.2 – Produtos para veículos ligeiros de combustão, híbridos, elétricos e veículos pesados de combustão, híbridos e elétricos, respetivamente, produzidos pelo grupo *BorgWarner* [5]

O grupo *BorgWarner* divide-se em quatro áreas:

- *Power Drive Systems;*
- *Emissions, Thermal and Turbo Systems;*
- *Morse Systems;*
- *Transmission Systems* [5].

A *BorgWarner* Viana pertence à área *Emissions, Thermal and Turbo Systems*. Esta área está igualmente dispersa geograficamente, contando com 7 localizações na América, 10 na Europa/África e 7 na Ásia.

A *BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems* foca-se em três grandes áreas:

- Sistemas de controlo de gases de escape;
- Sistemas de controlo de temperatura;
- Tecnologia de ignição.

Em Portugal a história iniciou-se em 2010 quando a empresa DYTECH ENSA – Portugal, Produção de Componentes Automóveis Unipessoal Lda foi adquirida pela *BorgWarner Inc*,

passando a denominar-se por *BorgWarner Emissions & Thermal Systems Portugal Unipessoal, Lda* [5].

De modo a satisfazer não só a crescente procura das tecnologias *BorgWarner*, mas também a expansão e o crescimento a longo prazo do grupo, a empresa deparou-se com a necessidade de aumentar as suas instalações. Em maio 2014 foi iniciada a transferência da fábrica de Valença para o Parque Empresarial de Lanheses em Viana do Castelo que ficou concluída em abril de 2015. Na Figura 1.3 pode-se observar a localização geográfica da empresa bem como a entrada principal das instalações [5].



Figura 1.3 – Localização geográfica da empresa *BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems Portugal* e a entrada principal [5]

Em Viana do Castelo a fábrica passou a ter 15000 m² de espaço produtivo, que representou um aumento de mais de metade da área produtiva da fábrica de Valença, e uma área total de 56000 m² [5]. Na Figura 1.4 está representado o *layout* da empresa com as diferentes áreas identificadas.



Figura 1.4 – *Layout* das instalações *BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems Portugal* [5]

A unidade fabril de Portugal possui quatro áreas de linhas de produção – *coolers*, tubos, válvulas e eletrónica – que estão representados na Figura 1.5.



Figura 1.5 – Produtos fabricados na *BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems Portugal* [5]

A tecnologia EGR caracteriza-se pelo reaproveitamento de gases de escape, ou seja, os gases que seriam libertados para o meio ambiente são introduzidos novamente no motor para que voltem a ser utilizados. Desta forma, é possível reduzir consideravelmente a quantidade de emissões e o consumo de combustível, assim como tornar os veículos mais eficientes [5].

As linhas de produção são identificadas, primeiramente, com o número “7” que diz respeito à sétima fábrica da *BorgWarner Emissions, Thermal and Turbo Systems (BorgWarner Viana)*, depois pela inicial do tipo de produto que produz, ou seja, “C” para os *coolers*, “T” para os tubos, “V” para as válvulas e “E” para a eletrónica e, por fim, o número da linha, por exemplo, “01” que indica que é a primeira linha daquele tipo de produto. Cada linha de produção tem um *Product Leader* responsável.

As linhas de produção de válvulas e de eletrónica, uma vez que produzem componentes sensíveis que podem ser destruídos pelas descargas eletrostáticas, têm de estar localizadas numa área ESD, onde as condições de humidade e temperatura são controladas. Além disso, as pessoas têm de usar equipamento adequado, nomeadamente bata, luvas e calçado antiestáticos que permitem a dissipação da carga para o solo.

A *BorgWarner Viana* possui uma vasta carteira de clientes, tanto OEM como de *aftermarket*. Na Figura 1.6 encontram-se discriminados os clientes.



Figura 1.6 – Clientes da *BorgWarmer Viana* [5]

1.4. Objetivos

O principal objetivo deste projeto de dissertação consiste na elaboração de propostas de melhoria que permitam economizar ao máximo o ar comprimido. Para alcançar o objetivo principal, foram definidos os objetivos parciais:

- Incluir o detetor de fugas ultrassónico nas auditorias de fugas de ar comprimido;
- Otimizar o procedimento de monitorização de fugas de ar comprimido;
- Monitorizar as fugas de ar comprimido;
- Controlar os consumos da central de ar comprimido;
- Analisar a queda de pressão nas linhas de produção;
- Analisar a rede de ar comprimido.

1.5. Contributos do trabalho

A empresa tem implementado um procedimento de monitorização das fugas de ar comprimido que consiste em detetar, identificar, reparar, verificar, atualizar e enviar o status aos responsáveis.

As etapas de deteção e verificação passaram a ser realizadas com o auxílio do detetor de fugas ultrassónico que permite identificar o caudal e os custos das fugas. Em função dessa alteração, foi desenvolvida documentação de gestão. A execução da monitorização permitiu testar as sugestões de melhoria *in loco* e, assim, otimizar o procedimento, sensibilizar o pessoal técnico e analisar os caudais e os custos associados às fugas de ar comprimido. Atualmente, as fugas não reparadas representam 5% da produção de ar comprimido. Alcançou-se um proveito de

4300 € com a mitigação de 68% das fugas e, até ao final do ano, ainda é possível economizar 1700 € com os restantes 32% de fugas não reparadas. Até ao momento, foram gastos 2100 € em fugas. De modo a garantir o seguimento do tema, foi criado um plano de auditorias e foram desenvolvidas as ferramentas necessárias.

No que diz respeito à queda de pressão, tinha sido detetado um problema deste tipo numa linha de produção. O problema foi corrigido e foram sugeridas soluções tanto para colmatar no imediato, caso se repita noutra linha de produção, como para prevenir a longo prazo. Além disso, foi criado um procedimento de resolução que permite tratar a anomalia de uma forma rápida e eficaz. Também foram sugeridas melhorias na cláusula pneumática do caderno de encargos.

Quanto à rede de ar comprimido, foi criado um plano de manutenção preventiva e verificou-se que a queda de pressão é admissível. Contudo, foi sugerida uma alteração na zona mais crítica.

1.6. Organização da dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos.

No capítulo 1 introduz-se o tema com o enquadramento do problema, a motivação que desencadeou o projeto, a empresa onde foi desenvolvido, os objetivos a alcançar, os contributos do trabalho e, por fim, a organização da dissertação.

No capítulo 2 expõe-se a revisão teórica necessária à compreensão da dissertação. Os temas abordados são as fontes de energia, o ar comprimido, a eficiência dos sistemas de ar comprimido e as ferramentas da gestão da qualidade.

No capítulo 3 descreve-se a situação inicial da central de ar comprimido e as respetivas medidas que estão implementadas.

No capítulo 4 descreve-se o trabalho desenvolvido e as propostas de melhoria referentes a fugas de ar comprimido, à queda de pressão nas linhas de produção e à rede de ar comprimido.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões finais e sugere-se trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata a revisão bibliográfica necessária para a compreensão dos conceitos que serviram de base e auxiliaram a concretização da dissertação, nomeadamente fontes de energia, ar comprimido e metodologias de resolução de problemas.

2.1. Fontes de Energia

As fontes de energia podem ser definidas como um sistema que contem energia armazenada que pode ser transferida para outro sistema e classificam-se de acordo com a transformação ou quanto ao tipo de fonte [6].

2.1.1. Transformação

Sob o ponto de vista de transformação, as fontes de energia classificam-se em primárias, produtos energéticos oriundos da natureza na sua forma direta como, por exemplo, sol, água, vento, madeira, petróleo, gás natural, carvão mineral, minério de urânio, e em secundárias, que são obtidas através de um processo de transformação das fontes primárias em formas mais adequadas para os diferentes usos, nomeadamente óleos diesel e combustível, gasolina, eletricidade, carvão vegetal. Em alguns casos, as fontes de energia secundária podem ser sujeitas a novos processos de transformação, como acontece com a eletricidade, para se obter o ar comprimido.

Os consumidores recebem a energia final sob a forma primária ou secundária. Essa energia só é final do ponto de vista do setor energético, dado que representa a forma em que a energia é comercializada. Os consumidores usam somente uma parte da energia final, denominada por energia útil, devido às perdas dos processos de transformação, transporte, distribuição, armazenamento. Por isso esses procedimentos devem ser evitados ao máximo. Na Figura 2.1 encontra-se representado um esquema dos processos que a energia primária sofre até chegar ao consumidor final [7,8].

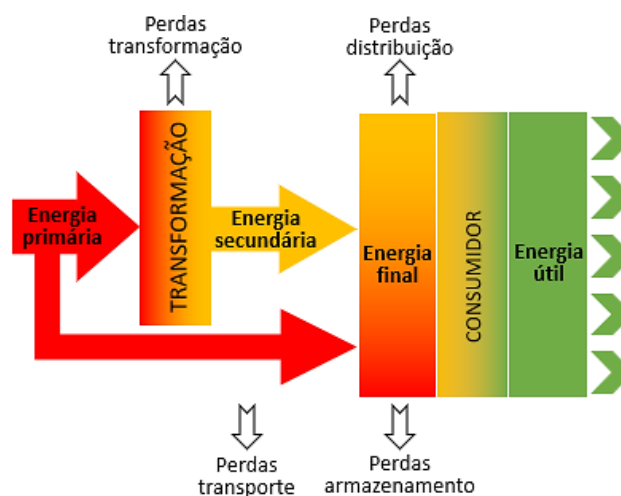


Figura 2.1 – Transformação das fontes de energia até ao uso final. Adaptado de: [8]

2.1.2. Tipo de Fonte

Relativamente ao tipo de fonte, as energias podem ser classificadas como renováveis ou não renováveis. As renováveis são todas as que dependem do sol e, como tal, podem ser inesgotáveis ou renovadas num curto espaço de tempo espontaneamente ou com a intervenção humana, nomeadamente sol, água, vento e biomassa. Contrariamente, as não renováveis encontram-se na natureza em quantidades limitadas, uma vez que o seu processo de formação é muito lento, comparado com o ritmo a que a humanidade as consome, designadamente os combustíveis fósseis – petróleo, carvão, gás natural [9].

2.1.3. Produção de Eletricidade

De acordo com a REN, em Portugal, a utilização de recursos endógenos e renováveis para a produção de eletricidade tem aumentado e desempenham um papel cada vez mais determinante na satisfação do consumo. No período de 2010 até 2019, em média, as fontes de energia renováveis e os centros eletroprodutores térmicos fósseis contribuíram na mesma proporção para a produção de eletricidade, tal como se pode verificar na Figura 2.2 [10].

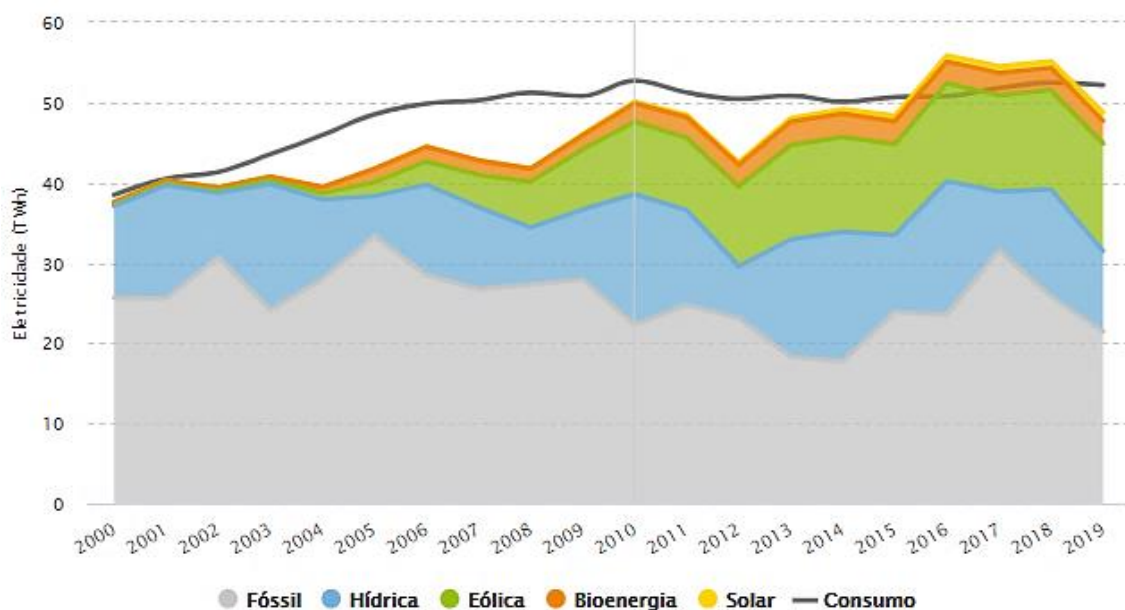


Figura 2.2 – Fontes de energia usadas na produção de eletricidade em Portugal nos últimos 19 anos [10]

Nos quatro primeiros meses do ano, segundo a REN, em Portugal, a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis foi de 72,1%, que corresponde a 12243 GWh, e os restantes 27,9%, que corresponde a 4740 GWh, foram resultado dos centros eletroprodutores térmicos fósseis, tal como se pode verificar na Figura 2.3 [10].

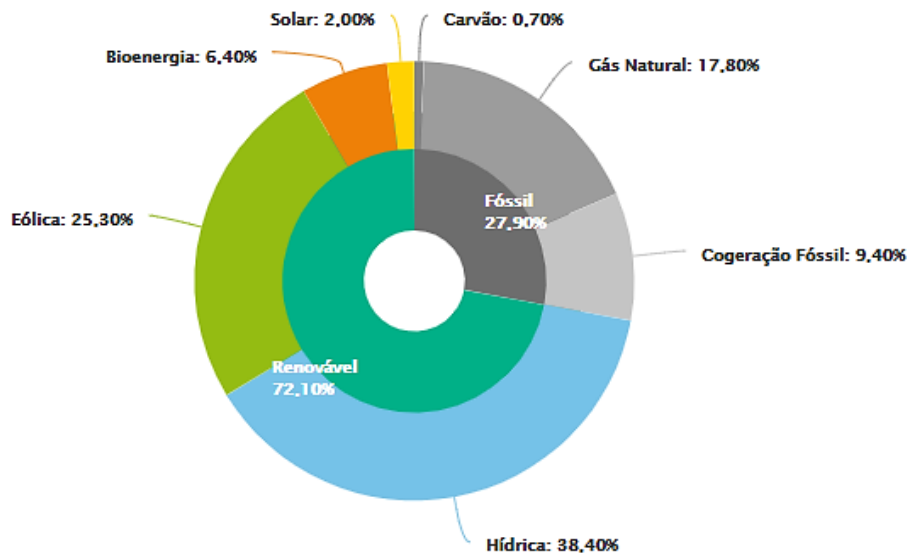


Figura 2.3 – Fontes de energia usadas na produção de eletricidade em Portugal nos quatro primeiros meses de 2020 [10]

O consumo de energia elétrica associado à produção de ar comprimido ronda os 2,8 TWh/ano, que equivale a 20% do consumo total, na indústria Portuguesa e os 80 TWh/ano, que corresponde a mais de 10% do consumo total, na indústria Europeia [1].

2.1.4. Pneumática

A pneumática pode-se definir como a ciência e a tecnologia que usa o ar ou gases neutros como meios de transmissão de potência [11]. De uma forma geral, a pneumática pode ser representada esquematicamente pela Figura 2.4.

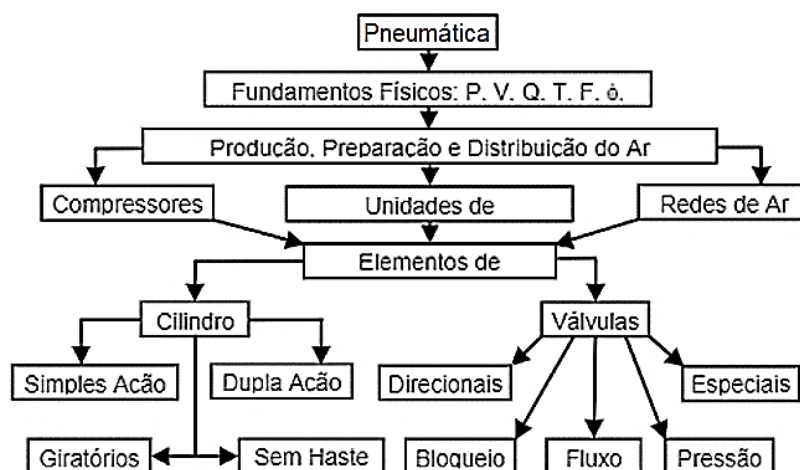


Figura 2.4 – Esquema da pneumática: etapas e elementos [11]

As grandes vantagens da pneumática prendem-se com a inexistência de custos em relação ao fluido de trabalho e a sua abundância, quando é usado o ar atmosférico, bem como a

facilidade de condução e armazenamento do gás. Além disso, a pneumática apresenta a capacidade de gerar vácuo e de executar movimentos rápidos. Quando comparada com a hidráulica, a pneumática é uma energia mais segura, com maior rendimento e os custos de obtenção dos componentes são mais reduzidos, no entanto alcança forças mais baixas [11,12,13]. Por todas essas razões, a pneumática é utilizada em diversas áreas, nomeadamente hospitalar, dentária, oficinas mecânicas e diversos setores da indústria [1,14,15].

Em contrapartida, os processos de produção, tratamento, distribuição e manutenção do ar comprimido representam um elevado custo devido ao facto do ar comprimido ser uma fonte de energia indireta, isto é, que depende de outra para ser obtido. Outra contrariedade desta tecnologia é o escape do fluído de trabalho que, além de causar ruído, representa também um desperdício de energia, que pode ser causado pela existência de um furo ou pela fraca vedação da tubagem. Ainda assim o escape do fluído não causa poluição ambiental, uma vez que é lubrificado com óleo mineral. Além disso, o facto do ar ser compressível impede que a pneumática seja utilizada em situações que seja necessário velocidade uniforme e constante [11,12,13].

2.2. Ar Comprimido

O ar atmosférico por si só não é capaz de efetuar transmissão de potência, quer isto dizer que tem de se lhe fornecer trabalho para aumentar a sua energia interna, isto é, para torná-lo comprimido [16].

2.2.1. Constituição do Ar

O ar atmosférico é uma mistura de vários gases que se particulariza por ser incolor, inodora e insípida. Os seus principais constituintes são o azoto (78%) e o oxigénio (21%), o restante 1% são outros gases, nomeadamente árgon, néon, hélio, metano, dióxido de carbono, monóxido de azoto, hidrogénio e ozono. Esta composição é aproximadamente constante desde o nível do mar até uma altitude de 25 km. Além destes elementos, o ar pode ser mais ou menos contaminado, de local para local, com partículas sólidas, tais como poeiras ou fibras, com partículas no estado líquido, nomeadamente aerossóis, névoas ou neblinas e ainda com partículas no estado gasoso, especificamente gases ou vapores.

Noutra perspetiva, o ar pode ser considerado uma mistura de ar seco com vapor de água. A concentração máxima de vapor de água que o ar pode suportar, também conhecida como ponto de orvalho, aumenta com o incremento da temperatura, o que significa que a uma concentração máxima de vapor de água corresponde apenas a uma temperatura. Normalmente, o ar não contém a concentração máxima de vapor de água [1,17].

O ar possui a propriedade de elasticidade que permite que seja por um lado expandido, dado que não possui forma própria, e por outro comprimido, quando um dado volume é submetido a uma força exterior, reduzindo assim o seu volume inicial. Além disso, o ar mistura-se homogeneamente com outros gases, isto é, apresenta a característica de difusibilidade [1,11,13,17].

Os gases em geral são muito sensíveis a mudanças de pressão e temperatura. Por esse motivo, foram definidas condições de referência para o ar comprimido. Na Europa, a condição mais usada é o FAD, cujas condições são temperatura a 20°C, pressão a 1 bar e humidade relativa de 0% [1,14,17].

2.2.2. Instalação

A instalação de produção de ar comprimido pressupõe o uso de um motor, que converte a energia elétrica em energia mecânica, e de um elemento compressor, que utiliza a energia mecânica para comprimir o fluido de trabalho e, eventualmente, um controlador eletrónico. O processo de tratamento do ar comprimido, que envolve o arrefecimento, secagem e filtragem, garante a qualidade necessária do fluido de trabalho, requerida pelos consumidores [1]. Na Figura 2.5 encontra-se representada a instalação de ar comprimido.

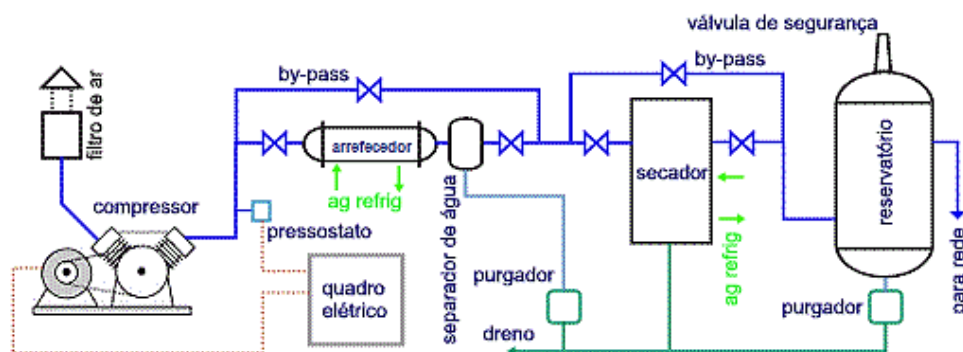


Figura 2.5 – Esquema da instalação de produção e tratamento de ar comprimido [12]

Na maioria dos casos, a instalação de ar comprimido centralizada é a melhor opção, no que respeita a custos de operação e manutenção, redundância e disponibilidade dos equipamentos, restrição de pessoal não autorizado, controlo do nível de ruído e ventilação do ar interior da sala.

No caso de haver um consumidor que necessite de pressão muito superior à pressão de regime, a produção de ar comprimido pode também ser descentralizada. Pode ser mais vantajoso dedicar um compressor a esse consumidor, ao invés de aumentar a pressão de serviço de toda a rede [1,17].

2.2.3. Produção

A produção de ar comprimido inicia-se com a compressão do gás. Para comprimir o ar existem vários tipos de compressores que se dividem em dois grandes grupos, dinâmicos e volumétricos, como se pode observar na Figura 2.6.

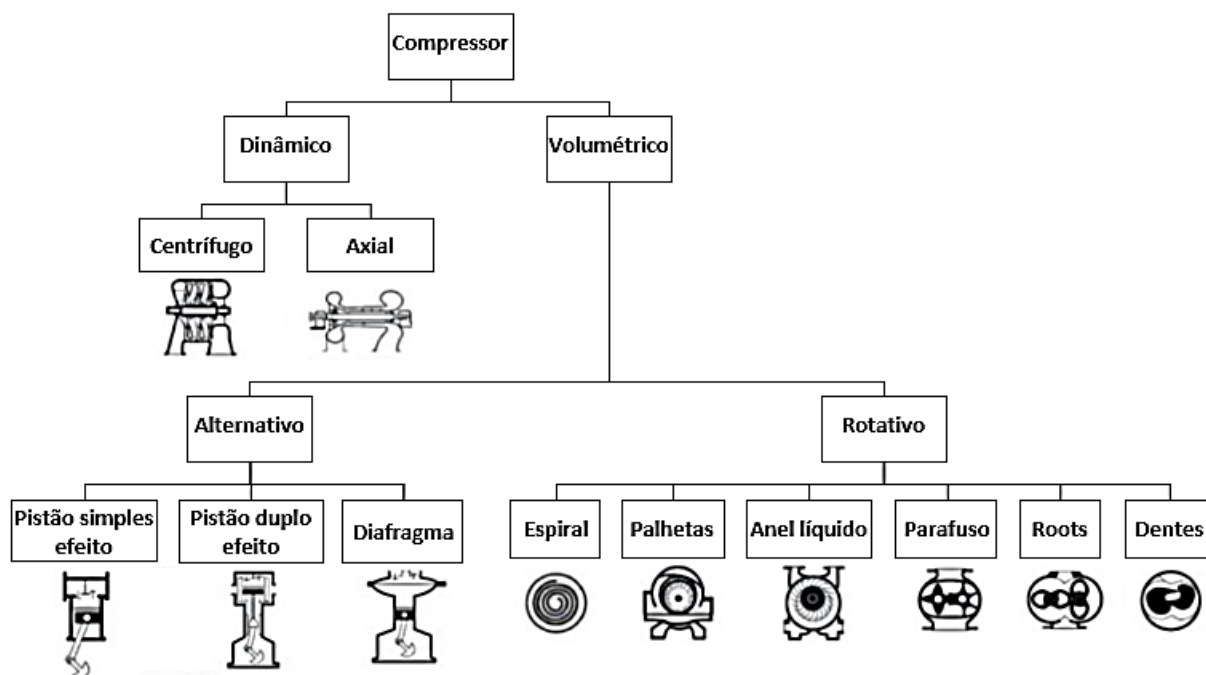


Figura 2.6 –Tipos de compressores. Adaptado de: [1,17]

Os compressores dinâmicos comprimem o ar comprimido através da conversão da energia cinética em energia potencial. A massa de gás é acelerada a altas velocidades num impulsor e, de seguida, é forçada a desacelerar ao ser expandida no difusor. Estes compressores podem ser de dois tipos, centrífugos ou axiais. Os compressores dinâmicos centrífugos são os mais comuns e são amplamente usados na indústria. Os compressores dinâmicos axiais conseguem

trabalhar a velocidades muito superiores e, por isso, garantem caudais mais elevados e constantes. Este tipo de compressores são mais pequenos e mais leves, quando comparados com os compressores centrífugos equivalentes.

Os compressores volumétricos comprimem o ar comprimido através da redução de volume do gás. O gás é admitido numa ou mais câmaras de compressão onde o volume é reduzido e, conseqüentemente, dá-se um aumento da pressão do gás. Estes compressores podem também ser de dois tipos, alternativos ou rotativos. Dentro dos compressores volumétricos alternativos, quanto à tecnologia de compressão, podem ser de pistão de simples efeito, de pistão de duplo efeito ou de diafragma. A nível industrial, os mais usados são os de pistão duplo efeito refrigerados a água, pois são os mais eficientes. Contudo, são grandes, ruidosos e mais caros, em comparação com os compressores volumétricos rotativos. Os compressores volumétricos rotativos possuem uma gama mais alargada de tecnologia de compressão, podendo ser em espiral, palhetas, anel líquido, parafuso (com ou sem lubrificação), *roots* ou dentes. A nível industrial, os mais usados são os de parafuso devido ao baixo custo inicial, fácil manutenção e de serem compactos. Estes compressores podem ser arrefecidos a ar ou a água.

De forma a corresponder aos requisitos do sistema de ar comprimido, a seleção do compressor pressupõe uma pressão adequada, um caudal suficiente para satisfazer as necessidades dos consumidores, o tipo de ar em conformidade com as exigências dos processos de fabrico e a eficiência energética.

O processo de compressão aumenta a concentração de vapor de água no ar. Para evitar danos nos equipamentos do sistema de ar comprimido e dos consumidores finais, é necessário que a água, resultante da condensação do vapor de água, seja removida. A secagem do ar comprimido é realizada por secadores, cujo princípio de secagem pode ser por refrigeração ou por adsorção.

Na Figura 2.7 estão esquematizados os princípios de funcionamento dos secadores de refrigeração em (a) e de adsorção em (b).

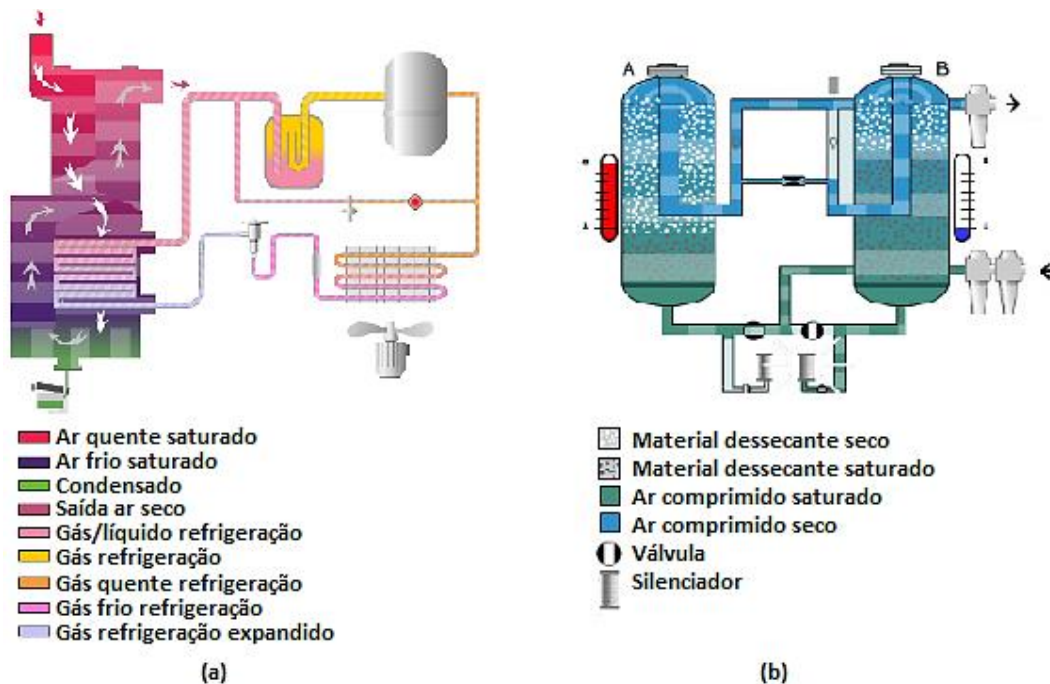


Figura 2.7 – Esquema do funcionamento dos secadores de: (a) refrigeração; (b) adsorção [1]

O princípio de secagem por refrigeração consiste num ciclo frigorífico, onde o arrefecimento do ar comprimido causa a condensação do vapor de água nele contido. Este método de secagem é limitado a valores de ponto de orvalho superiores a 0°C , uma vez que abaixo deste valor a água congela, impedindo a passagem do ar. Para otimizar o processo de secagem e maximizar a eficiência energética, o ar comprimido é aquecido à saída do secador, em contraciclo com o ar de entrada. Por outro lado, essa permuta de calor permite que o ar de entrada seja pré-arrefecido, minimizando a energia calorífica a retirar no evaporador.

O princípio de secagem por adsorção consiste na passagem do ar comprimido através de um material dessecante, normalmente sílica-gel, seiva molecular ou alumina ativada. Devido ao poder de atração das moléculas de água que estes materiais possuem, é possível adsorvê-las em grande quantidade e garantir pontos de orvalho extremamente baixos, entre -20 e -70°C .

Os fatores que influenciam a escolha do secador são o caudal, a temperatura e a pressão do ar comprimido. Caso o secador seja arrefecido a ar, a temperatura ambiente também deve ser tida em consideração.

Os contaminantes presentes no ar atmosférico, juntamente com os que surgem durante o processo de produção de ar comprimido, têm de ser removidos. Caso contrário, podem danificar ou até mesmo destruir tanto os equipamentos da central de produção como dos consumidores finais. Consoante as necessidades de qualidade do ar, podem ser usados dois ou mais níveis de filtragem. Normalmente, o primeiro nível de filtragem é realizado antes da compressão, cujo filtro remove as partículas com maior dimensão, e o segundo nível é efetuado depois do secador, onde são removidas as restantes partículas e os vapores remanescentes. Contudo, em instalações com compressores lubrificados, é comum a presença de óleos e hidrocarbonetos que têm de ser removidos para não danificar o secador.

Os condensados gerados em todo o processo são extremamente perigosos, uma vez que podem conter partículas de pó, hidrocarbonetos, dióxido de enxofre, cobre, chumbo, ferro e outros contaminantes. A condensação da água presente no ar comprimido ocorre maioritariamente no processo de secagem, no entanto, também pode ocorrer no compressor, nos filtros, no reservatório de ar ou na canalização e, por isso, são usadas purgas de drenagem de condensados, que podem ser manuais, automáticas, temporizadas ou eletrónicas. As purgas encaminham os condensados para uma central de tratamento, dado que não podem ser conduzidos diretamente para a rede de esgotos.

Após os processos de produção e tratamento, o ar comprimido é encaminhado para o reservatório, onde é armazenado com o intuito de compensar picos de consumo, atenuar variações de pressão, arrefecer o ar e remover condensados.

O reservatório de ar comprimido deve respeitar a pressão máxima de serviço do sistema de ar comprimido e, por segurança, deve suportar pelo menos um bar a mais do que a pressão máxima que os compressores têm capacidade de produzir. Estes equipamentos devem possuir, no mínimo, um manómetro, uma purga de condensados e uma válvula de segurança [1,12,13,14,15,17,18].

2.2.4. Distribuição

Posteriormente aos processos de produção e tratamento, o ar comprimido tem de ser distribuído até aos consumidores finais. A rede de distribuição de ar comprimido tem de garantir o mínimo de queda de pressão e de fugas e a separação de condensados.

A distribuição pode ser feita através de redes de circuito aberto ou de circuito fechado, conforme demonstrado na Figura 2.8.

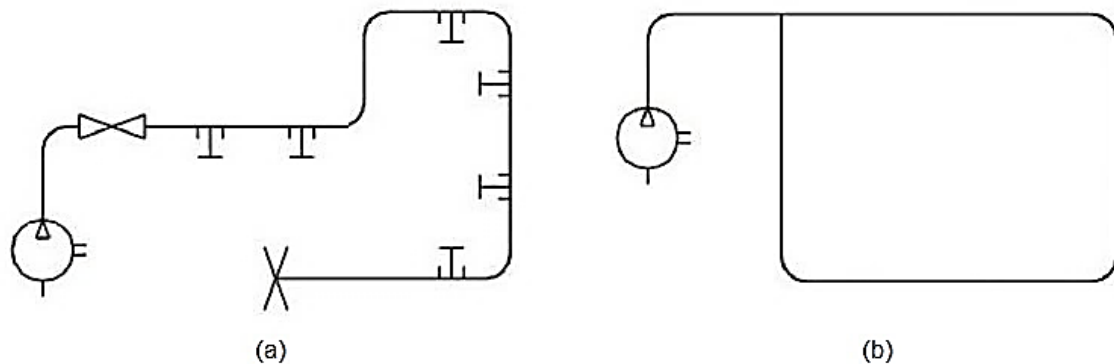


Figura 2.8 – Redes de distribuição de ar comprimido em: (a) circuito aberto; (b) circuito fechado [19]

Na rede de circuito aberto, o ar flui numa única direção, o que impossibilita uma alimentação uniforme em todos os pontos de consumo. Este tipo de rede é mais indicado para situações em que se deseja abastecer pontos isolados ou distantes. A rede de circuito aberto possui a vantagem de distribuir o ar comprimido no menor tempo possível, o que possibilita a redução da queda de pressão. Além disso, utiliza menos quantidade de tubo, economizando os custos. Em oposição, possui a desvantagem de falta de flexibilidade, no entanto a rede pode usar uma corrente de fluxo dividido, levando duas linhas separadas do compressor.

Na rede de circuito fechado, o ar flui nos dois sentidos, possibilitando que todos os pontos de consumo sejam alimentados de forma uniforme e que haja redução do problema de condensação. Este tipo de rede é normalmente usado na maioria das indústrias, uma vez que permite a distribuição do ar comprimido por toda a extensão da fábrica e ainda permite que sejam instalados novos pontos de consumo com facilidade. Além disso, é possível seccionar a rede através de válvulas de fecho de linha, permitindo a realização de inspeção ou manutenção simultaneamente com o funcionamento da restante rede.

É fundamental que as redes de distribuição de ar comprimido sejam corretamente dimensionadas, de forma a garantir tanto uma baixa queda de pressão como o mínimo de fugas entre o compressor e o ponto de consumo.

A rede de distribuição de ar comprimido é composta por linhas principais, secundárias e de alimentação. À linha principal são ligadas várias linhas secundárias que estabelecem ligações com as linhas de alimentação, tal como pode ser observado na Figura 2.9.

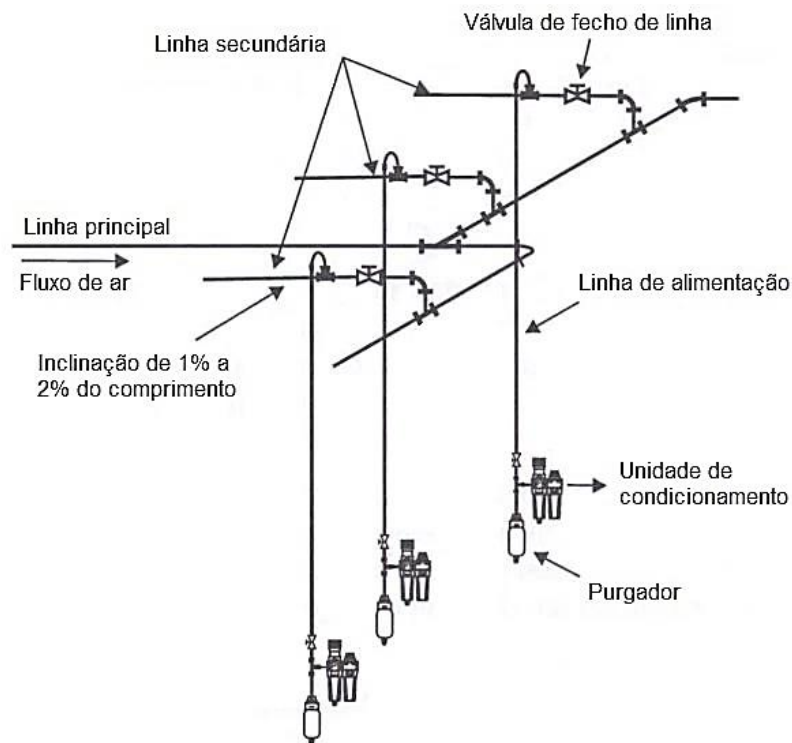


Figura 2.9 – Rede de distribuição do ar comprimido [13]

A linha secundária deve possuir inclinação, no sentido do fluxo, de 1% a 2% do comprimento total do tubo para facilitar a retirada de condensações e impurezas. Após a ligação, que deve ser feita pela parte superior da linha anterior, existe uma válvula de fecho de linha. Nas linhas de alimentação, previamente à ligação ao equipamento, no local mais baixo da tubagem, existe um purgador para eliminar a água condensada e uma unidade de condicionamento, que garante que o ar seja fornecido seco, limpo e com a pressão e a lubrificação corretas. Mesmo com o tratamento prévio a que o ar comprimido é sujeito para retirar a água, é necessário utilizar purgadores nas linhas de alimentação, pois o ar que fica retido na rede sofre pequenas condensações devido às diferenças de temperatura e pressão, principalmente durante os meses de inverno [1,11,13,13,16].

As canalizações da rede de distribuição podem ser de aço ao carbono, aço inoxidáveis ou de alumínio, dependendo do meio ambiente, da temperatura ambiente e das especificações da qualidade do ar. Os aços ao carbono são usados em indústrias pesadas, onde a qualidade do ar não é tão exigente. Contrariamente, os aços inoxidáveis são indicados para indústrias mais rigorosas, tal como a farmacêutica, alimentar e eletrónica. As tubagens em alumínio com acessórios de cravar são usadas em instalações industriais, devido à simplicidade e rapidez que oferecem [1].

2.2.5. Parâmetros de Qualidade

Atualmente, existem três normas relacionadas com qualidade e teste do ar comprimido, nomeadamente ISO 8573, ISO 12500 e ISO 7183. A mais utilizada é a ISO 8573, em particular ISO 8573-1:2010, que classifica o ar comprimido em sete classes de pureza. As classes definem o tamanho e as concentrações de partículas sólidas, o máximo conteúdo admissível de água e óleo, tal como se pode verificar na Tabela 2.1 [1,20].

Tabela 2.1 – Classes de pureza do ar comprimido. Adaptado de: [1,20]

Classe de qualidade	Partículas sólidas			Água		Óleo
	0,1-0,5 [$\mu\text{m}/\text{m}^3$]	0,5-1,0 [$\mu\text{m}/\text{m}^3$]	1,0-1,5 [$\mu\text{m}/\text{m}^3$]	Temperatura condensação [°C]	Vapor de água [g/m ³]	Concentração máxima [mg/m ³]
0	Especificado pelo utilizador ou fornecedor do equipamento e mais rigorosa do que a classe 1					
1	≤ 20 000	≤ 400	≤ 10	≤ -70	≤ 0,003	≤ 0,01
2	≤ 40 000	≤ 6 000	≤ 100	≤ -40	≤ 0,119	≤ 0,1
3	-	≤ 90 000	≤ 1000	≤ -20	≤ 0,884	≤ 1
4	-	-	≤ 10 000	≤ 3	≤ 5,95	≤ 5
5	-	-	≤ 100 000	≤ 7	≤ 7,75	-
6	-	-	-	≤ 10	≤ 9,40	-

O princípio de designação das classes de pureza devem conter a informação sob a forma ISO 8573-1:2020 [A:B:C].

Onde:

- A – Classe que traduz o nível máximo de contaminação de partículas sólidas;
- B – Classe que traduz a concentração máxima admitida;
- C – Classe que faz referência à quantidade de óleos e hidrocarbonetos presentes [20].

2.2.6. Custos

Os custos de produção e tratamento do ar comprimido são os que representam mais peso na totalidade dos custos, uma vez que para esta etapa é utilizada energia elétrica. De seguida, é o investimento inicial e, por fim, a manutenção, tal como se pode verificar na Figura 2.10 [1,17].

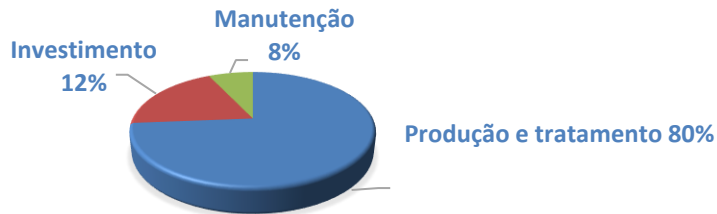


Figura 2.10 – Custos associados ao ar comprimido. Adaptado de: [1,17]

2.3. Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido

A eficiência dos sistemas de ar comprimido depende da seleção adequada do compressor, da localização da central de compressores, o nível de qualidade do ar, o controlo de fugas, as perdas de carga, a minimização da pressão de serviço da rede, a manutenção adequada dos equipamentos, a sensibilização de todos os utilizadores para o uso correto do ar comprimido e a implementação de práticas de monitorização de consumos [1].

2.3.1. Fugas

As fugas de ar comprimido, apesar de não serem um risco para a segurança, representam uma perda significativa, em média, cerca de 10 a 15% do consumo de ar comprimido, podendo rondar os 25 a 40%, em algumas instalações. Por essa razão, é fundamental que haja um programa regular de verificação e mitigação de fugas. Além disso, é importante que os operadores informem os responsáveis, quando detetam fugas.

As fugas ocorrem em qualquer parte do sistema, contudo existem zonas problemáticas para o seu aparecimento, nomeadamente ligações, vedantes, válvulas, ligações rápidas, acessórios e terminais. É essencial que todas estas zonas sejam verificadas nas auditorias [1,15].

As práticas comuns de deteção de fugas são bastante primitivas e pouco eficientes para locais ruidosos e de difícil acesso. Um dos métodos consiste em ouvir sons sibilantes, que muitas vezes são dificilmente audíveis em ambiente industrial e, além disso, há alguns que o ouvido humano nem tem capacidade de ouvir. O segundo método consiste em pulverizar espuma de sabão na área onde se suspeita que haja fuga, caso se formem bolhas significa que existe fuga. No entanto, este método gera sujidade e desencadeia um perigo devido à superfície escorregadia [1].

Para facilitar a localização das fugas, existem detetores de fugas ultrassônicos, tal como o que se encontra na Figura 2.11.



Figura 2.11 – Detetor de fugas ultrassónico LD 500 com: (a) trompete acústico e fones; (b) tubo de foco [21]

A turbulência do ar comprimido que se escapa nas fugas, gera ultrassons. O aparelho deteta esses ultrassons e converte-os em sons audíveis que podem ser escutados, através dos auscultadores que se ligam ao detetor, permitindo assim que sejam detetadas fugas em meios ruidosos e que não seriam detetadas com os métodos mencionados anteriormente.

O detetor de fugas indica a intensidade do som gerado pela fuga, que é expressa por uma escala de cores desde verde até vermelho, o caudal e o custo anual da fuga, ou seja, a quantidade de ar comprimido que é desperdiçado através da fuga [21,22].

2.3.2. Perdas de Carga

As perdas de carga são consequência direta do aumento de velocidade do fluído no interior da tubagem, ou seja, são introduzidas pela tubagem, acessórios e geometria da rede de distribuição. Estas perdas devem ser tidas em consideração porque, para além de terem um custo significativo, estão presentes durante todo o ciclo de vida da instalação e implicam que o compressor produza ar a uma pressão suficientemente elevada para fazer face a essas perdas e ainda atingir a pressão mínima de operação dos consumidores finais.

Normalmente, a produção tende a aumentar ao longo do tempo e, conseqüentemente, incrementam também os consumos. Esse crescimento, é naturalmente acompanhado por alterações dos *layouts* das instalações que não são previstos no projeto inicial e que são disformes. Por isso é extremamente importante controlar regularmente as perdas de carga.

Sempre que sejam adicionados novos equipamentos, deve-se verificar a necessidade de efetuar alterações na rede ou na instalação [1,17].

2.4. Ferramentas da Gestão da Qualidade

A gestão da qualidade apresenta uma metodologia de análise que se baseia na integração de técnicas e ferramentas que contribuem para a tomada de decisão fundamentada. As ferramentas da gestão da qualidade têm como função auxiliar no diagnóstico, análise e prognóstico de problemas organizacionais e, por isso, são extremamente úteis na resolução e no alcance da melhoria contínua dos processos e dos respectivos resultados [23,24].

2.4.1. PDCA

A metodologia PDCA é usada pelas organizações para gerir processos ou sistemas, tendo em vista a melhoria contínua. O ciclo PDCA está dividido em quatro fases bem definidas e distintas que são projetadas para serem usadas de uma forma dinâmica, isto é, a conclusão de uma etapa irá fluir para o começo da etapa seguinte e assim sucessivamente. As fases consistem em planejar (*plan*), fazer (*do*), verificar (*check*) e agir (*act*).

- Planejar (*plan*): estabelecer os objetivos e os processos necessários para obter resultados de acordo com os requisitos.
- Fazer (*do*): implementar as ações estabelecidas no plano de ação definido na fase anterior.
- Verificar (*check*): verificar a eficácia das ações implementadas na fase anterior.
- Agir (*act*): se os resultados obtidos na etapa anterior foram satisfatórios deve-se padronizar os procedimentos implementados na fase “*do*”, caso contrário repetir todo o ciclo. Para padronizar o processo tem de se comunicar, dar formação e acompanhar, de forma a assegurar a continuidade [24,25,26].

2.4.2. 8D

A metodologia 8D corresponde a uma sequência de ações que prescrevem o modo como um problema deve ser resolvido e enfatiza a sinergia das pessoas envolvidas.

A metodologia 8D é composta por oito etapas:

1. Criar a equipa: a equipa deve ser multifuncional e constituída pelas pessoas que possuem os conhecimentos necessários para resolver o problema;
2. Descrever o problema: identificar detalhadamente o problema (Onde? Quando? O quê? Para quê? Quantos?);
3. Ação de contenção imediata: implementar ações de contenção do problema e acompanhar, por forma a evitar que os efeitos do problema atinjam o cliente;
4. Definir a causa raiz: identificação de todas as causas potenciais possíveis de terem contribuído para a ocorrência do problema.
5. Planear ações corretivas: desenvolver ações corretivas permanentes que eliminem totalmente a causa raiz.
6. Implementar ações corretivas: implementar e validar as ações corretivas, determinando os controlos para assegurar a eliminação da causa raiz;
7. Prevenir: prevenir a reincidência dos problemas através da modificação dos sistemas, procedimentos e práticas e determinar métodos para evitar que o problema volte a ocorrer;
8. Analisar o encerramento: concluir a análise, divulgar os resultados e congratular toda a equipa pelo sucesso atingido [27].

3. SITUAÇÃO ATUAL DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO DA EMPRESA

Neste capítulo descreve-se a situação inicial do sistema de ar comprimido, no que respeita à instalação da central, produção, distribuição, ao consumo de ar comprimido e às medidas que estão implementadas, nomeadamente de segurança, manutenção, monitorização dos consumos, eletroválvulas de seccionamento e monitorização de fugas.

3.1. Sistema de Ar Comprimido

O sistema de ar comprimido é constituído pela central, onde o ar comprimido é produzido e tratado, pela rede de distribuição e pelos consumidores finais.

3.1.1. Instalação

A central de ar comprimido é composta por dois compressores, quatro filtros, dois secadores e um reservatório. Na Figura 3.1 está representada a preto a instalação da sala de produção de ar comprimido, linhas 1 e 2, e a vermelho a possibilidade de instalação da terceira linha. Os equipamentos são iguais em ambas as linhas.

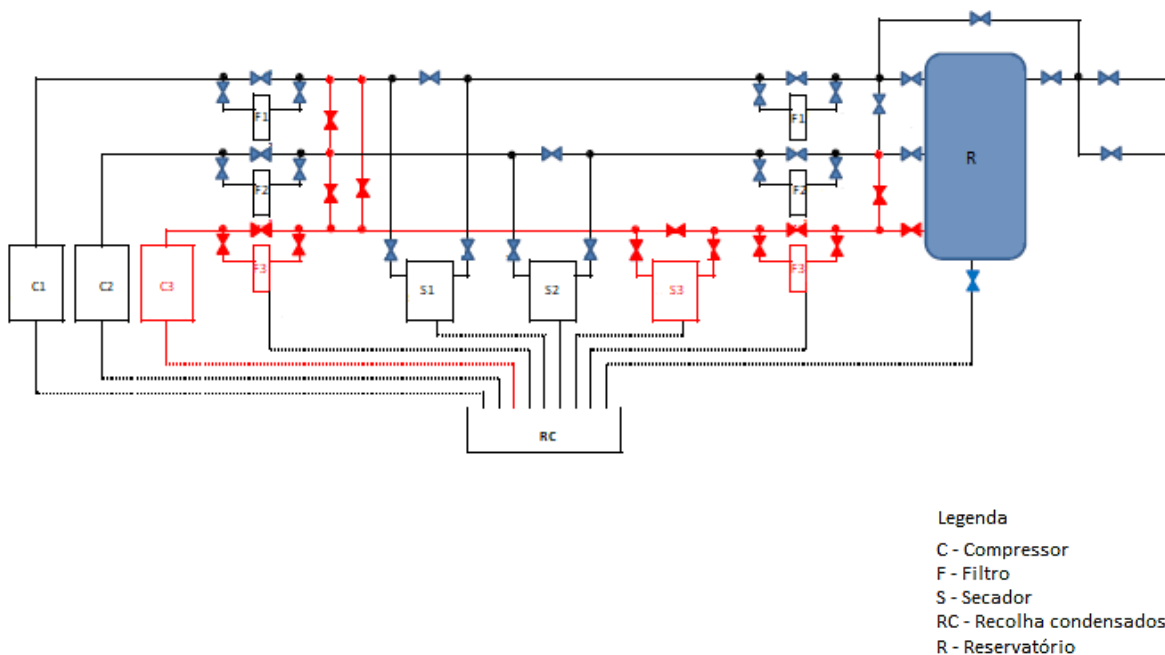


Figura 3.1 – Instalação da central de ar comprimido: a preto está representada a instalação atual, linhas 1 e 2, e a vermelho está representada a possibilidade de instalação de uma terceira linha

Os processos produtivos têm uma enorme dependência do ar comprimido e, por isso, existe redundância no que diz respeito aos equipamentos de produção e tratamento de ar comprimido, ou seja, caso o equipamento que está a funcionar avarie ou tenha algum problema rapidamente se aciona o segundo. Deste modo, é possível garantir que a produção seja interrompida o mínimo tempo possível ou de preferência que não o seja, salvaguardando assim a continuidade do negócio.

Os equipamentos da sala de produção de ar comprimido foram ligados em abril de 2014 e, desde então, eram usados um compressor, com *setpoint* 6,5-7,0 bar, um secador, dois filtros

e o reservatório. O funcionamento era alternado entre os dois compressores, os dois secadores e, conseqüentemente, os quatro filtros, para que as horas de funcionamento fossem repartidas de igual forma por todos os equipamentos. A partir de junho de 2019, devido ao aumento de produção na área ESD, a pressão de saída do compressor teve de ser alterada para 7,0-7,5 bar. No entanto, mesmo com o aumento da pressão, foi necessário, no mês seguinte, acionar o segundo compressor. Daí em diante, têm sido usados os dois compressores.

3.1.2. Produção

Os compressores são volumétricos, rotativos de parafuso lubrificado e com arrefecimento a ar por contacto. Quanto ao tipo de controlo, são de velocidade variada. Possuem um controlador e um sistema acionador que funcionam em conjunto para alternar a velocidade a que fornece ar comprimido à pressão alvo e a frequência de arranque. Os controladores monitoram continuamente o status dos compressores e agem imediatamente se ocorrer alguma falha [28]. Na Tabela 3.1 encontram-se as características de ambos os compressores.

Tabela 3.1 – Características dos compressores [28]

Equipamento	Compressor volumétrico rotativo de parafuso lubrificado
Marca	Ingersoll Rand
Modelo	Nirvana Standard R90-A10.0
Número de Série	UCV1003265
Pressão [bar]	4,5 – 10,0
Capacidade a 7 bar [m³/min]	8,0 – 18,9
Tipo de motor	Ímanes permanentes
Potência nominal do motor [kW]	90
Ano de fabrico	2014

O ar atmosférico que se encontra na vizinhança dos compressores passa pelo filtro de aspiração que possui um elemento filtrante do tipo seco que retém partículas com dimensões superiores a 3 µm. De seguida, o ar flui para a câmara de compressão onde é também injetado o lubrificante, a uma temperatura mínima de 60°C. O lubrificante tem como função lubrificar as partes móveis, remover o calor gerado no processo de compressão e atuar como vedante em possíveis folgas que possam existir. A câmara de compressão possui dois rotores interlaçados que, ao rodarem, provocam a redução do volume do ar e, conseqüentemente o

aumento de pressão. Posteriormente, a mistura comprimida é descarregada para o reservatório onde o ar e o lubrificante são separados, devido a mudanças de direção e velocidade do ar. O ar segue para o radiador e o lubrificante retorna para o sistema de refrigeração. Algumas partículas residuais que permanecem no ar comprimido são removidas através de um filtro de coalescência. De seguida, o ar comprimido passa pelo radiador onde é arrefecido e o vapor de água contido no ar condensa e é drenado pelo separador de humidade e pelo dreno incorporado. O ar aquecido, resultante do processo de arrefecimento, é encaminhado para o exterior da sala através de uma conduta instalada em cada um dos compressores [17,28]. Na Figura 3.2 está esquematizado todo o funcionamento.

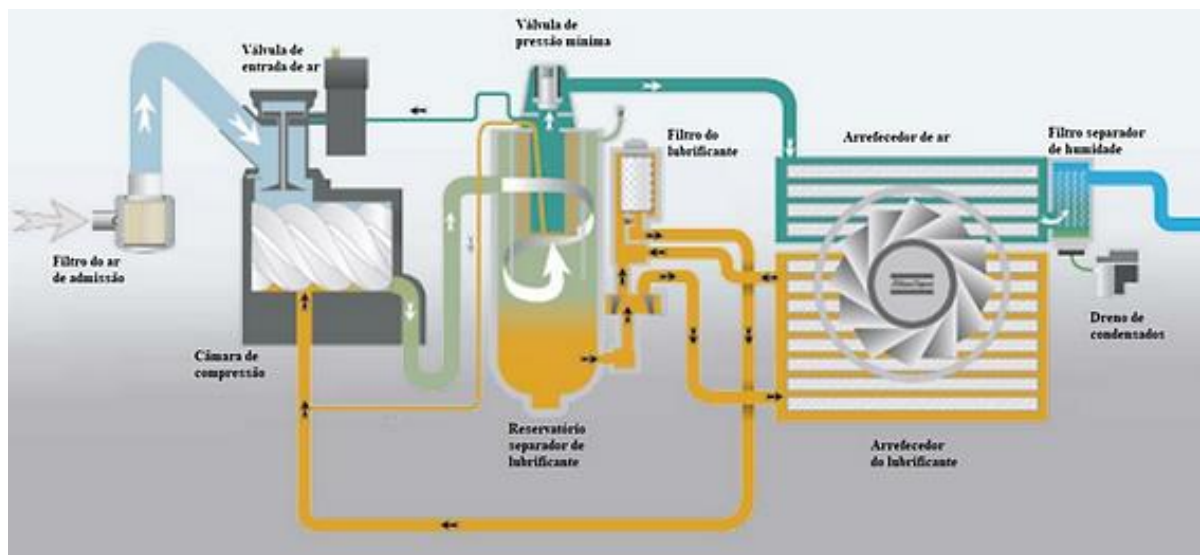


Figura 3.2 – Diagrama de fluxo do compressor volumétrico rotativo de parafuso lubrificado [17]

Posteriormente, o ar comprimido é sujeito à primeira fase de tratamento, realizado pelo filtro de partículas sólidas. O filtro impede a passagem de partículas para o secador, especificamente líquidos coalescentes, água e óleos até $1 \mu\text{m}$, garantindo um conteúdo remanescente de óleos aerossóis de $100 \mu\text{m}/\text{m}^3$. Estes filtros garantem a classe 2 no parâmetro A da norma ISO 8573-1:2010 [A:B:C]. Os filtros possuem um indicador duplo, que permite verificar o diferencial de queda de pressão e a correspondente eficiência económica associada [29].

Na Tabela 3.2 encontram-se as características dos filtros de partículas sólidas.

Tabela 3.2 – Características dos filtros de partículas sólidas [29]

Equipamento	Filtro de ar
Marca	Ingersoll Rand
Modelo	FA 1200I do tipo G
Temperatura [°C]	1,5 – 80,0
Pressão [bar]	0 – 17,2
Caudal máximo a 7 bar [m ³ /min]	19,25
Ano fabrico	2014

De seguida, o ar segue para o secador que é composto por três circuitos – ar (A), glicol (B) e refrigerante (C), tal como se pode verificar na Figura 3.3.

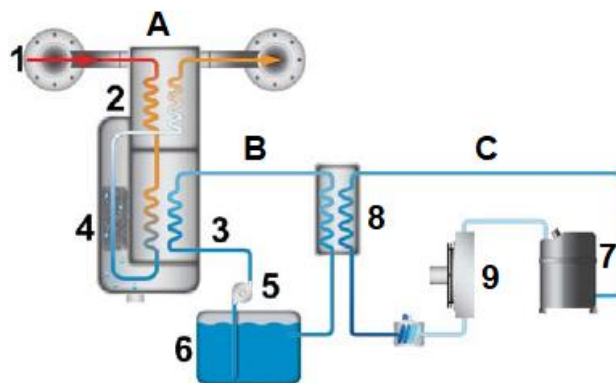


Figura 3.3 – Princípio operativo do secador. Adaptado de: [30]

O ar comprimido entra pelo ponto 1. No ponto 2 é arrefecido pelo ar que sai do lado direito. No ponto 3 existe um permutador de calor que permite a troca de calor entre o glicol e o ar. No circuito B a temperatura do glicol é reduzida quase até ao ponto de orvalho da água. Quando o ar passa no permutador de calor (ponto 3), o vapor de água é condensado e, posteriormente, retido no separador de humidade e drenado para a purga automática no ponto 4. No ponto 5 existe uma bomba que circula constantemente o glicol armazenado no ponto 6, garantindo a máxima eficiência de refrigeração. No ponto 7 situa-se o condensador que funciona apenas quando é necessário diminuir a temperatura do glicol até à temperatura de orvalho da água. O condensador (ponto 7) garante que o refrigerante retorne ao estado líquido antes de entrar no permutador de calor (ponto 8), que possibilita a troca de calor entre o refrigerante e o glicol. O condensador (ponto 7) é arrefecido pelo ventilador de velocidade

variável (ponto 9) que permite ajustar a eficácia de refrigeração consoante as necessidades [31].

Na Tabela 3.3 encontram-se as características de ambos os secadores.

Tabela 3.3 – Características dos secadores [31]

Equipamento	Secador de ar
Marca	Ingersoll Rand
Modelo	D1300EC-A
Número de Série	14M-004431
Potência [kW]	2,98
Capacidade máxima a 7 bar [m³/min]	21,7
Temperatura ambiente [°C]	2 – 45
Temperatura do ar de entrada [°C]	5 – 60
Pressão máxima [bar]	13
Ano de fabrico	2014

Após a secagem, o ar comprimido segue para o filtro de coalescência que remove partículas até 0,01 µm, incluindo água e óleos aerossóis, e que garante um conteúdo de remanescente de óleos aerossóis de 0,01 µm/m³. Este filtro é responsável pela classificação de classe 1 no parâmetro C da norma ISO 8573-1:2010 [A:B:C]. O filtro possui um indicador duplo, que permite verificar o diferencial de queda de pressão e a correspondente eficiência económica associada. Na Tabela 3.4 encontram-se as características dos filtros de partículas sólidas [29].

Tabela 3.4 – Características dos filtros de coalescência [29]

Equipamento	Filtro de ar
Marca	Ingersoll Rand
Modelo	FA 1200I do tipo H
Temperatura [°C]	1,5 – 80
Pressão [bar]	0 – 17,2
Caudal máximo a 7 bar [m³/min]	19,25
Ano fabrico	2014

A central de ar comprimido está equipada com purgas de condensados eletrónicas que os encaminham, por uma rede independente, para um depósito exterior ao edifício. Nesse depósito são armazenados os condensados e outros líquidos contaminados que,

posteriormente, são encaminhados para a ETAR da empresa, antes de serem descarregados para a rede pública.

Por fim, o ar comprimido é armazenado no reservatório, cujas características se evidenciam na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características do reservatório

Equipamento	Reservatório de ar comprimido
Marca	SICC
Modelo	2000-12784
Número de Série	1500438009
Capacidade máxima a 7 bar [l]	2000
Pressão máxima [bar]	11,5
Pressão de saída [bar]	6,5
Ano de fabrico	2014

3.1.3. Distribuição

A rede de ar comprimido é composta por um anel principal em circuito fechado que percorre toda a produção. O anel é constituído por tubagem de 80 mm de diâmetro, possui 128 m de comprimento, 109 m de largura e encontra-se a 7,7 m de altura do solo.

Do anel principal derivam várias linhas secundárias, tanto para a produção como para zonas exteriores à produção, especificamente laboratórios de metrologia, armazém, oficina de manutenção, ETAR e sala AVAC. As linhas secundárias que derivam para a produção são feitas de tubagem de 50 mm de diâmetro, possuem uma extensão que ronda os 1371 m e encontram-se a 4,4 m de altura do solo. As que derivam para as zonas exteriores à produção são feitas de tubagem de 25 mm de diâmetro, possuem uma extensão que ronda os 164 m. Todas estas linhas possuem válvulas esféricas manuais de seccionamento que garantem flexibilidade para realizar intervenções.

Os consumidores finais são abastecidos pelas linhas de alimentação, cujas picagens são efetuadas nas linhas secundárias. As linhas de alimentação são constituídas por tubagem de 20 mm.

As canalizações e os acessórios são de alumínio e possuem encaixes roscados, que permitem efetuar intervenções rápidas.

Na Figura 3.4 está representado o esquema da rede de ar comprimido.

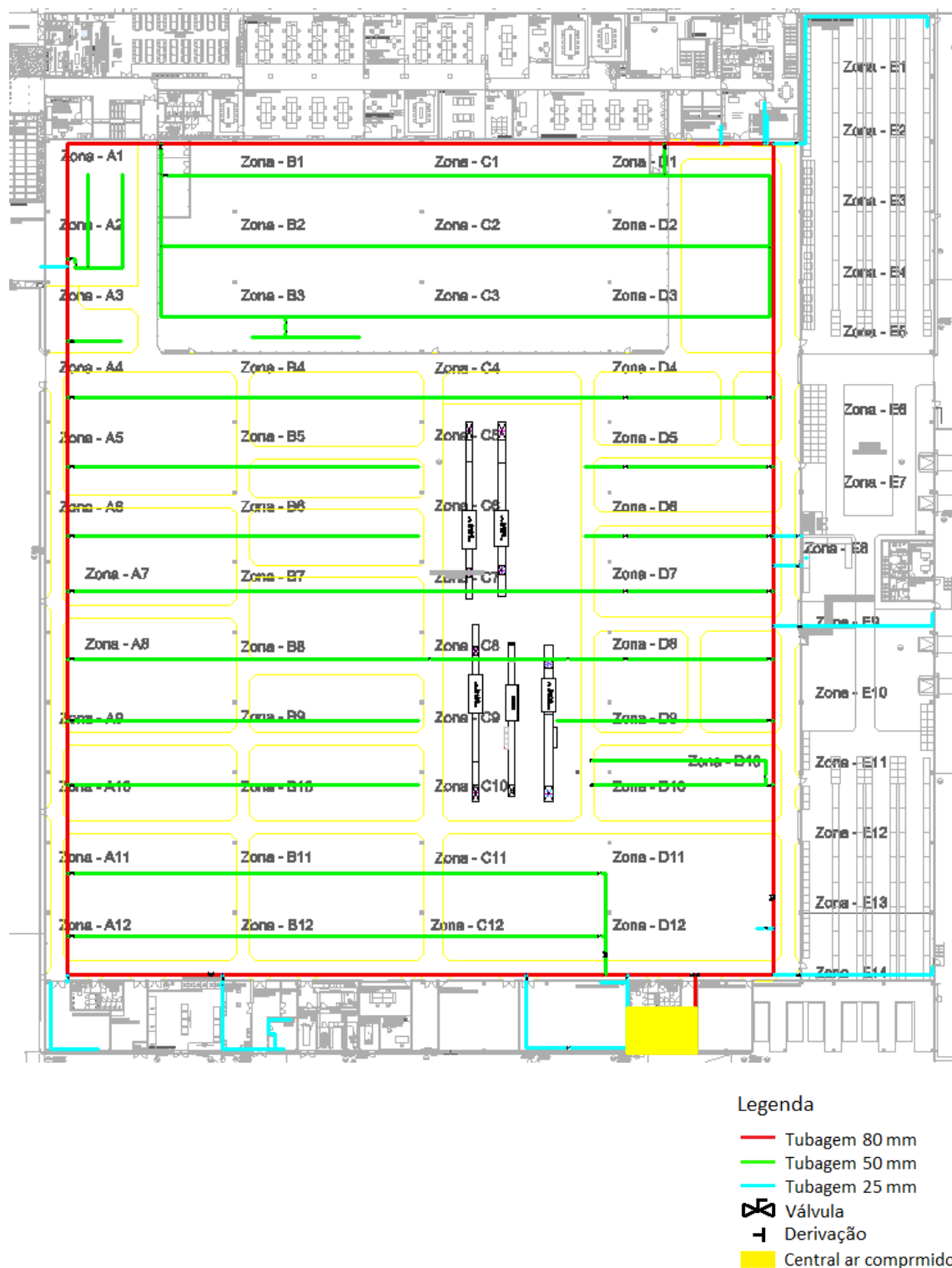


Figura 3.4 – Rede de distribuição de ar comprimido

3.1.4. Consumo de Ar Comprimido

Durante a semana, os processos produtivos necessitam de ar comprimido 24h por dia, o equivalente a cerca de 21 m³/min, em média.

Na Figura 3.5 encontra-se representado o perfil de potência consumida pela central de ar comprimido durante a semana de 10 a 14 de fevereiro.

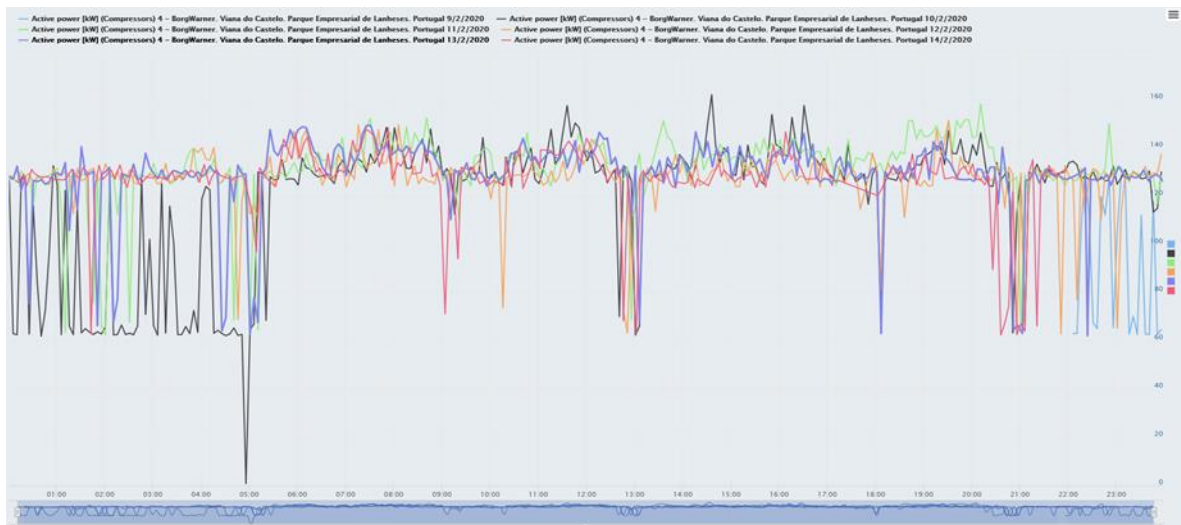


Figura 3.5 – Perfil de potência consumida durante a semana pela central de ar comprimido

Entre as 6 h e as 20 h são necessários os 2 compressores para satisfazer as necessidades. Ambos consomem 130 kW, em média, o que equivale a 60% da capacidade de cada um deles (Anexo A). Durante esse período, são notórios quatro picos que baixam até os 60 kW, que equivalem ao funcionamento de um compressor a 55% da capacidade (Anexo A). Os dois primeiros picos são o reflexo das pausas do turno da manhã, de seguida, os picos com maior duração representam a troca de turno e, por fim, o último pico é referente à pausa do turno da tarde.

Nos restantes horários do dia, uma vez que o consumo é mais baixo, verificam-se vários picos entre os 130 kW e os 60 kW, que correspondem à alternância constante entre o funcionamento de dois ou um compressor.

Durante o fim de semana, a produção varia em função das necessidades, ou seja, pode haver durante todo o fim de semana, apenas em alguns turnos ou nem sequer haver. Na Figura 3.6 está representado o perfil de potência consumida pela central de ar comprimido durante o fim de semana de 15 e 16 de fevereiro, em que houve produção em todos os turnos.

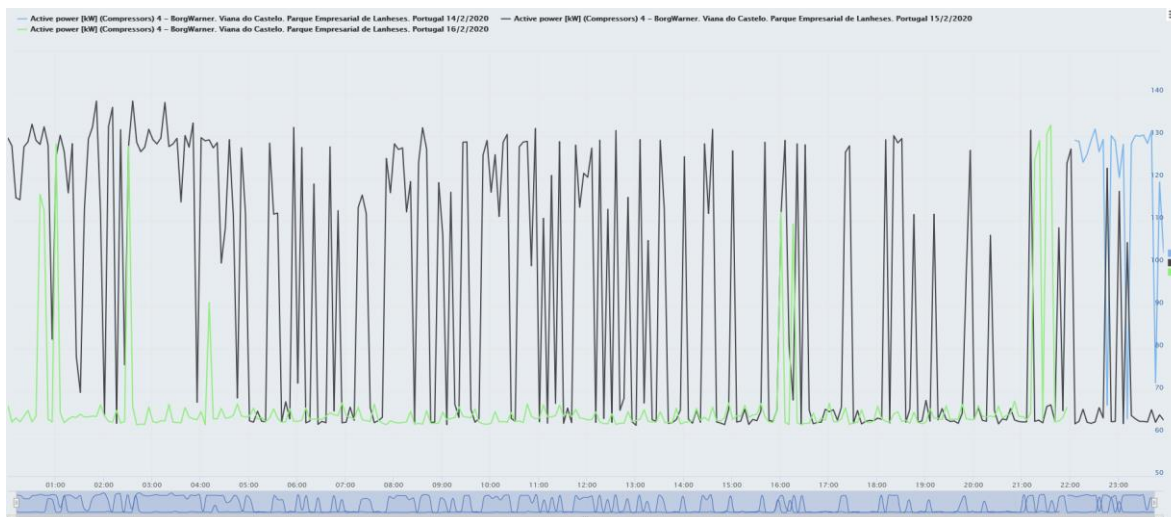


Figura 3.6 – Perfil de potência consumida durante o fim de semana pela central de ar comprimido

Neste caso, para satisfazer as necessidades foi necessário um caudal equivalente a cerca de 13 m³/min, em média. Como o consumo ao fim de semana é inferior ao menor consumo da semana, são ainda mais notórios os picos entre 130 kW e 60 kW, que demonstram a alternância do funcionamento dos compressores.

3.2. Medidas Implementadas

Na empresa estão implementadas as principais práticas de monitorização do sistema de ar comprimido, nomeadamente medidas de segurança da central de produção e tratamento, manutenção preventiva e controlo diário dos equipamentos, eletroválvulas de seccionamento e monitorização tanto dos consumos como das fugas.

3.2.1. Segurança

Sendo a segurança a primeira prioridade da *BorgWarner*, a central de ar comprimido possui várias medidas implementadas nesse sentido. A sala encontra-se fechada e com acesso restrito, de forma a garantir que não seja possível a entrada de terceiros e assim que a monitorização dos equipamentos seja realizada apenas pelos elementos do departamento *Manufacturing Services*. Além disso, todos os equipamentos possuem documentação referente a características, manutenções, avisos e o procedimento de controlo de energia.

3.2.2. Manutenção

A execução das manutenções preventivas conforme indicado pelo fabricante garante eficiência, fiabilidade, prolongação da vida útil dos equipamentos e minimiza os possíveis riscos de contaminação do produto final. Nesse sentido, a empresa possui um planeamento das manutenções internas e externas para cada um dos equipamentos. Para cada manutenção, existe uma lista de verificação onde estão detalhadas as tarefas a realizar. Na Tabela 3.6. está discriminado o planeamento das manutenções.

Tabela 3.6 – Planeamento das manutenções preventivas internas e externas de cada um dos equipamentos da central de ar comprimido

Equipamento	Frequência de manutenção	
	Interna	Externa
Compressor de ar VSD	Diária	4000 h
Secador de ar	Diária	4000 h
Filtro de partículas	Mensal	4000 h
Filtro de óleo	-	4000 h
Manómetro de pressão	-	Anual
Reservatório de ar	Anual	5 anos

3.2.3. Eletroválvulas

O seccionamento da rede de ar comprimido é fundamental tanto para a realização de intervenções como para economizar em fugas, quando não há produção.

Para o seccionamento da rede de ar comprimido existem três eletroválvulas, duas instaladas no anel principal e outra numa linha de distribuição, tal como se pode verificar na Figura 3.7.

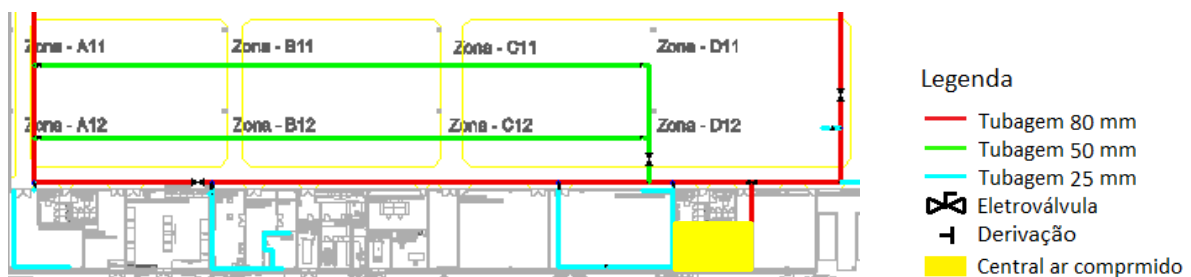


Figura 3.7 – Localização das eletroválvulas de seccionamento da rede de ar comprimido

Em casos normais, bastaria instalar apenas uma eletroválvula à saída da central de ar comprimido, antes do anel principal. No entanto, existem dois consumidores que necessitam

continuamente de ar comprimido, especificamente a ETAR, onde ocorre o tratamento das águas contaminada antes de serem encaminhadas para a rede de saneamento, que se localiza abaixo da zona B12, e a linha de pintura, que se encontra à direita da zona D12. Por essa razão, tiveram de ser instaladas duas eletroválvulas após esses consumidores. Além disso, teve de ser instalada a terceira eletroválvula na linha de distribuição situada à esquerda da zona D12, de modo a garantir que a rede não é alimentada por essa linha.

Quando não há produção, os seguranças fecham as eletroválvulas no quadro que alimenta os equipamentos da central de ar comprimido. Desde a instalação das eletroválvulas, em março de 2019, até ao momento, foi possível economizar, aproximadamente, 2500 €.

3.2.4. Monitorização de Consumos

A monitorização contínua dos custos associados à produção de ar comprimido permite identificar possíveis desvios de consumo que são originados por ineficiências ou desperdícios.

Na central de ar comprimido existe um quadro elétrico que alimenta todos os equipamentos. Nesse quadro, está instalado um contador de energia que permite monitorizar os consumos e, conseqüentemente, os custos associados à sua produção. Além do ar comprimido, todas as restantes formas de energia utilizadas pela empresa – eletricidade, água e gás natural – possuem contadores que permitem que haja um controlo mensal dos seus custos.

Na Tabela 3.7 estão discriminados os consumos da central de ar comprimido e da empresa, a parcela energética da central de ar comprimido e os custos associados ao ar comprimido, dos meses de fevereiro a junho.

Tabela 3.7 – Consumos energéticos e custos associados à produção de ar comprimido nos meses de fevereiro a junho

Mês	Consumo global empresa [kWh]	Central de ar comprimido		
		Consumo [kWh]	Parcela energética [%]	Custo [€]
fevereiro	797 196	77 505	9,72	7 751
março	730 626	69 368	9,49	6 937
abril	463 737	43 778	9,44	4 378
maio	615 480	56 917	9,25	5 692
junho	-	62 984	-	6 298

Verifica-se um elevado decréscimo nos consumos, principalmente nos meses de abril e maio, no entanto, a parcela energética manteve-se praticamente inalterada.

3.2.5. Monitorização de Fugas

O procedimento usado para monitorizar as fugas de ar comprimido é composto pelas etapas de auditoria (deteção e identificação), resolução, verificação, atualização e envio do status, tal como se pode verificar na Figura 3.8.

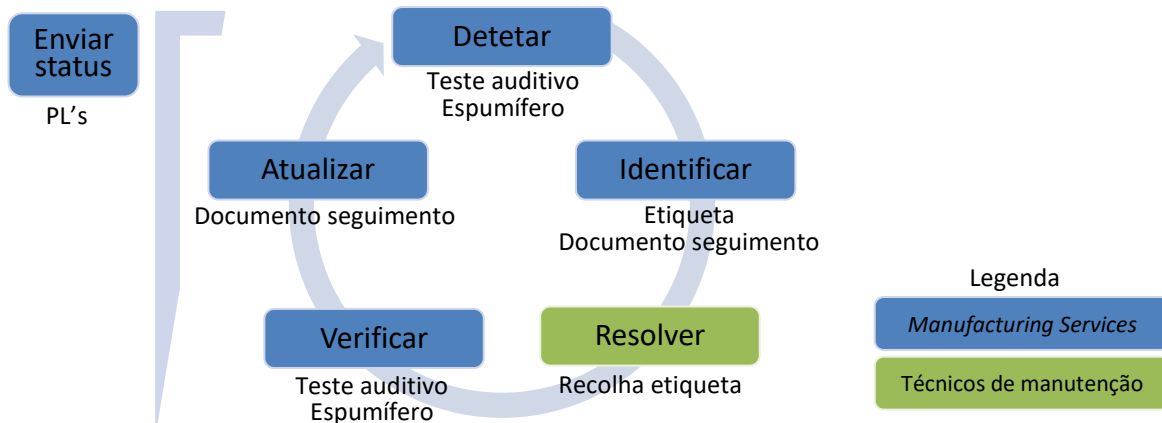


Figura 3.8 – Esquema do procedimento de monitorização de fugas de ar comprimido usado antes do estágio

As auditorias iniciam-se com a deteção da fuga através do teste auditivo e, se necessário, com o uso de espumífero. De seguida, a fuga é identificada com uma etiqueta, no local onde é detetada. A etiqueta possui vários campos para serem preenchidos, nomeadamente número da etiqueta, data de deteção, número SAP da máquina onde foi detetada a fuga, linha de produção a que a máquina pertence, tipo de fuga e o número do trabalhador que a detetou. Na Figura 3.9 encontra-se um exemplo da etiqueta.

Fuga de Ar Comprimido

! (Ícone de alerta)

Número: _____ Data: _____

N.º SAP: _____

Linha: _____

Identificação da Máquina: _____

Tubo roto Actuador Pneum.

Abraçadeira Válvula Pneum.

Ligações Outro

Outro

N.º Técnico: _____

Figura 3.9 – Etiqueta usada na identificação de fugas de ar comprimido

Para realizar as auditorias é necessário que as máquinas estejam em carga, isto é, os sistemas pneumáticos têm de possuir ar comprimido. Por esse motivo, é fundamental que o respetivo técnico de manutenção da linha de produção a ser auditada esteja presente na auditoria, para que as máquinas sejam colocadas em carga, caso não estejam. Além disso, tem de se ter em atenção os casos de máquinas que geram vácuo, que possuem válvulas de escape e que usam sopros para alguma função porque o detetor de fugas mede todos os ultrassons gerados pelo ar comprimido e, por isso, deteta essas movimentações de ar como fugas. Os técnicos de manutenção são as pessoas indicadas para esclarecer qualquer dúvida que possa surgir, pois são quem mais conhecimento tem sobre o funcionamento das máquinas. Por essa razão, são também as pessoas mais indicadas para efetuar a orientação durante a auditoria, indicando os locais onde existe ar comprimido. Portanto, as auditorias foram previamente agendadas com os técnicos de manutenção.

Nas auditorias são verificados todos os pontos onde existe ar comprimido, nomeadamente baixadas, conexões, tubagens, engates rápidos, filtros, reguladores, lubrificadores de linha, drenos de condensados, válvulas, atuadores e sistemas pneumáticos.

Posteriormente à auditoria, preenche-se o documento do seguimento de fugas com as informações da etiqueta e com o *Product Leader* responsável pela linha de produção em questão. Após a reparação da fuga, os técnicos de manutenção recolhem e entregam a etiqueta ao colaborador do departamento *Manufacturing Services* responsável pelas fugas de ar comprimido. O responsável confirma a resolução da fuga e, caso esteja, atualiza o documento de seguimento com o nome do técnico que reparou a fuga e com a indicação de fuga resolvida. Paralelamente, com uma periodicidade mensal, é enviado o status das fugas de ar comprimido das respetivas linhas de produção a cada *Product Leader*.

4. OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Neste capítulo apresentam-se as propostas de melhoria e as respectivas formas de as pôr em prática. Foram apresentadas sugestões para as fugas de ar comprimido, queda de pressão nas linhas de produção e rede de ar comprimido. No caso das fugas de ar comprimido, foram todas colocadas em prática.

4.1. Fugas de Ar Comprimido

A principal melhoria implementada no processo de monitorização das fugas de ar comprimido foi a adição do detetor de fugas ultrassónico que permite quantificar o caudal e o custo das fugas. Deste modo, é possível analisar quantitativamente e economicamente as fugas de ar comprimido.

4.1.1 Adição do Detetor de Fugas

De acordo com a metodologia PDCA, definiu-se o objetivo de alterar o processo de deteção e de verificação. Ao invés do teste auditivo e uso do espumífero passou a ser utilizado o detetor de fugas ultrassónico que a empresa possui, tal como se pode verificar na Figura 4.1.

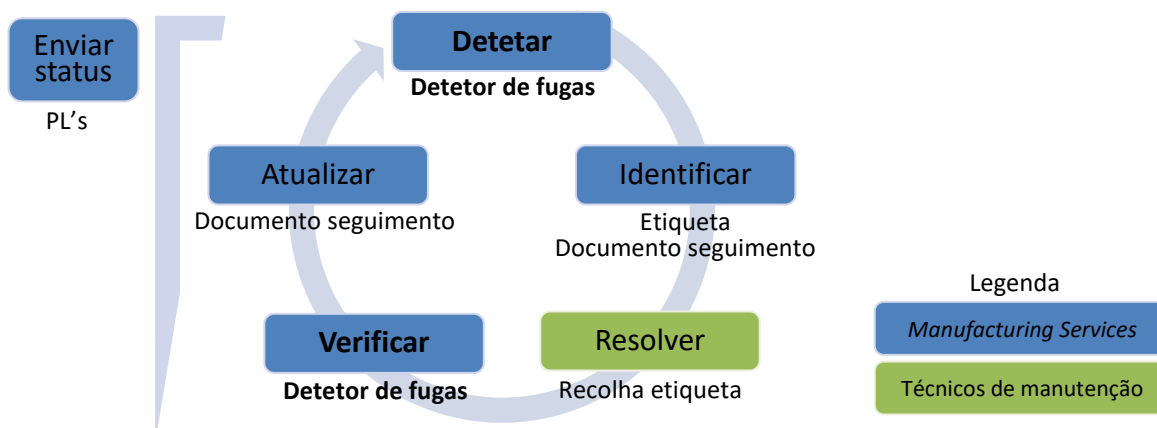


Figura 4.1 – Esquema do procedimento seguimento de fugas de ar comprimido usado no início do projeto

Para introduzir o detetor de fugas, primeiramente, começou-se por explorar os parâmetros que têm de ser ajustados. Na Tabela 4.1 estão discriminados os parâmetros que foram ajustados antes de iniciar as auditorias e os que são ajustados durante a auditoria, em função das necessidades.

Tabela 4.1 – Parâmetros do detetor de fugas que têm de se alterados previamente e durante a auditoria

Parâmetros iniciais	Valor				Parâmetros auditoria	Valor				
Custo ar comprimido [€/1000 m ³]	10				Tipo de sensor	Trompete acústico				Tubo de foco
Horas trabalho anual [h]	8 760				Distância [m]	1	3	5	6	0,2
Pressão [bar]	6	7	8	4						

O custo do ar comprimido foi calculado no Anexo B, sabendo a quantidade de energia que os compressores consomem para produzirem o caudal de ar comprimido que debitam e o custo da energia. Quanto às horas de trabalho anual, considerou-se um ano civil, uma vez que a empresa labora praticamente todos os dias do ano. A pressão é um parâmetro que pode ser alterado, no entanto, considerou-se que seria um parâmetro inicial porque, devido à queda de pressão, o ar comprimido chega ao consumidor final com, aproximadamente, 6 ou 6,5 bar, dependendo se a pressão de saída dos compressores é de 6,5 ou 7 bar, respetivamente. Os parâmetros da auditoria são selecionados em função do tipo de sensor a usar e, no caso do trompete acústico, em função da distância a que se está a detetar as fugas.

Após a seleção dos parâmetros, pode-se iniciar a deteção de fugas. Coloca-se o detetor à distância que foi previamente selecionada e aponta-se o sensor para as zonas com ar comprimido. Quando a escala de cores, localizada no canto superior direito do ecrã do detetor, atingir a cor vermelha, significa que foi detetada fuga. No canto superior esquerdo são indicados o nível do ultrassom identificado, o caudal e o custo da fuga, como se evidencia na Figura 4.2.

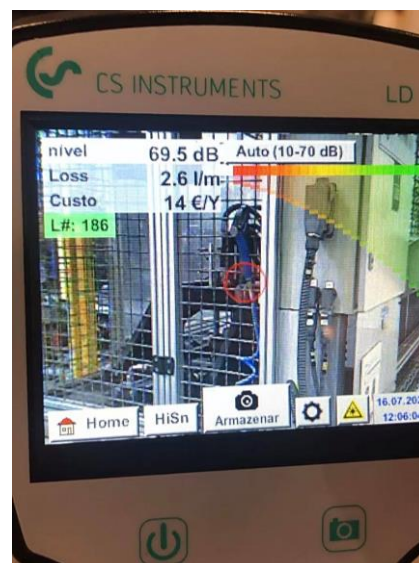


Figura 4.2 – Exemplo da identificação de uma fuga de ar comprimido com o detetor de fugas ultrassónico

O detetor de fugas permite armazenar as fugas detetadas e, posteriormente, cria um relatório digital com essa informação (Anexo C).

No processo de verificação, começou a ser usado o detetor de fugas. O processo é exatamente o mesmo, alterar os parâmetros, direcionar o detetor de fugas para a zona intervencionada, de modo a verificar se não é detetada fuga.

4.1.2 Sensibilização do Pessoal Técnico

A sensibilização do pessoal técnico é fundamental para que todos possam contribuir para o aumento da eficiência tanto do sistema de ar comprimido como das máquinas, minimizando as perdas energéticas.

Durante as auditorias, apelou-se aos técnicos de manutenção para a breve resolução das fugas, demonstrando que a inexistência de fugas está diretamente ligada tanto com a eficiência dos sistemas como com questões económicas. Além disso, foram detetadas várias fugas que resultam de ligações mal apertadas e que são facilmente resolvidas no momento. Nesse seguimento, foi também pedido que, quando for detetada qualquer fuga, verifiquem, de imediato, se a fuga pode ser resolvida com um aperto manual, caso contrário que contactem o departamento *Manufacturing Services* para se agendar uma auditoria e, assim, auxiliar a localizar a fuga.

Por outro lado, foi possível sensibilizar, tanto os operadores como os técnicos de manutenção, no que respeita a desperdícios gerados pelas máquinas que não estão a ser usadas e que se encontram em carga. Nesse sentido, aconselhou-se que seja feito o corte de ar comprimido dessas máquinas, através das válvulas de seccionamento.

4.1.3 Desenvolvimento da Documentação de Gestão

A vantagem de introduzir o aparelho de deteção de fugas no procedimento de monitorização das fugas é a quantificação tanto do caudal como dos custos das fugas e assim perceber quanto foi gasto, quanto se poupou e quanto ainda se pode poupar com as fugas de ar comprimido.

O custo que o aparelho apresenta corresponde a 365 dias de fuga, ou seja, considerando uma fuga que é detetada a 01/06/2020, a máquina apresenta o custo referente até 01/06/2021. No entanto, como os custos das empresas são relativos a cada ano civil, teve de se desenvolver o documento de gestão.

As variáveis necessárias para se obter os valores pretendidos são as datas, tanto de deteção como de reparação, e o custo ano, que o detetor de fugas fornece. Além destas variáveis, achou-se que seria pertinente registar também o caudal das fugas, que também é fornecido pelo detetor de fugas, e que permite perceber qual a quantidade de ar comprimido que é desperdiçada através das fugas.

Na Figura 4.3 encontra-se um esquema representativo dos custos e das poupanças associados às fugas de ar comprimido com as respetivas correlações às datas.

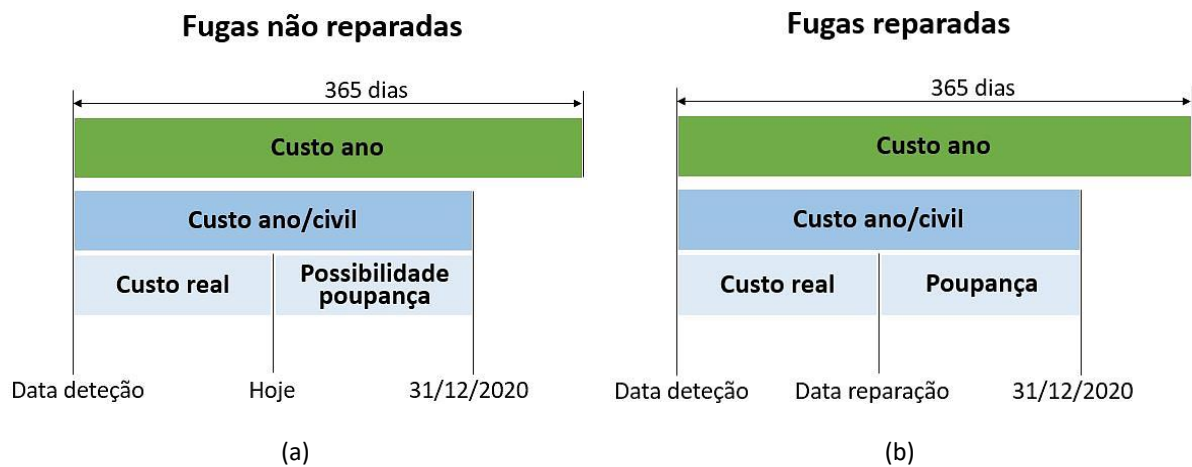


Figura 4.3 – Esquema dos custos e das poupanças associados a fugas: (a) não reparadas; (b) reparadas

Através do custo ano, fornecido pelo detetor de fugas, obtém-se o custo dia. Com o custo dia e com o número de dias que decorrem desde que a fuga foi detetada até ao último dia do ano é possível obter o custo ano civil, que representa o valor que será gasto, caso a fuga não seja resolvida.

Para se obter o custo real são necessários o custo dia e o número de dias. No caso das fugas não reparadas, são os dias que decorreram desde que a fuga foi detetada até ao dia de hoje. Contrariamente, no caso das fugas reparadas, são os dias que decorreram desde que a fuga foi detetada até ao dia que foi reparada.

As poupanças são obtidas através da subtração do custo real ao custo ano civil. Relativamente às fugas não reparadas, o valor da poupança representa o que ainda pode ser poupado com a resolução da fuga, ao dia de hoje. Quanto às fugas reparadas, representa a poupança referente à resolução da fuga, ou seja, o valor que iria ser gasto até ao fim do ano, caso não fosse reparada.

Além da adição do caudal e dos custos, foram criadas ferramentas que facilitam a interpretação e transmissão da informação. Especificamente, diagramas de pareto referentes à quantidade de fugas, custos, poupanças e ao maior número de dias que as fugas estiveram ou estão em ativo, dependendo se são fugas reparadas ou não reparadas, respetivamente, e gráficos relativos à quantidade anual de fugas reparadas e não reparadas, quantidade anual e mensal de fugas reparadas e não reparadas e aos tipos de fugas e também um quadro resumo

com a quantificação e custos das fugas (Anexo D). Estas ferramentas são atualizadas automaticamente quando o documento é atualizado, tanto com a inserção de novas fugas como com a reparação de fugas já existentes.

É de salientar que o documento foi desenvolvido não só para o ano civil corrente, mas também para os próximos anos, dado que o intuito é dar seguimento ao tema. Relativamente ao seguimento do ano civil corrente, considerou-se que se devia dar continuação com os dados que tinham sido recolhidos em 2019, uma vez que havia um seguimento do tema desde o 2º semestre de 2019 e que foi usada a base do procedimento já implementado. Daqui em diante, o seguimento será realizado ano a ano.

4.1.4 Otimização do Procedimento

Durante o seguimento do tema, foram detetados vários pontos de melhoria relacionados com as etiquetas de identificação da fuga. Quando a verificação da fuga é realizada algum tempo depois de ter sido resolvida, surgem dúvidas quanto ao local exato da fuga, pois a etiqueta já não se encontra colocada no local. Há casos em que, no momento da verificação, se percebe que a fuga não está resolvida por completo. Além disso, foram detetadas ocorrências de etiquetas perdidas. De modo a solucionar todos estas questões, considerou-se que a recolha da etiqueta devia deixar de fazer parte da etapa de resolução, que é da responsabilidade dos técnicos de manutenção, e passar para a etapa de verificação, que é realizada pelo departamento *Manufacturing Services*.

Dada a importância da sensibilização de todo o pessoal técnico que está envolvido com o sistema de ar comprimido, achou-se que seria pertinente transmitir-lhes os custos inerentes às fugas de ar comprimido. Por esse motivo, começou a ser enviado, também para os técnicos de manutenção, um resumo com a quantificação e com os custos associados às fugas. Foi disponibilizada, na rede, a documentação de gestão e os relatórios das fugas, permitindo assim que todos os colaboradores tenham acesso, a qualquer momento, ao seguimento das fugas de ar comprimido.

Na Figura 4.4 encontra-se esquematizado o procedimento de monitorização de fugas com as melhorias que foram implementadas.

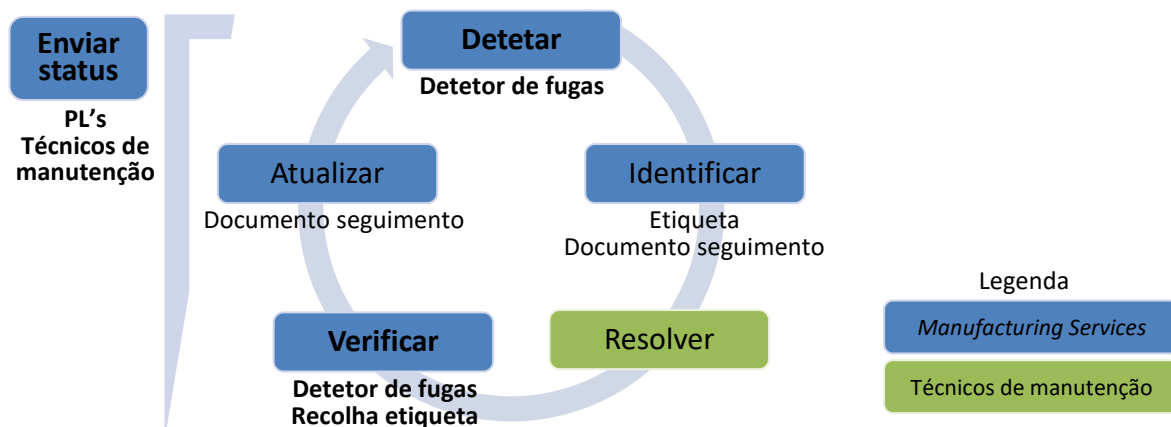


Figura 4.4 – Esquema representativo do procedimento de seguimento de fugas de ar comprimido final

4.1.5 Plano de Auditorias

Durante o estágio, foi assegurado o seguimento das fugas de ar comprimido. No entanto, é importante garantir que o tema continue a ser tratado de uma forma sistemática. Nessa perspetiva, ficou definido que a etapa de auditoria seria realizada por todos os elementos do departamento *Manufacturing Services* e que as restantes etapas – verificação, atualização e envio status – ficariam da responsabilidade de um colaborador do departamento *Manufacturing Services*, com o respetivo *backup*.

Foi criado um plano de auditorias (Anexo E), onde se definiu uma periodicidade quinzenal, duração de uma semana, com o objetivo de auditar, por ano, 50% das linhas de produção e que, em cada auditoria, seria analisada uma linha de produção. As linhas de produção foram atribuídas de forma aleatória aos auditores. Assim como a documentação de gestão, o plano de auditorias também foi executado para os próximos anos.

Uma vez que as auditorias serão realizadas por todos os elementos do departamento *Manufacturing Services*, é fundamental que haja um método de comunicação eficaz de forma a garantir que todos as realizam da mesma forma. Como tal, foi dada formação à equipa para explicar o processo passo por passo e foram criados tutoriais digitais, que podem ser consultados quando necessário. Foi também criado um guião do procedimento de auditoria, que pode ser usado durante a auditoria (Anexo F). Estas ferramentas foram testadas, para verificar se continham toda a informação necessária. Além disso, foi criado um calendário no Outlook com as datas das auditorias, de forma a que cada colaborador receba alertas, durante a semana que tem de efetuar a auditoria.

4.1.6 Discussão de Resultados

No 2º semestre de 2019 foram detetadas 105 fugas, das quais 67% não foram reparadas e 33% foram reparadas. Das fugas reparadas, apenas 6% foram quantificadas em termos de custos e os restantes 26% não foi possível quantificar.

Do total de fugas existentes durante o 1º semestre de 2020, 51% corresponde a fugas não reparadas do semestre anterior e 49% a novas fugas. Durante esse semestre foram eliminadas 68% das fugas, das quais 42% foram quantificadas em termos de custos, contrariamente aos restantes 26%. O semestre terminou com 32% de fugas não reparadas.

De acordo com o plano de auditorias prevê-se que, no 2º semestre de 2020, sejam detetadas 31% das fugas e, por isso, os restantes 69% sejam não reparadas do semestre anterior. No que respeita à reparação das fugas, prevê-se que 39% sejam reparadas e 61% fiquem por reparar. As fugas reparadas sem custo vão deixar de existir, uma vez que as auditorias serão realizadas com o detetor de fugas e, por essa razão, serão quantificadas. Na Figura 4.5 estão representados os status das fugas no 2º semestre de 2019, 1º semestre de 2020 e uma previsão do 2º de 2020.

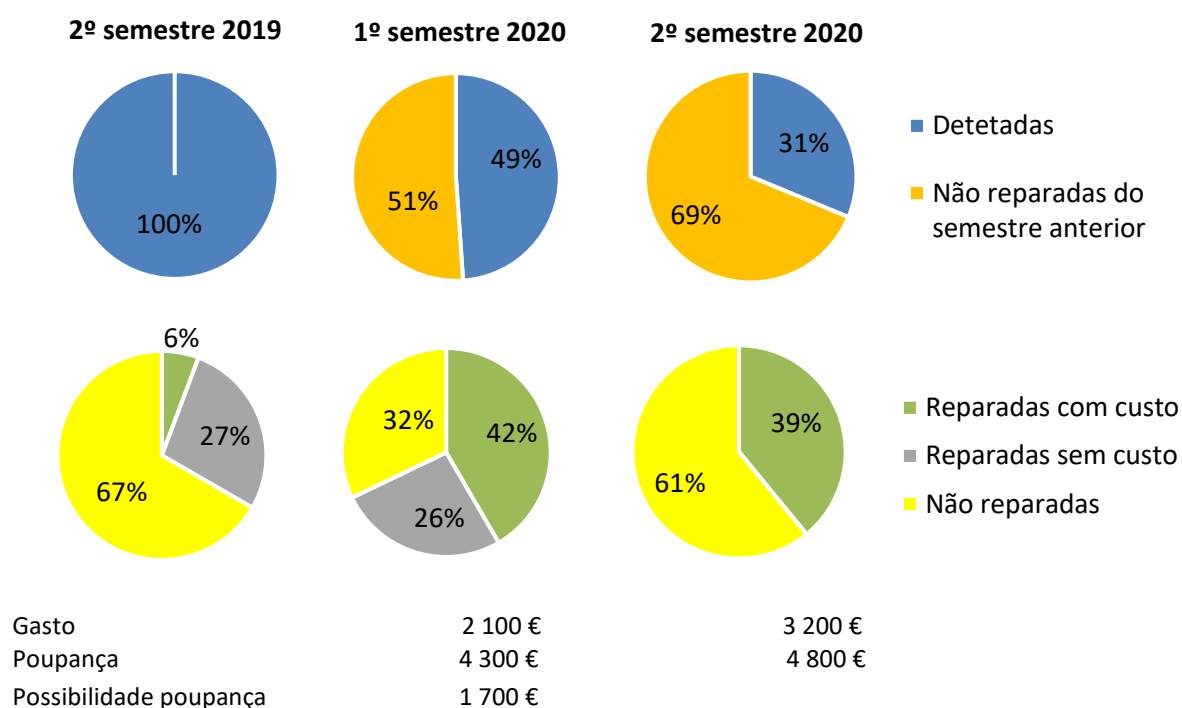


Figura 4.5 – Status das fugas de ar comprimido do 2º semestre 2019, 1º semestre 2020 e a previsão para o 2º semestre 2020

Comparando os resultados do 2º semestre de 2019 com os do 1º semestre 2020, é notório o aumento de fugas reparadas, que passou de 33% para 68%. Em termos de fugas reparadas sem custos, a percentagem permaneceu praticamente igual, uma vez que os técnicos de manutenção foram reparando as fugas antes das linhas de produção serem novamente auditadas. Contrariamente, no que diz respeito a fugas reparadas com custo houve um elevado aumento, de 6% para 42%. Desta forma, conclui-se que é fundamental efetuar um acompanhamento sistemático do tema, para se obter uma maior resposta por parte dos técnicos de manutenção.

As auditorias realizadas com o detetor de fugas a todas as linhas de produção permitiram recolher os caudais e os custos não só das novas fugas, mas também das que tinham sido previamente detetadas e que ainda não tinham sido reparadas. Esses valores permitiram verificar que, até ao momento, foram gastos 2100 € em fugas, o equivalente a 3% dos custos anuais associados à produção de ar comprimido, com a reparação das fugas foi possível obter-se um proveito de 4300 €, que corresponde a 6% dos custos anuais associados à produção de ar comprimido, e com as fugas que não estão reparadas é ainda possível poupar 1700 €, que corresponde a 2% dos custos anuais associados à produção de ar comprimido. Em termos de caudal, as fugas não reparadas representam 5% da produção de ar comprimido.

As parcelas cinzentas dos gráficos são referentes a fugas reparadas cujos custos não foram quantificados, ou seja, foram reparadas antes da linha de produção ter sido novamente auditada. Caso tivessem sido quantificadas, os custos supramencionados seriam superiores e mais realistas.

No 2º semestre de 2020, em termos de custos, prevê-se que sejam gastos 3200 € e que sejam poupados 4800 €, o equivalente a 4% e 6% dos custos anuais associados à produção de ar comprimido, respetivamente.

4.2 Queda de Pressão nas Linhas de Produção

Recentemente, tinha surgido um problema de queda de pressão numa linha de produção da área ESD, que a impediu de funcionar normalmente.

Na Figura 4.6 pode-se verificar, rodeada a cor de laranja, a zona onde se localiza essa linha de produção.

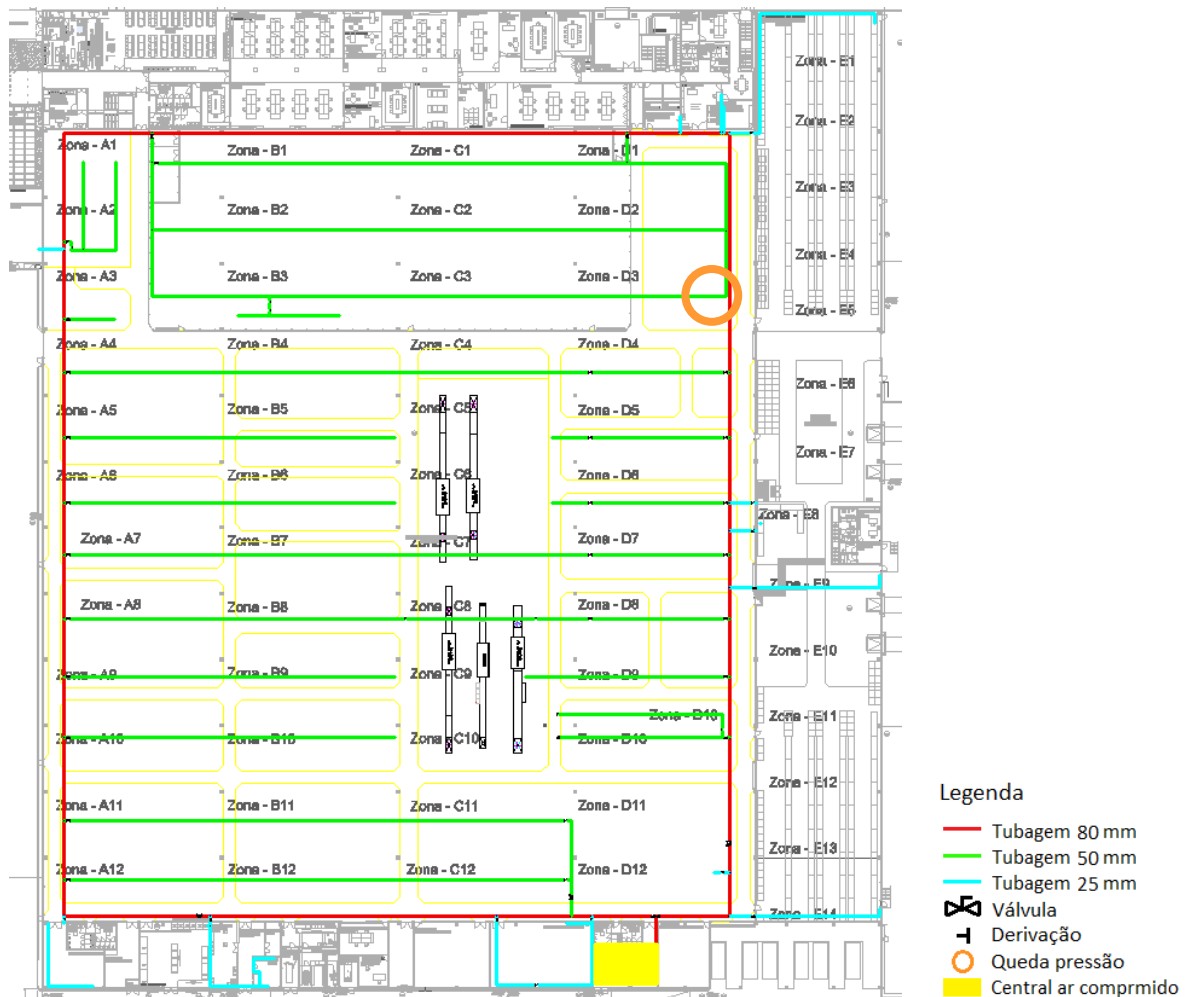


Figura 4.6 – Localização da linha de produção da área ESD com queda de pressão

4.2.1 Análise do Problema

De acordo com a metodologia de resolução de problemas 8D, foi, primeiramente, criada a equipa para trabalhar no problema. A equipa era composta pelo responsável do departamento *Manufacturing Services*, pela Ana Silva, pelo *team leader* e pelo técnico de manutenção, responsáveis pela linha de produção.

O *team leader* e o técnico de manutenção demonstraram que a linha de produção é composta por doze máquinas, todas com uso de ar comprimido. As máquinas 10 e 13, assinaladas a cor de laranja na Figura 4.7, apresentavam erro de baixa pressão e, por isso, as peças não estavam a ser produzidas corretamente.

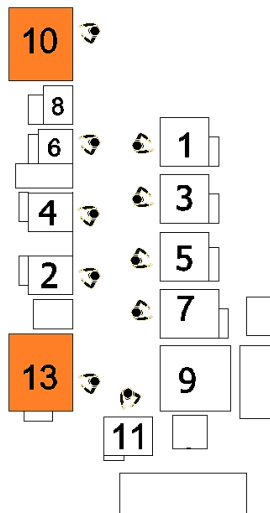


Figura 4.7 – Linha de produção da área ESD com queda de pressão. A cor de laranja, estão assinaladas as máquinas com problemas

A linha de produção é composta por prensas mecânicas, aparafusadoras elétricas e máquinas que fazem testes de fugado. Tanto as prensas como as aparafusadoras, apenas usam o ar comprimido em cilindros que fazem a amarração das peças. Por oposição, as máquinas de teste de fugado, que são as que apresentavam problemas de queda de pressão, usam ar comprimido tanto em cilindros, que fazem a amarração das peças, como para encher as cavidades das mesmas e, assim, verificar se possuem fugas.

Para a alimentação das máquinas, existem quatro baixadas (A, B, C e D), duas das quais alimentam as máquinas do lado direito (1, 3, 5, 7 e 9) e as restantes alimentam as máquinas do lado esquerdo (10, 8, 6, 4, 2 e 13) e a de trás (11), conforme demonstrado na Figura 4.8.

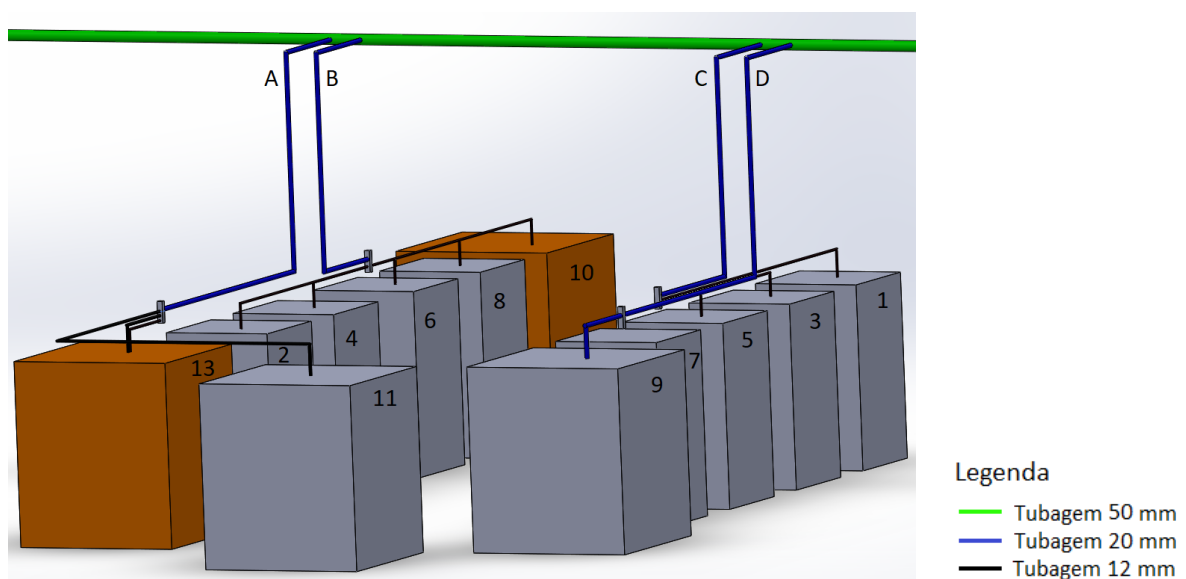


Figura 4.8 – Modelação do estado inicial da linha de produção da área ESD com queda de pressão

Todas as baixadas são feitas com tubagem de 20 mm. Na maioria das máquinas, a jusante das válvulas, as tubagens possuem 10 ou 12 mm. Apenas a máquina 9 é alimentada com tubagem de 20 mm. É de salientar que as alimentações das máquinas com queda de pressão, possuem várias derivações, ou seja, a mesma baixada faz a alimentação a várias máquinas.

Foram registadas as pressões dos manómetros de ambas as máquinas e também do manómetro que existe junto da válvula que faz a alimentação da máquina 13 e 11. Na Tabela 4.2 encontram-se os valores obtidos.

Tabela 4.2 – Pressões das máquinas com o erro de queda de pressão (10 e 13) com e sem produção

Manómetro	Pressão [bar]	
	Com produção	Sem produção
Antes máquina 13	7,0	7,5
Máquina 13	5,9/6,5	7,0
Máquina 10	5,5/5,9	6,0

A pressão necessária para as máquinas funcionarem normalmente é 6 bar. Analisando os valores de pressão obtidos, verifica-se que, durante a produção, são alcançados valores inferiores a 6 bar em ambas as máquinas. No caso da máquina 10, mesmo sem produção, a pressão é de 6 bar.

4.2.2 Resolução Imediata

De modo a impedir a interrupção da produção da linha em questão, foram implementadas ações de contenção imediata, nomeadamente a adição, a montante da entrada nas máquinas com problemas, de um *booster*, que eleva a pressão do ar comprimido, e de um acumulador, que armazena o ar comprimido com a pressão elevada. Na Figura 4.9 encontra-se a modelação desta alteração.

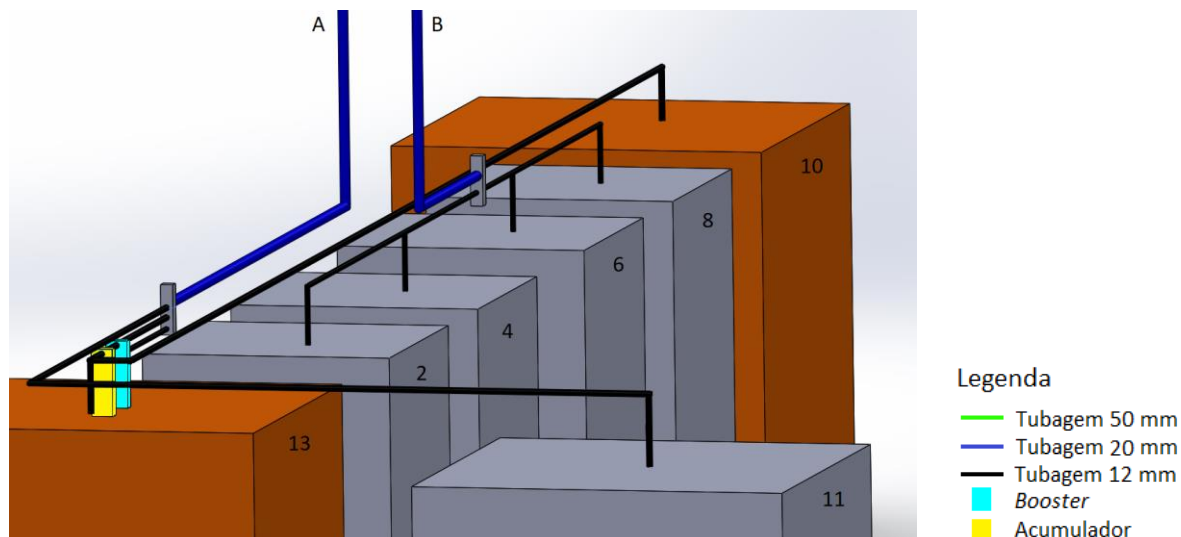


Figura 4.9 – Modelação da alteração efetuada na linha de produção da área ESD com queda de pressão: adição do *booster* e acumulador

Desta forma, foi possível garantir que as máquinas deixassem de apresentar o erro de baixa pressão e, assim, prosseguir com a produção, tal como se pode verificar pelos valores de pressão registados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Pressões das máquinas com o erro de queda de pressão (10 e 13) com e sem produção na situação atual: adição do *booster* e acumulador

Manómetro	Pressão [bar]	
	Com produção	Sem produção
Antes máquina 13	6,5	7,0
Máquina 13	6,9/7,5	8,0
Máquina 10	6,0/6,2	6,5

No Anexo G encontram-se os equipamentos que foram adicionados.

4.2.3 Causa Raiz

Após o solucionamento imediato, é fundamental analisar o problema para definir a causa raiz. Nesse sentido, verificou-se que as variáveis que influenciam a queda de pressão são o fator de fricção, caudal, comprimento da tubagem, diâmetro interno da tubagem e a pressão de regime.

Para diminuir a queda de pressão tem de se reduzir o fator de fricção, caudal, comprimento da tubagem e aumentar tanto o diâmetro interno da tubagem como a pressão de regime. O fator de fricção é dependente do tipo de material. O caudal pode ser reduzido nos casos em

que a tubagem alimenta mais do que uma máquina, alterando para alimentação máquina a máquina. Em relação ao comprimento e diâmetro da tubagem basta serem alterados. A pressão de regime pode ser aumentada através da adição de *boosters* ou aumentando a pressão de saída dos compressores. Dado que o aumento de 1 bar na pressão de saída dos compressores equivale ao aumento de 7% do consumo de energia, esta opção deve ser evitada ao máximo.

De seguida, achou-se que seria pertinente verificar se os diâmetros das tubagens vão ao encontro dos diâmetros ideais, de acordo com o consumo de cada máquina (Anexo H). O consumo foi medido com o auxílio de caudalímetros (Anexo I). A experiência consistiu em medir o caudal consumido, durante a produção de cinco peças, pelas máquinas da linha de produção da área ESD com problemas de queda de pressão.

Uma vez que os processos produtivos são compostos por várias etapas, o consumo será variável. Neste caso, importa considerar o pior cenário possível, ou seja, os valores máximos, para garantir que a tubagem assegura o caudal necessário para cada máquina. A experiência também permitiu verificar o caudal de fugas de cada máquina. Na Tabela 4.4 estão discriminados os caudais de fugas e os caudais máximos obtidos durante a produção das cinco peças.

Tabela 4.4 – Consumos máximos das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão, obtidos durante a produção de cinco peças, e para fugas

Máquina	Caudal máximo [L/min]	
	Produção	Fugas
1	103	11
2	102	12
3	104	6
4	105	8
5	101	7
6	106	12
7	105	9
8	104	8
9	103	11
10	501	7
11	102	6
13	695	6

Analisando os valores de consumos obtidos, verifica-se que as máquinas que apresentavam problemas de queda de pressão (10 e 13) consomem, aproximadamente, 55% do consumo total de ar comprimido da linha de produção. Com esses valores é possível calcular os diâmetros ideais da tubagem para alimentar cada uma das máquinas (Anexo J). Na Tabela 4.5 estão discriminados os diâmetros normalizados atuais e ideais, permitindo, assim, verificar que tanto a máquina 10 como a 13 necessitam de ser alimentadas por tubagem com diâmetro superior ao atual. No que diz respeito às restantes máquinas, a tubagem usada possui diâmetro suficiente.

Tabela 4.5 – Diâmetros normalizados atuais e ideais da tubagem de alimentação das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão

Máquina	Baixada	Diâmetro atual [mm]	Diâmetro ideal [mm]	Alimentação	Diâmetro atual [mm]	Diâmetro ideal [mm]
10	1	20	20	1	<u>12</u>	<u>20</u>
8						
6				2	12	4
4						
2						
13	2	<u>20</u>	<u>25</u>	1	10	12
11				2	10	4
1	3	20	6	1	12	8
3						
5						
7						
9	4	20	4	1	20	4

Desta forma, conclui-se que a causa raiz do problema em questão é o diâmetro insuficiente da tubagem. No caso da máquina 10 é o diâmetro da tubagem de alimentação e no caso da máquina 13 é o diâmetro da tubagem da baixada.

4.2.4 Soluções

Para além da solução imediata que foi implementada e que resolveu o problema, foram abordadas outras duas. Uma delas é também de caráter imediato, ou seja, para quando ocorre o problema, e a outra é uma solução para ser implementada em novas linhas de produção, de modo a prevenir a situação.

A primeira consiste em alterar as tubagens e, se necessário, reformular as baixadas e as alimentações das máquinas que apresentam queda de pressão. A vantagem desta solução são os custos reduzidos. Apenas é necessário adquirir tubagem e acessórios. Para esta solução, deve começar-se por verificar qual o diâmetro ideal da tubagem, tal como foi realizado previamente. Caso os valores obtidos sejam muito elevados, superiores a 25 mm, deve ser adicionada uma nova baixada para alimentar diretamente a máquina, ao invés de se alterar apenas a tubagem. No caso em estudo, de acordo com os diâmetros ideais de tubagem obtidos para as máquinas com queda de pressão, o resultado seria o da Figura 4.10.

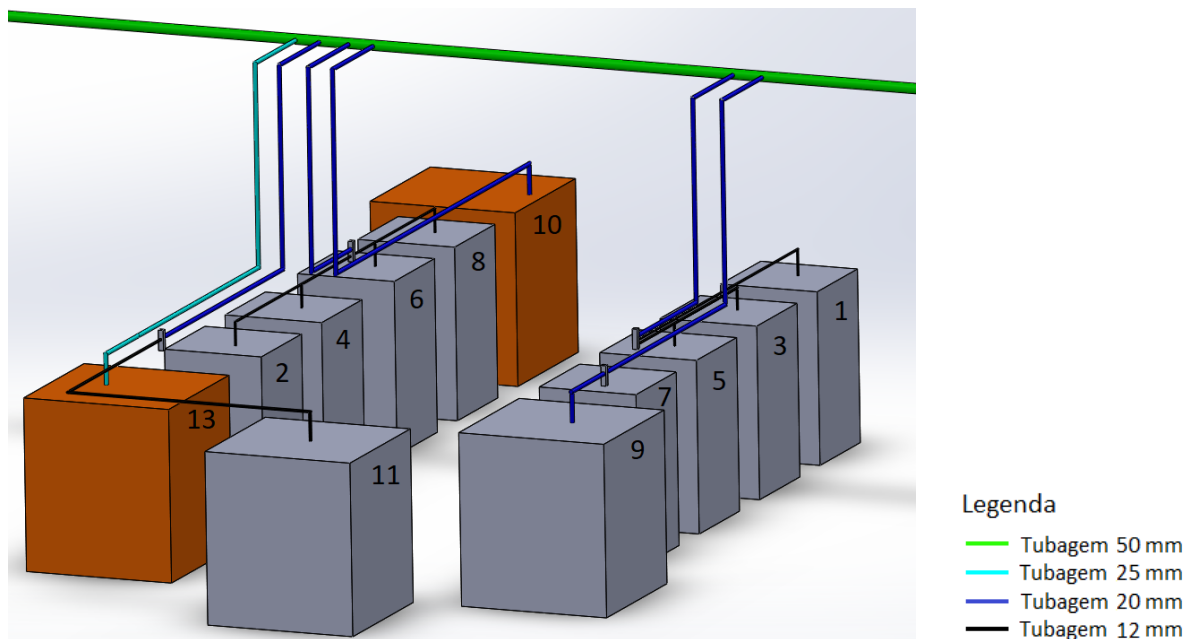


Figura 4.10 – Reformulação da tubagem das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão

A segunda solução consiste num anel fechado, situado por cima da linha de produção, que permite que seja efetuada a alimentação máquina a máquina. O anel garante a uniformização da distribuição de ar comprimido por toda a linha de produção. Para esta solução basta que haja apenas uma baixada. Deste modo, é possível seccionar a linha de produção, através da colocação de uma válvula, a montante do anel. Além disso, a válvula permite que seja economizado o consumo de fugas, quando não há produção.

Para o desenvolvimento deste projeto piloto, foi considerada a linha de produção anteriormente abordada. Primeiramente, começou-se por definir as dimensões do anel em função das distâncias mínimas entre as máquinas. Obteve-se um comprimento de 8 m por 2,5 m de largura, que equivale a 21 m de comprimento linear. Em seguida, determina-se o diâmetro da tubagem do anel em função do caudal consumido por todas as máquinas.

Obteve-se um diâmetro normalizado de 50 mm. Na Figura 4.11 está representado o projeto piloto.

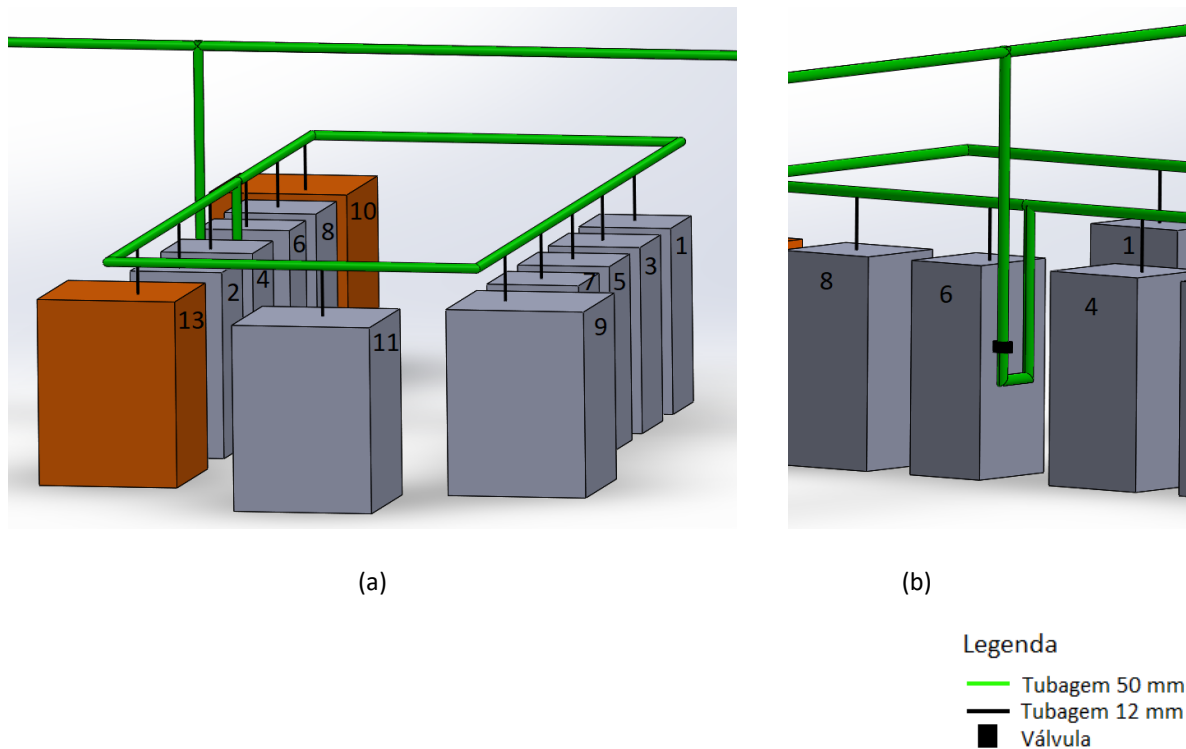


Figura 4.11 – Projeto piloto: (a) vista global ; (b) localização da válvula

4.2.5 Procedimento de Resolução

De acordo com a metodologia 8D, usada para estudar o problema, foi criado um procedimento de análise e resolução deste tipo de problemáticas. Deste modo, no futuro, quando se sucederem estas situações, é mais rápido e simples tanto analisa-las como resolvê-las.

A equipa deve ser composta pelo responsável do departamento *Manufacturing Services*, pelo responsável dos assuntos relacionados com ar comprimido, *team leader* e técnico de manutenção da linha de produção em causa. Caso seja pertinente, podem ser adicionados outros elementos.

De seguida, o problema deve ser definido em pormenor, em particular a localização da linha de produção, a máquina em questão, a sua funcionalidade e a respetiva utilização de ar comprimido, quando começou a ser detetada e em que etapa ocorre a queda de pressão ou que é mais notável.

As ações de contenção imediata pressupõem, primeiramente, a alteração apenas da tubagem. Se necessário, alterar também as baixadas e as alimentações. Em segundo lugar, pode ser adicionado um *booster* e um acumulador. Para estas opções tem de se verificar, previamente, qual o diâmetro ideal da tubagem. Para isso, foi criada uma calculadora que permite determinar o diâmetro ideal e normalizado da tubagem, inserindo apenas os valores de caudal e comprimento da tubagem. Deste modo, é possível analisar de uma forma célere vários cenários. No Anexo K encontra-se a calculadora em questão. Só em último recurso, aumentar o *setpoint* dos compressores, pois é a opção mais dispendiosa.

Para se definir a causa raiz deve ser elaborado um esquema das baixadas e das alimentações, deve-se analisar os valores obtidos de diâmetro ideal da tubagem e verificar se foram efetuadas alterações na linha de produção.

De uma forma geral, a principal ação corretiva é garantir que, antes de se efetuar qualquer alteração na tubagem de ar comprimido, sejam analisadas as necessidades de caudal das máquinas em questão, de modo a determinar o diâmetro ideal da tubagem. Contudo, de acordo com cada caso, podem surgir outras ações corretivas.

Para prevenir, foi desenvolvido o projeto piloto, no que toca a linhas de produção novas, e deve ser usada a calculadora do diâmetro ideal da tubagem, sempre que for realizada alguma alteração.

Por fim, deve-se concluir a análise, divulgar os resultados e congratular todos os intervenientes pelo sucesso alcançado.

4.2.6 Caderno de Encargos

Os ativos físicos das empresas são fatores estratégicos, pelo que uma adequada aquisição e acompanhamento do ciclo de vida são aspetos determinantes para a competitividade. O processo de vida de um ativo inicia-se com o elemento basilar, o caderno de encargos. O caderno de encargos é um documento contratual, onde o contratante descreve as cláusulas que têm de ser garantidas pelo fornecedor.

A cláusula pneumática do caderno de encargos da empresa foi analisada e verificou-se que eram exigidos os esquemas pneumáticos e a indicação da pressão de regime. Contudo, achou-se que seria pertinente, em termos de indicação de informação, especificar as pressões máxima e mínima admissíveis e o consumo de ar comprimido de cada uma das máquinas.

Além disso, sugeriu-se que, aquando a conceção das máquinas, seja tida em consideração a localização da alimentação de ar comprimido de acordo com o projeto piloto (anel fechado).

4.3 Rede de Ar Comprimido

A manutenção preventiva é um fator importante da gestão de qualquer tipo de infraestruturas e, por isso, foi criado um plano de manutenção preventiva para a rede de ar comprimido. A rede de ar comprimido foi avaliada em termos de perdas de carga e, em função dos resultados obtidos, foi sugerida a reformulação da rede de distribuição da zona com maior queda de pressão.

4.3.1 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva contribui para o aumento do tempo de vida dos equipamentos, para a diminuição do tempo de inatividade indesejado e, em última instância, para a redução de custos de manutenção a longo prazo. Além disso, com o passar do tempo, é natural que as fugas, perdas de carga e condensados aumentem assim como os equipamentos também tendem a desgastar-se. Por esses motivos, foi criado um plano de manutenção preventiva da rede de ar comprimido, de forma a garantir que se encontra operacional para servir os clientes internos.

Os requisitos necessários para inserir a manutenção em SAP são a periodicidade, as tarefas a realizar, os equipamentos e EPI necessários, a duração, o número de pessoas e quem executa. As tarefas foram selecionadas em função das variáveis que estão relacionadas com a eficiência da rede, nomeadamente fugas, perdas de carga e condensados, e pontos de desgaste, tais como ligações, fixações e passadores. Os equipamentos estão dependentes das tarefas, ou seja, para se aceder à rede é necessária uma plataforma, para medir as fugas é necessário o detetor de fugas e para a medição de pressão é necessário um manómetro de engate rápido. Para o uso da plataforma é imprescindível a presença de duas pessoas, uma para a usar e outra para controlar e auxiliar tanto a movimentação da plataforma como dos peões. Quanto aos EPI, na produção é obrigatório o uso de óculos, luvas e botas de proteção, e para usar a plataforma é indispensável o uso tanto de capacete como de arnês. No que diz respeito à duração, estima-se que será necessário um dia de trabalho, dada a extensão da rede de ar

comprimido. Uma vez que são necessárias duas pessoas, a duração tem de ser considerada também duas vezes.

Os requisitos obtidos são:

- Periodicidade: anual
- Tarefas:
 - Verificar existência fugas nas ligações e nas baixadas;
 - Medir a pressão nos pontos assinalados (Anexo M).
 - Analisar a existência de condensados na rede;
 - Verificar se os passadores estão funcionais (abrir e fechar);
 - Verificar estado geral de conservação da rede;
 - Verificar fixações das tubagens;
- Equipamentos:
 - Plataforma;
 - Detetor de fugas;
 - Manómetro de engate rápido.
- EPI:
 - Capacete;
 - Arnês;
 - Óculos;
 - Luvas;
 - Calçado de proteção.
- Duração: 16 h (8+8)
- Número de pessoas: 2
- Quem executa: responsável pelo ar comprimido e respetivo *backup*

4.3.2 Perdas de Carga

A rede de ar comprimido foi avaliada em termos de perdas de carga, através de medições de pressão. As medições foram efetuadas diretamente nas linhas de distribuição e em vários pontos de acesso de utilização com o auxílio de um manómetro de engate rápido. Aquando as medições, o *setpoint* dos compressores era 6,5-7,0 bar.

Os pontos de medição foram seleccionados em função das zonas mais críticas, que, normalmente, são as que se localizam mais distantes da central de ar comprimido. Além disso, teve-se em consideração os locais que a plataforma consegue aceder. A área ESD, além de ser a zona mais afastada, possui uma geometria da rede de distribuição diferente da restante, especificamente três linhas de distribuição em anel fechado que são alimentadas apenas por duas ligações ao anel principal. Por essa razão, a maioria dos pontos de medição foram seleccionados nessa área e na anterior à mesma, de modo a facilitar a comparação.

Na rede de distribuição, foram realizadas três medições em dias diferentes, duas no turno da manhã e uma no turno da tarde. Na Figura 4.12 estão assinalados os pontos de medição e as respectivas médias dos valores obtidos.

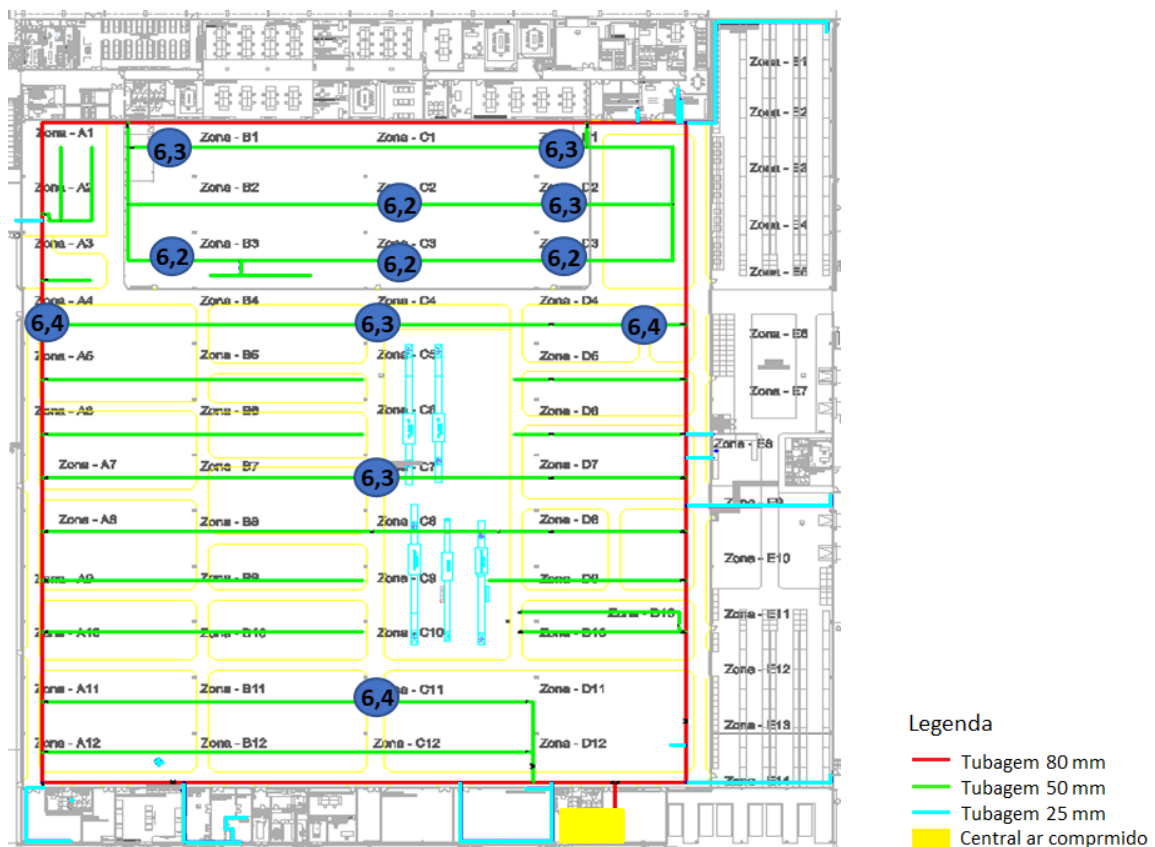


Figura 4.12 – Valores médios de pressão, medidos nas linhas de distribuição de ar comprimido

De uma forma geral, a queda de pressão nos locais próximos do anel principal é 0,1 bar e na zona central das linhas de distribuição é 0,2 bar. Na entrada da área ESD, as perdas de carga equivalem também a 0,2 bar, no entanto, o valor acentua-se para 0,3 bar nas últimas duas linhas, tal como seria expectável.

Nos pontos de acesso de utilização, as medições foram efetuadas durante três dias em dois horários diferentes, de modo a incluir uma medição no turno da manhã e outra no turno da tarde. Os horários das medições foram escolhidos tendo em conta as respetivas pausas dos turnos, de forma a garantir que as medições não fossem realizadas em momentos que houvesse menos produção. Na Figura 4.13 estão assinalados as médias dos valores obtidos.

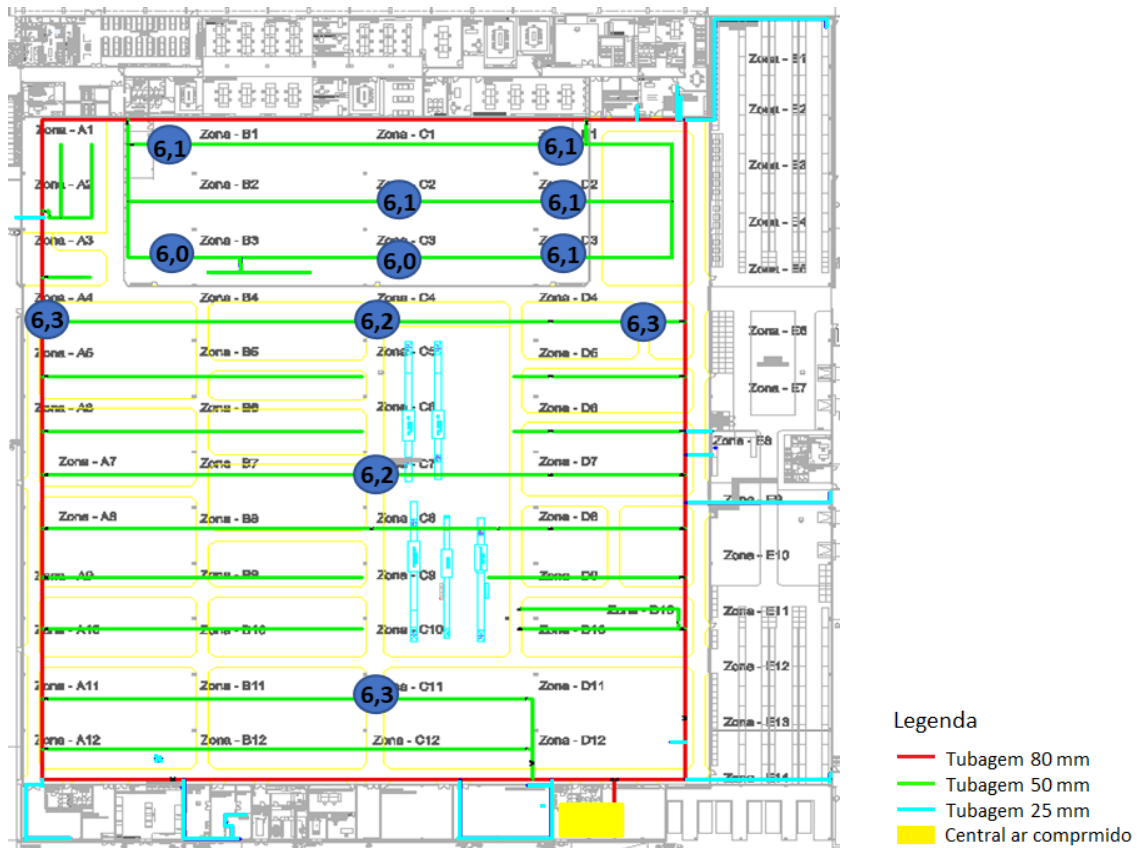


Figura 4.13 – Valores médios de pressão, medidos nas entradas de ar comprimido das máquinas

Nos pontos de acesso de utilização, verificou-se que na área ESD as perdas de carga variam entre 0,4 e 0,5 bar e nas restantes zonas entre 0,2 e 0,3 bar.

No Anexo L estão discriminados os valores obtidos em ambas as medições. Perante estes valores, pode-se considerar que a rede de distribuição de ar comprimido possui perdas de carga admissíveis.

4.3.3 Reformulação

De acordo com os resultados obtidos na análise de perdas de carga da rede e tendo em conta que o problema de queda de pressão ocorreu numa linha de produção da área ESD, achou-se

pertinente analisar a geometria da rede de distribuição de ar comprimido dessa zona, que se evidencia na Figura 4.14.

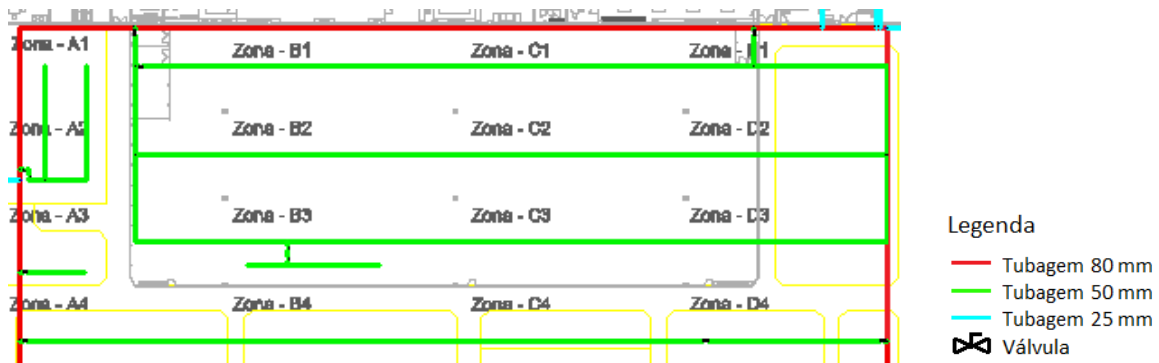


Figura 4.14 – Rede de distribuição de ar comprimido da área ESD, zonas B1 a D3

A rede de distribuição da área ESD, zonas B1 a D3, é composta por três linhas de distribuição em anel fechado. As três linhas são alimentadas pelas duas ligações que a linha 1 possui ao anel principal, contrariamente ao que acontece na restante rede, em que cada linha de distribuição possui ligação direta ao anel principal.

Para diminuir as perdas de carga desta zona, a configuração das linhas de distribuição deve ser igual à da restante rede. Para isso, em primeiro lugar, tem de se retirar as ligações entre as linhas. Uma vez que a linha de distribuição 1 já possui duas ligações ao anel principal, mesmo não estando localizadas nas extremidades como na restante rede, considera-se que devem ser aproveitadas e apenas se deve prolongar a linha até à zona A1. Para ligar as restantes linhas, 2 e 3, ao anel principal, têm de ser prolongadas até às zonas A2 e A3, respetivamente, tal como se pode verificar na Figura 4.15.



Figura 4.15 – Proposta de melhoria da rede de distribuição de ar comprimido da área ESD, zonas A1 a D3

As linhas de distribuição distam 11 m entre si e distanciam-se a 15 m do lado esquerdo do anel principal e do lado direito localizam-se por baixo do mesmo, mais propriamente a 3,3 m de

distância. Tendo em conta que a rede de ar comprimido é relativamente recente e que se encontra em boas condições, é possível fazer-se reaproveitamento de material. Assim sendo, da retirada das ligações entre as linhas resultam 44 m (11x4) de tubagem de 50 mm, 3 acessórios em T de 50 mm e 3 curvas de 50 mm. Para o prolongamento das três linhas até à zona A são necessários 45 m (15x3) e para as ligações das linhas 2 e 3 são necessários 13,2 m (3,3x4) de tubagem de 50 mm, 4 curvas de 50 mm, 4 válvulas de 50 mm e 4 acessórios em T de 75 mm. Na Tabela 4.6 estão discriminadas as quantidades de material existente, material necessário para a intervenção e material que é preciso adquirir. A intervenção deve ser realizada por uma empresa externa com competências na área.

Tabela 4.6 – Material necessário para a alteração da rede de distribuição da área ESD

Material existente	Quantidade existente	Quantidade necessária	Quantidade a comprar
Tubagem 50 mm	44 m	58,2 m	14,2 m
T 50 mm	3	0	0
Curva 50 mm	3	4	1
Válvula 50 mm	0	4	4
T 75 mm	0	4	4

Com a alteração sugerida, as perdas de carga máximas das linhas de distribuição da área ESD, seriam de 0,3 bar (Anexo N).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentam-se as conclusões do projeto realizado e as sugestões de possíveis trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

No que concerne a fugas de ar comprimido, o procedimento de monitorização foi otimizado de acordo com a metodologia PDCA, ou seja, as sugestões de melhoria foram aplicadas na prática, por forma a serem validadas. Foi alterado o método de deteção e de verificação das fugas, passando a usar-se o detetor de fugas ultrassónico. Essa alteração, além de tornar o procedimento mais eficiente, permite quantificar o caudal e os custos das fugas. Em termos da documentação de gestão, foi necessário efetuar alterações para a adaptar às melhorias implementadas, principalmente para quantificar as perdas e os proveitos monetários. Dada a importância da sensibilização do pessoal técnico, este tópico foi abordado presencialmente, durante a realização das auditorias a todas as linhas de produção, foi disponibilizada a documentação de gestão na rede e o status das fugas passou a conter os custos e a ser enviado também para os técnicos de manutenção, uma vez que atuam diretamente na etapa de resolução. De forma a garantir o seguimento sistemático do tema, foi criado um plano de auditorias que será concretizado pelos elementos do departamento *Manufacturing Services*.

O acompanhamento realizado durante o estágio possibilitou eliminar 68% das fugas, o que equivale a um proveito de 4300 €. Com as fugas não reparadas, que representam os restantes 32%, até ao fim do ano, é ainda possível economizar 1700 €. Até ao momento, foram gastos 2100 € em fugas de ar comprimido. Em termos de caudal, as fugas não reparadas representam 5% da produção de ar comprimido. O trabalho desenvolvido permite que futuramente esta análise seja feita anualmente. O resultado final foi bastante positivo devido ao apoio e empenho de todos os intervenientes no processo.

Para a resolução do problema de queda de pressão detetado numa linha de produção da área ESD foi aplicada a metodologia 8D. Por forma a resolver o problema no imediato, foram inseridos um *booster* e um acumulador a montante das entradas de ar comprimido nas máquinas com queda de pressão. Posteriormente, verificou-se que a causa raiz era o diâmetro insuficiente da tubagem. De forma a prevenir a ocorrência do problema foi desenvolvido o projeto piloto de alimentação de ar comprimido em anel fechado, para novas linhas de produção. No que respeita a modificações na distribuição de ar comprimido realizadas internamente, foi criada uma calculadora que permite determinar o diâmetro ideal normalizado da tubagem de ar comprimido, em função do consumo das máquinas a alimentar. Além disso, foi proposto adicionar à cláusula pneumática do caderno de encargos

a especificação das pressões máxima e mínima admissíveis e o consumo de ar comprimido de cada uma das máquinas e também ter especial atenção, aquando a conceção das máquinas, a localização da alimentação de ar comprimido, tendo em consideração que será efetuada em anel fechado, de acordo com o projeto piloto.

Em relação à rede de ar comprimido, foi criado um plano de manutenção preventiva, foi realizada uma avaliação em termos de perdas de carga, e, por fim, foi proposta uma alteração de melhoria. Em termos de perdas de carga, verificou-se que a área ESD é a zona mais crítica, com um máximo de 0,5 bar, e que na restante rede perde-se, no máximo, 0,3 bar. Com a implementação da proposta de melhoria verificou-se que é possível igualar a queda de pressão das linhas de distribuição da área ESD à da restante rede.

5.2. Trabalhos Futuros

Futuramente, é fundamental que seja dado seguimento ao tema das fugas de ar comprimido porque, por um lado, comparando os status inicial, do 2º semestre de 2019, e atual, 1º semestre de 2020, é notório que, havendo um acompanhamento metódico, se obtém uma resposta sistemática, por parte dos técnicos de manutenção, em termos de reparação de fugas. Por outro, pelos proveitos económicos que se demonstrou ser possível alcançar.

No decorrer do estágio, foram sentidas dificuldades na localização de fugas que se encontram em máquinas protegidas por acrílico. Foram avaliadas várias soluções com o departamento de Higiene e Segurança no Trabalho, no entanto, concluiu-se que nenhuma cumpria com todos os critérios de segurança exigidos pela empresa. Dado que a maioria dessas máquinas possui uma grande extensão, a probabilidade de possuírem fugas é ainda maior. Por esse motivo, salienta-se a importância de estudar o assunto.

De acordo com a análise realizada ao funcionamento dos compressores, verificou-se que, em momentos em que a produção é mais baixa, um dos compressores está constantemente a entrar em carga e, logo de seguida, em descarga. Isto deve-se ao facto de um compressor não ser suficiente para responder às necessidades da produção, mas os dois em conjunto rapidamente atingirem o valor de *setpoint* superior e, por isso, um deles entra em descarga. Estas ocorrências provocam um maior desgaste nos compressores. Por esse motivo, sugere-se que sejam avaliados métodos de controlo dos compressores, principalmente quando se encontram nesses momentos de carga-descarga constante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Electrobrás, “Manual Prático - Eficiência Energética Em Sistemas De Ar Comprimido,” *Electrobrás/Procel*, p. 87, 2016.
- [2] A. Do A. Martins, A. C. Delaiba, D. Bispo, G. Ranulfo, and S. F. P. Silva, “Procedimentos de análise de eficiência energética em sistemas de ar comprimido industriais,” *2010 9th IEEE/IAS Int. Conf. Ind. Appl. INDUSCON 2010*, 2010, doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5739926.
- [3] D. Bowers, “Turning up the Heat on Compressed Air,” *Chem. Eng.*, pp. 49–52, 2019.
- [4] ADENE - Agência para a Energia, “Gestão de Energia na Indústria (CGEI) – Módulo I,” 2020. <https://academia.adene.pt/gestao-de-energia-na-industria-cgei-modulo-i/> (accessed Mar. 16, 2020).
- [5] BorgWarner, “Viana Do Castelo - BorgWarner,” 2020. <https://www.borgwarner.com/> (accessed Mar. 18, 2020).
- [6] M. Ferreira, Abel; Baptista, Cristina; Carvalho, Maria; Rasteiro, “Portal Laboratórios Virtuais de Processos Químicos,” 2020. <http://labvirtual.eq.uc.pt/> (accessed Mar. 23, 2020).
- [7] COPEL, “Transformação da Eenergia,” 2020. <https://www.copel.com/> (accessed Mar. 25, 2020).
- [8] E. Economia, “Energia Final e Equivalente - Procedimento Simplificado de Conversão,” 2017. <https://ecen.com/eee18/enerequi.htm> (accessed Mar. 26, 2020).
- [9] M. Neta, “Fontes de Energia,” 2020. <http://www.fq.pt/energia/fontes-de-energia> (accessed Mar. 30, 2020).
- [10] A. de E. R. APREN, “Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental (abril de 2020),” 2020. <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> (accessed Mar. 30, 2020).
- [11] C. Pegollo, “Automação Pneumática.” São Paulo, Brasil, 2016.

- [12] E. Seabra, “Módulo 2: Formas de energia,” Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.
- [13] A. Fialho, *Automação Pneumática - Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos*, 2ª. São Paulo, Brasil: Editora Érica Ltda., 2004.
- [14] A. Barber, *Pneumatic Handbook*, 8th ed., no. December. Elsevier Science & Technology Books, 1997.
- [15] B. S. Elliott, *Compressed air operations manual : an illustrated guide to selection, installation, applications, and maintenance*. 2006.
- [16] A. M. Sequeira, “Estudo conceptual de uma almofada dinâmica: validação experimental da modulação da pressão de contacto, utilizando células de ar comprimido Universidade do Minho Escola de Engenharia,” Universidade do Minho, 2011.
- [17] A. Copco, *Compressed Air Manual*, 7ª. Belgium: Atlas Copco Airpower NV, 2012.
- [18] A. Parr, *Hydraulics and Pneumatics A Technician’s and Engineer’s Guide*, Third. Elsevier Ltd, 2011.
- [19] F. Silva, W. Junior, A. Salvestro, and F. Fasolo, “Projeto da Rede de Distribuição de Ar Comprimido para Uso Laboratorial,” Universidade Paranaense - UNIPAR, 2018.
- [20] P. Hannifin, “Introduction to ISO Air Quality Standards,” *Iso*. Parker Hannifin Corporation, Gateshead, Tyne and Wear, 2010, doi: 174004400_01_EN 04/10.
- [21] C. Instruments, “Leakage Leak detector LD 400,” 2019. [Online]. Available: www.cs-instruments.com.
- [22] FLUKE, “Como detetar fugas de ar comprimido, gás e vácuo E encontrar lucros ocultos.” <https://www.fluke.com/> (accessed Apr. 19, 2020).
- [23] J. M. Quinquilo, “Avaliação da eficácia de um sistema de gerenciamento para melhorias implantando na área de carroceria de uma linha de produção automotiva,” *Diss. Mestr.*, p. 107, 2002.
- [24] H. MATA-LIMA, “Aplicação de ferramentas da gestão da qualidade e ambiente na resolução de problemas. Apontamentos da Disciplina de Sustentabilidade e Impactes Ambientais. Universidade da Madeira (Portugal).” pp. 1–10, 2007.

- [25] V. F. Campos, *Controle da qualidade no estilo japonês*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992.
- [26] V. F. Campos, *Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia*, 1st ed. Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 2001.
- [27] F. Müller *et al.*, “Utilização da análise de causa raiz e 8D nos atrasos de entrega de ordens de compra,” pp. 1–12, 2013.
- [28] Ingersoll Rand, “Compressor de Tornillo Rotativo, Lubrificado de una Etapa: R90n.” .
- [29] Ingersoll Rand, “Filtrado de Aire.” [Online]. Available: <https://www.ingersollrand.com/en-us.html>.
- [30] Ingersoll Rand, “Dec High-Efficiency Cycling Dryers.” 2011, [Online]. Available: <https://www.ingersollrand.com/en-us.html>.
- [31] Ingersoll Rand, “Secador Cíclico de Alta Eficiência Refrigerado Aire.” [Online]. Available: <https://www.ingersollrand.com/en-us.html>.
- [32] D. Maldaner, “Dimensionamento de uma Rede de Ar Comprimido Industrial,” Faculdade Horizontina, 2016.
- [33] Festo, “Plastic tubing, standard O.D.” 2020, [Online]. Available: www.festo.com/catalogue/.
- [34] AIRNet, “AIRNet Catalogue.” 2012, [Online]. Available: www.airnet-system.com.

Anexos

ANEXO A – CAUDAL DEBITADO E CONSUMO DO COMPRESSOR EM FUNÇÃO DA CAPACIDADE

R90n @ 7 bar			
Capacidade %	Caudal m ³ /min	Potência total usada kW	Potência específica kW/(m ³ /min)
50%	8,98	54,63	6,09
60%	10,77	65,56	6,09
70%	12,57	76,49	6,09
75%	13,46	81,95	6,09
80%	14,36	87,41	6,09
85%	15,26	92,88	6,09
90%	16,16	98,34	6,09
100%	17,95	109,27	6,09

ANEXO B – CUSTO DO AR COMPRIMIDO PARA O DETETOR DE FUGAS

O aparelho possui por defeito o valor 20 €/1000 m³. No entanto, de forma a tornar os custos das fugas mais reais, foi calculado o custo da produção de ar comprimido. Para isso é necessário saber a quantidade de energia que os compressores consomem para produzirem o caudal de ar comprimido que debitam e o custo da energia.

Primeiramente, para calcular os caudais que cada um dos compressores debitam num dia normal de produção, começou-se por verificar quais as capacidades a que cada um dos compressores estava a funcionar num dia normal de trabalho e as capacidades e caudais médios de cada um deles. Esses valores são obtidos através da interface de operador dos compressores. Os caudais que cada um dos compressores debitam num dia normal de produção foram calculados através de uma regra de três simples. Na Tabela A.1 encontram-se esses valores.

Tabela A.1 – Valores de caudal e capacidade debitados e médias de ambos os compressores

Compressor	Debitado		Média	
	Caudal [m ³ /min]	Capacidade	Caudal [m ³ /min]	Capacidade
1	9,77	55%	12,20	68,7%
2	9,71		10,40	58,9%
Total	19,48	110%		

De seguida, com o consumo de energia elétrica da sala de produção de ar comprimido dos meses de janeiro e fevereiro calculou-se o consumo médio de energia elétrica e obteve-se o valor de 79155,50 kWh/mês.

Posteriormente, teve de se converter os valores de caudal e consumo para o mesmo período, optando-se pelo diário. No caso do caudal consideraram-se as 24h diárias, dado que a empresa trabalha durante todo o dia, e relativamente ao consumo de energia foram considerados 26 dias, uma vez que a empresa labora, normalmente, de segunda a domingo, mas o consumo de sábado e de domingo é equivalente a um dia de semana. Na Tabela A.2 encontram-se os valores nos diversos períodos até ao pretendido.

Tabela A.2 – Conversão dos valores de caudal e energia elétrica para o período diário

Período	Caudal	Consumo
Minuto	19,48 m ³ /min	-
Hora	1168,71 m ³ /h	-
Dia	28049,01 m ³ /dia	3044,44 kWh/dia
Mês	-	79155,50 kWh/mês

Multiplicando o consumo de energia elétrica pelo seu custo, 0,10 €/kWh, obtém-se o custo diário (304,44 €/dia). Depois, dividindo o custo diário pelo caudal debitado, obtém-se o custo de ar comprimido por metro cúbico (0,01083 €/m³). Uma vez que a unidade do custo do ar comprimido do aparelho de deteção de fugas é €/1000 m³ tem de se converter para essas unidades, obtendo-se 10,83 €/1000 m³.

ANEXO C – RELATÓRIO DIGITAL DE UMA FUGA, GERADO PELO DETETOR DE FUGAS

Leak report **Start: 16.06.2020** **End: 16.06.2020** **Duration: 1 day(s)**

Contact details:

Company:

Customer:

BW

Auditor:

Project master data

Import date:	16.06.2020	CO2 emissions:	0.527 kg/kWh
Cost calculation basis:		Specific power:	0.12 kWh / m ³
Compressed air costs:	10 € / 1000 m ³	Electricity price:	€ / kWh
Annual working hours:	8760 h		

Result:

No. of leakages: 1
 Total leakage rate: 2,719 ltr/min
 Total costs per Year: 14,29 €
 Total CO2 emissions per Year: 0,09 tons

Improvements:

No. of leakages fixed: 0
 Reduced leakage rate: 0 ltr/min
 Reduced costs per Year: 0 €
 Reduced CO2 emissions per Year: 0 tons

Percentage:

0 %
 0 %



LeakTag:

160

Building - Place: PRODUCAO - 7004-2
Date Time: 16.07.2020 12:07:26
Leakage rate: 2.719 ltr/min
Costs per Year: 14,29 €
Total CO2 emissions per Year: 0,09 tons
Priority:
Comment: 11000000651

Leak repair under pressure?

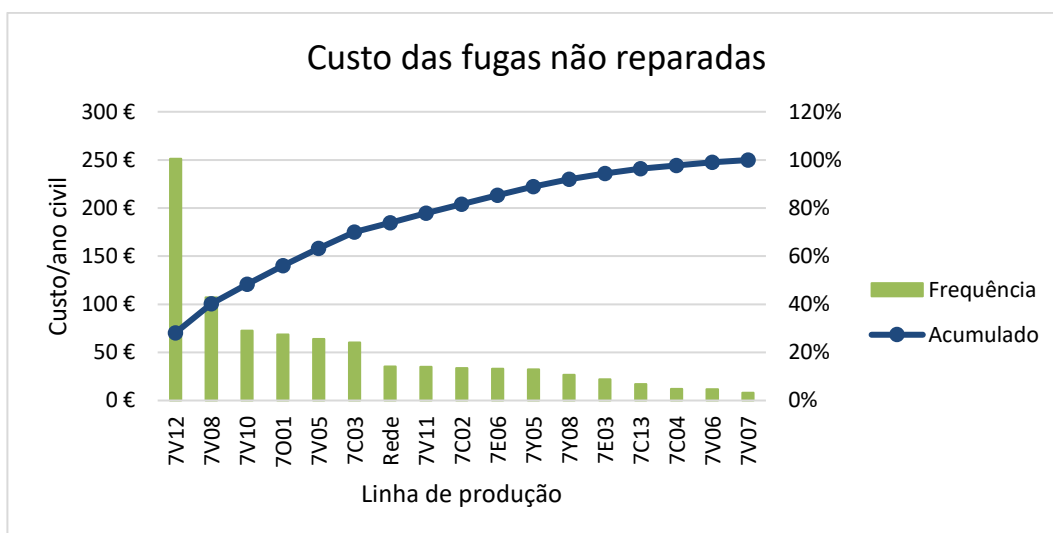
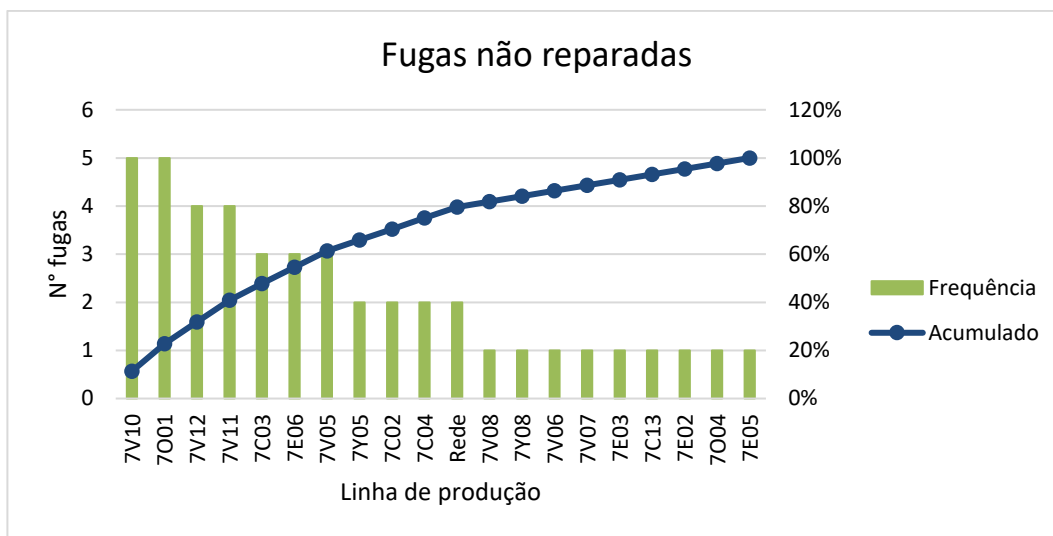
Failure:
Spare part:
Measure:

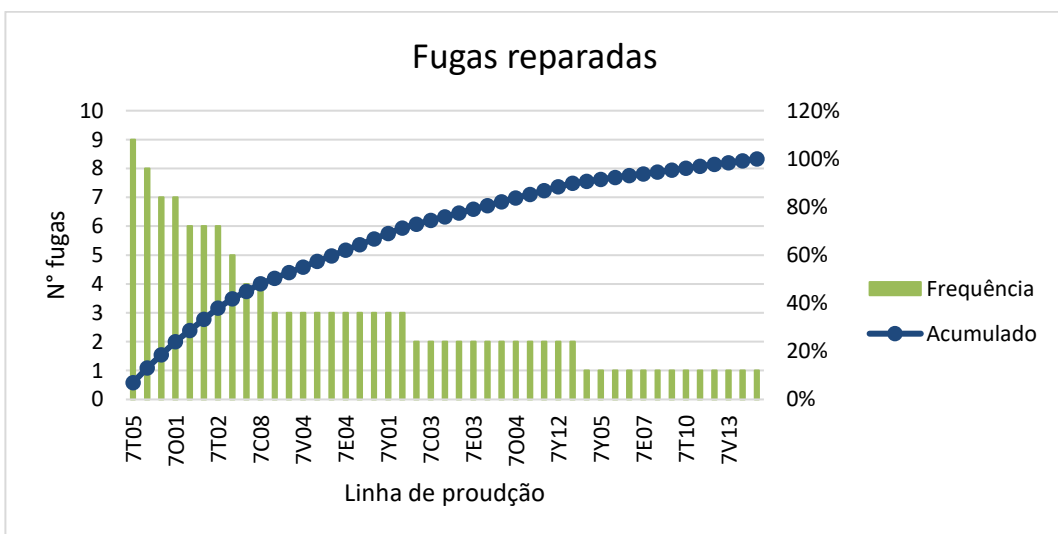
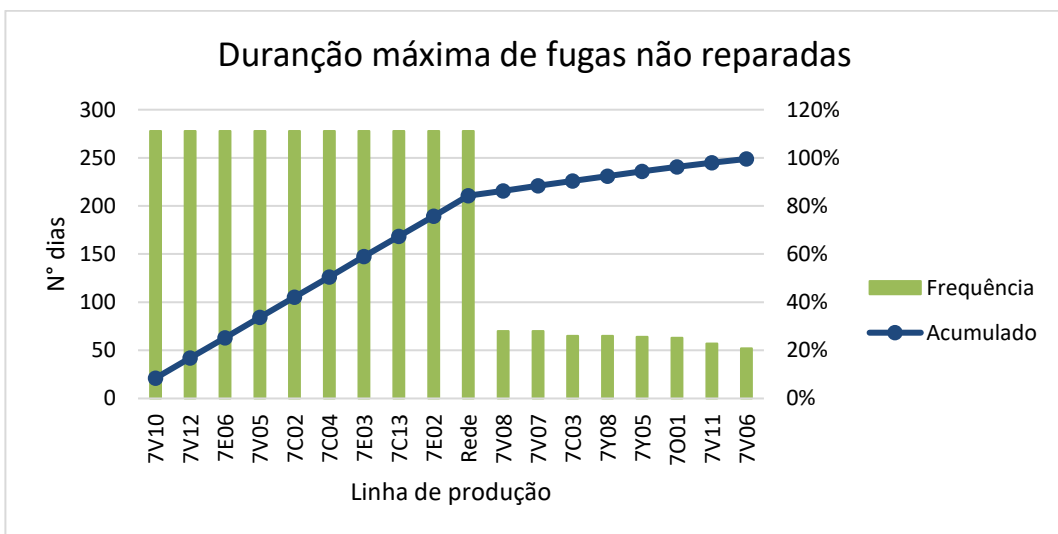
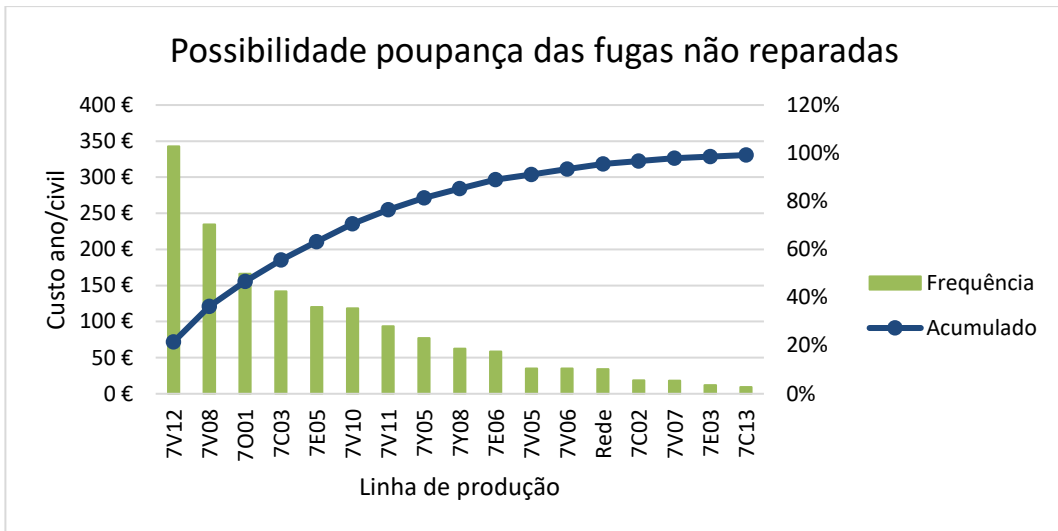
Note:

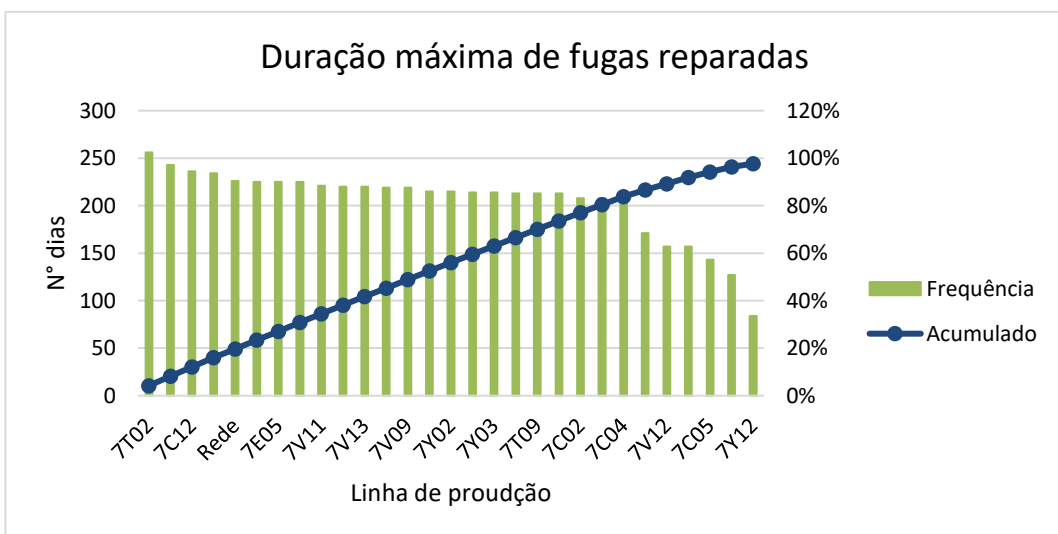
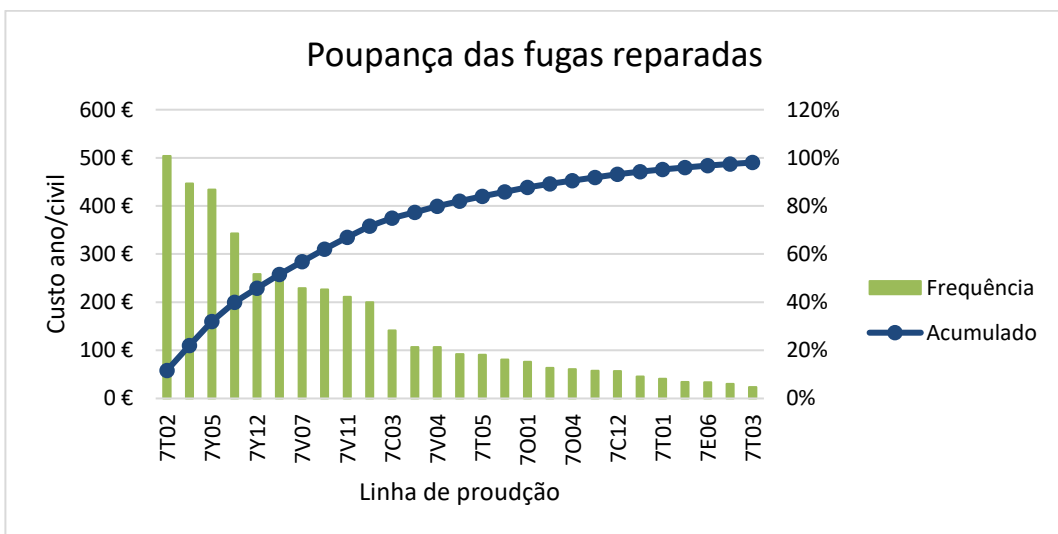
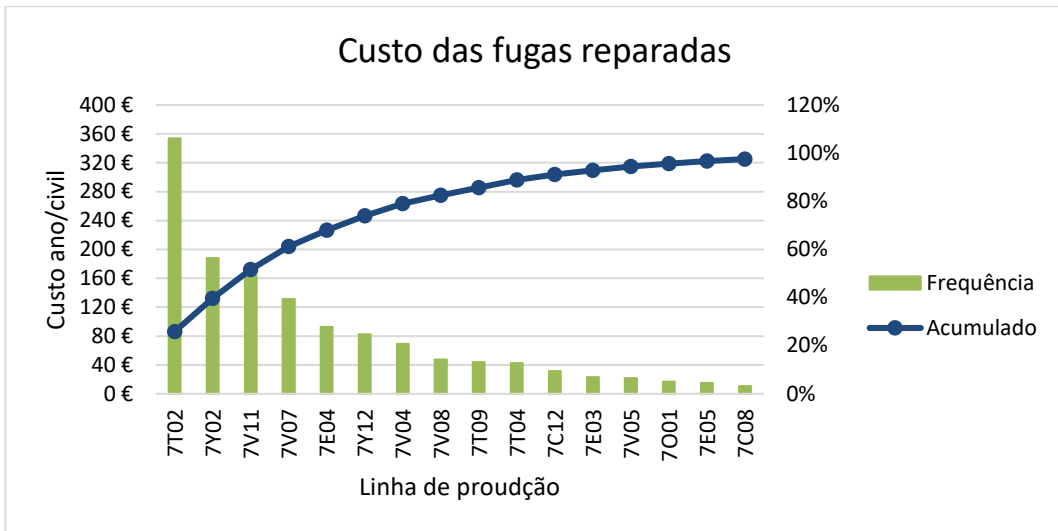
Status:
solved at:
solved by:

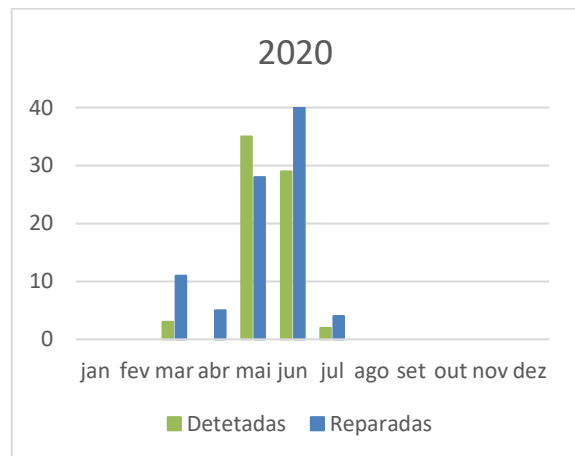
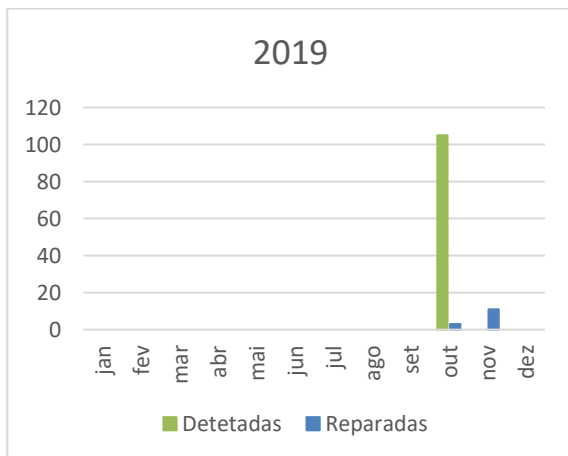
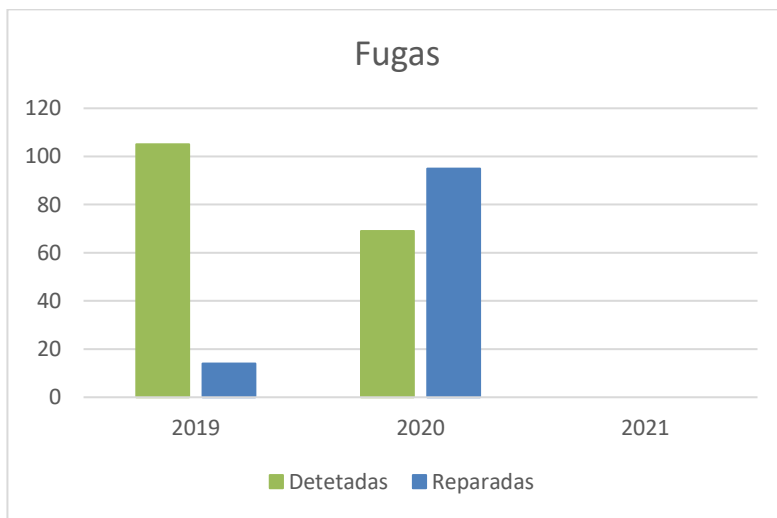
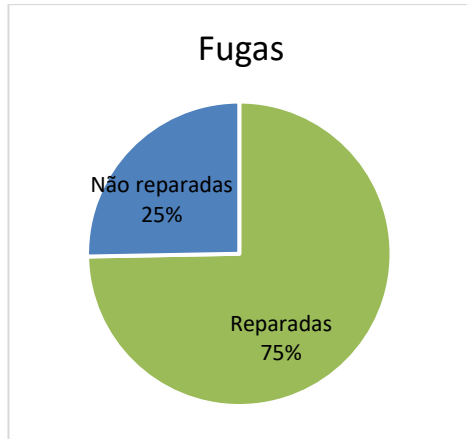


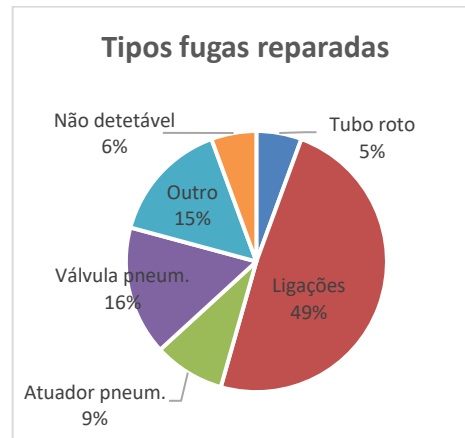
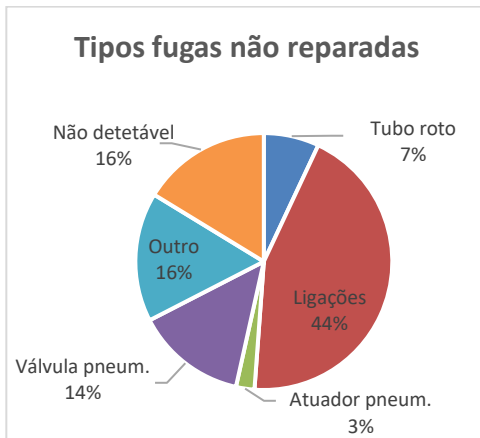
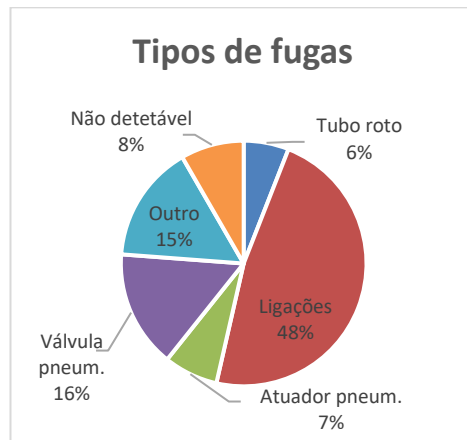
ANEXO D – DIAGRAMAS DE PARETO, GRÁFICOS E QUADRO RESUMO DAS FUGAS CRIADOS NA DOCUMENTAÇÃO DE GESTÃO











RESUMO A 31/07/2020

10,40 € /dia

Estado	Fugas	Custo/ano civil	Custo real	Poupança
Reparadas	130	6 052,46 €	1 369,09 €	4 326,51 €
Não reparadas	44	2 482,62 €	891,52 €	1 591,10 €
Total	174	8 535,08 €	2 260,61 €	5 917,61 €

ANEXO E – PLANO DE AUDITORIAS DE FUGAS DE AR COMPRIMIDO

Plano de auditorias de fugas de ar comprimido



Ano	Semana	Início	Fim	Auditor	Linha	Data realização
2020	32	03/08/2020	07/08/2020	ATA	7E05	
	34	17/08/2020	21/08/2020	ERA	7V07	
	36	31/08/2020	04/09/2020	JOA	7V01	
	38	14/09/2020	18/09/2020	JSA	7V04	
	40	28/09/2020	02/10/2020	RCZ	7E07	
	42	12/10/2020	16/10/2020	RAO	7T04	
	44	26/10/2020	30/10/2020	PVA	7C03	
	46	09/11/2020	13/11/2020	ATA	7T02	
	48	23/11/2020	27/11/2020	ERA	7E01	
	50	07/12/2020	11/12/2020	JOA	7Y03	
	52	21/12/2020	25/12/2020	JSA	7T07	
	2021	1	04/01/2021	08/01/2021	RCZ	7Y12
3		18/01/2021	22/01/2021	RAO	7T06	
5		01/02/2021	05/02/2021	PVA	7C14	
7		15/02/2021	19/02/2021	ATA	7T05	
9		01/03/2021	05/03/2021	ERA	7C07	
11		15/03/2021	19/03/2021	JOA	7Y02	
13		29/03/2021	02/04/2021	JSA	7C11	
15		12/04/2021	16/04/2021	RCZ	7T03	
17		26/04/2021	30/04/2021	RAO	7Y08	
19		10/05/2021	14/05/2021	PVA	7E06	
21		24/05/2021	28/05/2021	ATA	7T12	
23		07/06/2021	11/06/2021	ERA	7Y01	
25		21/06/2021	25/06/2021	JOA	7Y11	
27	05/07/2021	09/07/2021	JSA	7V13		

ANEXO F – GUIÃO DO PROCEDIMENTO DE AUDITORIA DE FUGAS DE AR COMPRIMIDO

Material necessário

1. Detetor de fugas
2. Tubo de foco
3. Abraçadeiras
4. Caneta permanente
5. Etiquetas



Tarefas

1. Ajustar parâmetros do detetor de fugas
2. Detetar fuga
3. Preencher etiqueta
4. Colocar a etiqueta no local da fuga
5. Tirar fotografia à etiqueta preenchida

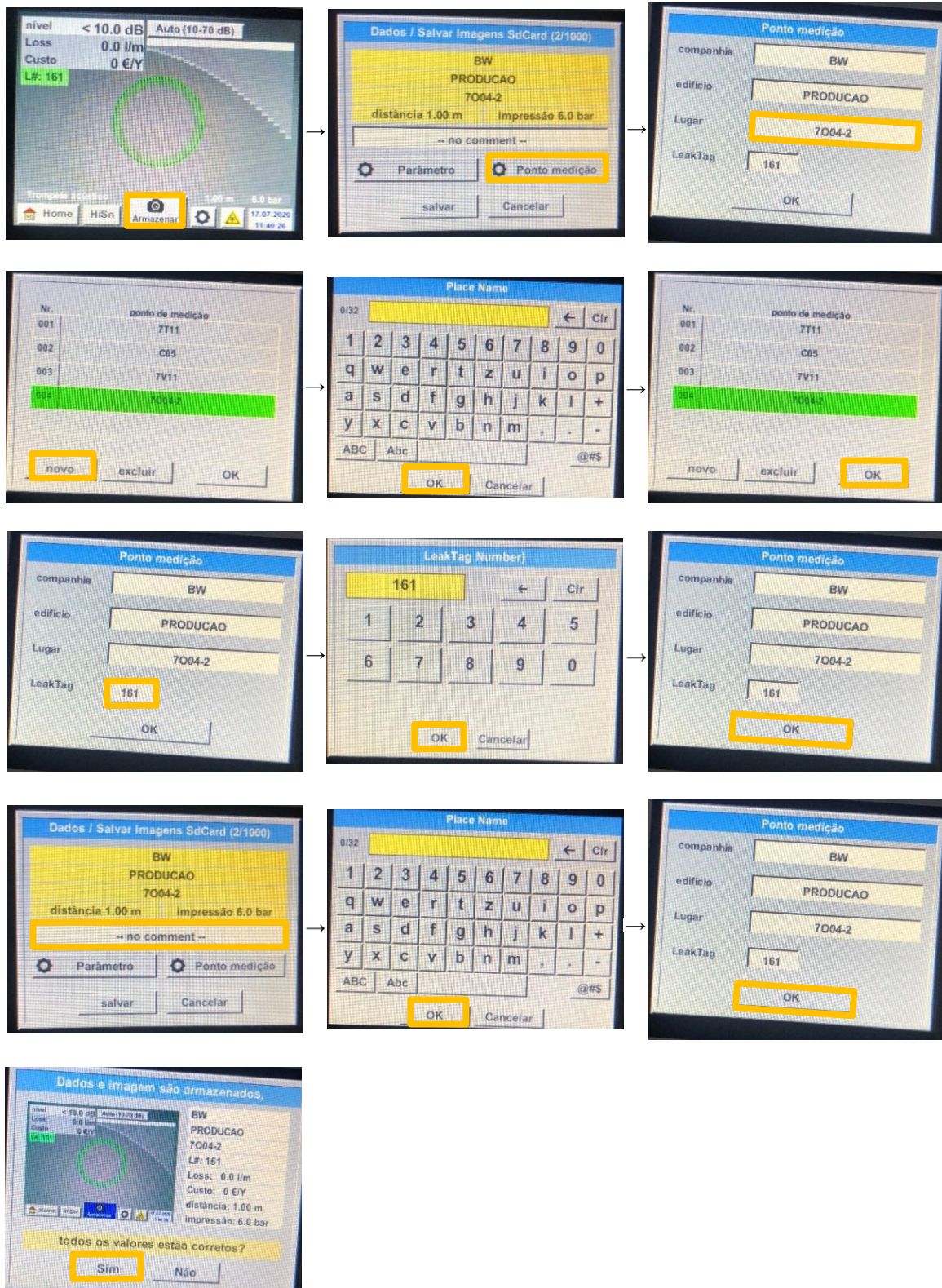
1. Ajustar parâmetros do detetor de fugas

- Tipo de sensor (trompete acústico ou tubo de foco)
- Pressão
- Distância



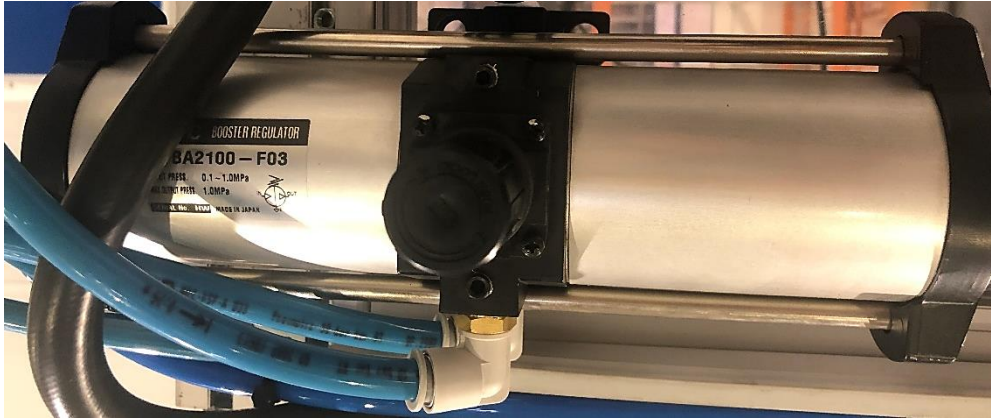
2. Detetar fuga

- Armazenar fuga
- Alterar Lugar – linha de produção
- Alterar Leak tag – n° etiqueta
- Alterar – no comment – n° SAP



ANEXO G – BOOSTER E ACUMULADOR ADICIONADOS NA LINHA DE PRODUÇÃO DA ÁREA ESD COM QUEDA DE PRESSÃO

Booster



Acumulador



ANEXO H – FÓRMULA DE CÁLCULO DO DIÂMETRO INTERNO DA TUBAGEM

$$d = 10 \times \left(\sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q^{1,85} \times L}{\Delta P \times P}} \right) \quad (1)$$

Onde:

d – Diâmetro interno da tubagem [mm];

Q – Caudal [m^3/h];

L – Comprimento da tubagem [m];

ΔP – Queda de pressão [bar];

P – Pressão de regime [bar] [32].

ANEXO I – MEDIÇÃO DO CONSUMO DAS MÁQUINAS DA LINHA DE PRODUÇÃO DA ÁREA ESD COM QUEDA DE PRESSÃO

A empresa possui dois caudalímetros, que se encontram na Figura I.1. O caudalímetro 1 possui alcance de 0 a 100 L/min e o 2 de 50 a 5000 L/min.

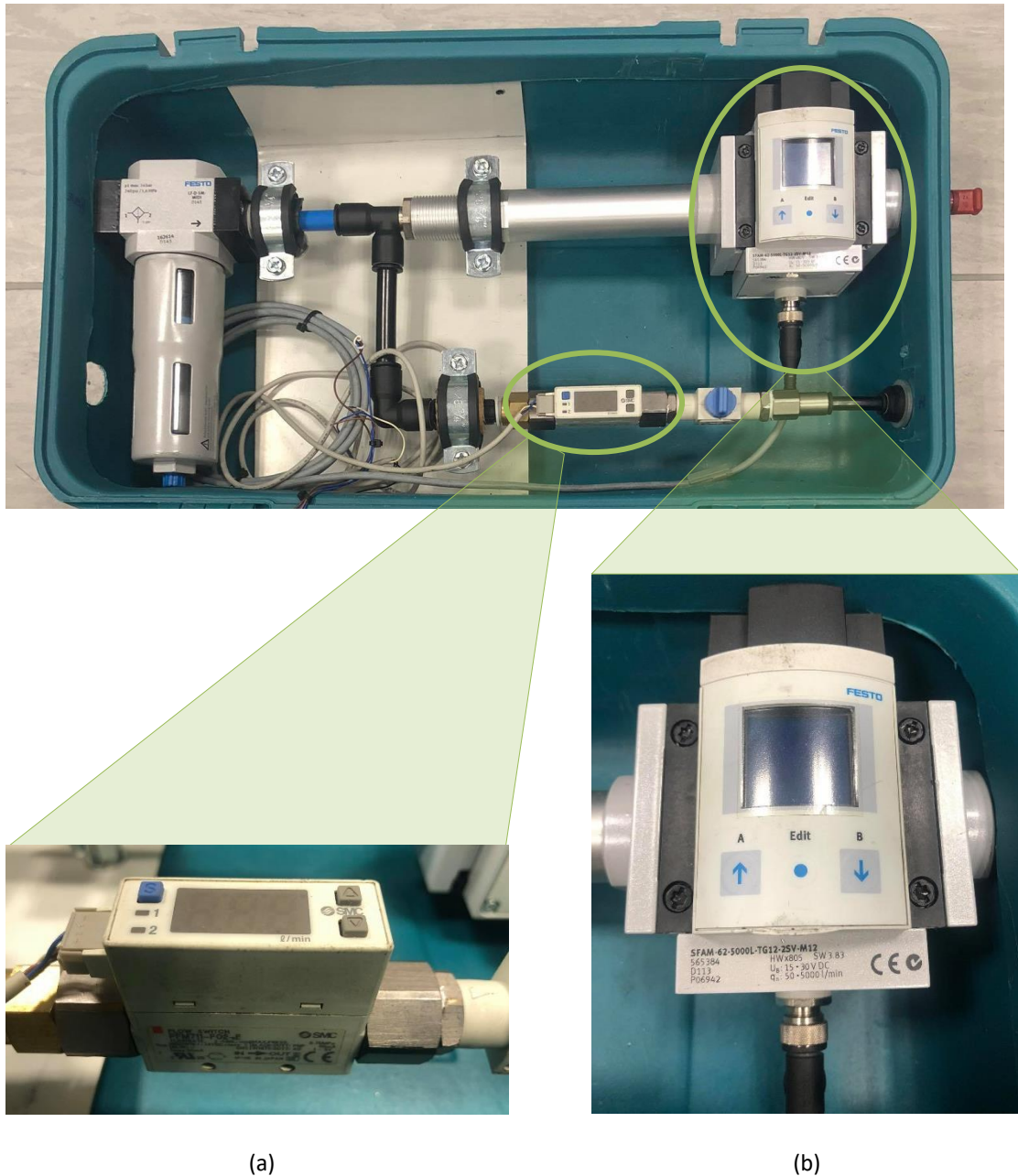


Figura I.1 – Caudalímetros usados para a medição dos consumos das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão: (a) alcance de 0 a 100 L/min; (b) alcance de 50 a 5000 L/min

Para cada uma das máquinas, começou-se por usar o caudalímetro 1 para verificar o consumo em fugas. Para isso, basta colocar o caudalímetro em série com a máquina e colocar a máquina

em carga. De seguida, procedia-se à produção das peças. Se o caudal medido fosse inferior a 100 L/min, efetuava-se as medições com o caudalímetro em questão. Caso contrário, ignorava-se a produção da primeira peça e trocava-se o caudalímetro 1 pelo 2. Uma vez que todas as máquinas consomem mais de 100 L/min, foi usado o caudalímetro 2 em todas as medições da produção de peças. Na Tabela I.1 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela I.1 – Consumos máximos das máquinas da linha de produção da área ESD com queda de pressão, obtidos durante a produção de cinco peças e para fugas

Máquina	Caudal máximo [L/min]					
	Peça					Fuga
	1	2	3	4	5	
1	103	102	102	100	95	11
2	97	102	100	98	95	12
3	90	92	100	96	104	6
4	100	105	95	98	97	8
5	93	96	97	101	94	7
6	99	105	60	100	106	12
7	103	105	93	100	99	9
8	102	97	104	102	101	8
9	95	103	102	93	100	11
10	381	384	492	501	499	7
11	94	90	102	98	101	6
13	695	638	608	692	685	6

ANEXO J – CÁLCULO DO DIÂMETRO INTERNO DA TUBAGEM DE ALIMENTAÇÃO DA LINHA DE PRODUÇÃO DA ÁREA ESD COM QUEDA DE PRESSÃO

Para o cálculo do diâmetro interno da tubagem, de acordo com a equação (1) (Anexo H), são necessários os valores de caudal, comprimento da tubagem, queda de pressão e pressão de regime. A queda de pressão e a pressão regime são valores fixos, 0,2 e 6,5 bar, respetivamente. Na Tabela J.1 encontram-se discriminados os valores de caudal e comprimento da tubagem referentes às baixadas e os respetivos resultados de diâmetros interno e normalizado.

Tabela J.1 – Diâmetros interno e normalizado das tubagens das baixadas da situação inicial

Baixada	Máquina	Q [L/min]	Q [m ³ /h]	L [m]	Diâmetro interno [mm]	Diâmetro normalizado [mm]	
A	13	695	41,70	47,82	6,0	19,6	25
	11	102	6,12				
B	10	501	30,06	55,08	4,0	17,1	20
	8	104	6,24				
	6	106	6,36				
	4	105	6,30				
	2	102	6,12				
C	1	103	6,18	24,78	4,0	3,9	6
	3	104	6,24				
	5	101	6,06				
	7	105	6,30				
D	9	103	6,18	6,18	5,0	0,4	4

Na Tabela J.2 encontram-se discriminados os valores de caudal e comprimento da tubagem referentes à alimentação e os respetivos resultados de diâmetros interno e normalizado, obtidos de acordo com a equação (1) (Anexo H).

Tabela J.2 – Diâmetros interno e normalizado das tubagens de alimentação da situação inicial

Baixada	Alimentação	Máquina	Q [L/min]	Q [m³/h]		L [m]	Diâmetro interno [mm]	Diâmetro normalizado [mm]
A	1	13	695	41,70	41,70	3,5	8,9	12
	2	11	102	6,12	6,12	5,0	0,4	4
B	1	10	501	30,06	42,66	5,5	14,6	20
		8	104	6,24				
		6	106	6,36				
	2	4	105	6,30	12,42	4,5	1,2	4
		2	102	6,12				
C	1	1	103	6,18	24,78	5,5	5,3	8
		3	104	6,24				
		5	101	6,06				
		7	105	6,30				
D	1	9	103	6,18	6,18	2,0	0,1	4

Para os diâmetros normalizados entre 4 a 16 mm foi usado o catálogo da Festo. Na Figura J.1 encontra-se o excerto do catálogo.

Dimensions and ordering data								
Outside ø	Inside ø	Min. bending radius	Flow-relevant bending radius	Weight	Colour	Part no.	Type	PU ¹⁾
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m]				[m]
4	2.5	10	15	0.008	Black	570357	PAN-MF-4x0.75-SW	50
						572091	PAN-MF-4x0.75-SW-500	500
6	4	15	35	0.016		570358	PAN-MF-6x1-SW	50
						572093	PAN-MF-6x1-SW-500	500
8	6	35	50	0.022		570359	PAN-MF-8x1-SW	50
10	7.5	45	65	0.035		570360	PAN-MF-10x1.25-SW	50
12	9	50	70	0.051		570361	PAN-MF-12x1.5-SW	50
14	10	50	75	0.077		570362	PAN-MF-14x2-SW	50
16	12	75	130	0.09		570363	PAN-MF-16x2-SW	50

Figura J.1 – Excerto do catálogo de tubagem da Festo [33]

Para diâmetros entre 20 e 100 mm foi usado o catálogo da AIRNet. Na Figura J.2 encontra-se o excerto do catálogo.

> Aluminium pipe for air (6 m / 20 ft)

2810 □□00 □□

PART NUMBER	OUTSIDE Ø	INSIDE Ø	LENGTH	WEIGHT	LOT SIZE
	(mm / inch)	(mm / inch)	(m / ft)	(kg / lbs)	
2810 1000 10	20 / ¾"	17.4 / 0.69"	6 / 20	1.2 / 2.6	10
2810 2000 10	25 / 1"	22.2 / 0.87"	6 / 20	1.9 / 4.2	10
2810 4000 05	40 / 1½"	36.4 / 1.43"	6 / 20	3.5 / 7.7	05
2810 5000 04	50 / 2"	46.0 / 1.81"	6 / 20	4.6 / 10.1	04
2810 6000 03	63 / 2½"	59.0 / 2.32"	6 / 20	6.2 / 13.7	03
2810 7000 02	80 / 3"	76.0 / 2.99"	6 / 20	9.5 / 20.9	02
2810 8800 00	100/4"	97/3.88"	5.7/ 19	14/ 30	01

Figura J.2 – Excerto do catálogo de tubagem da AIRNet [34]

ANEXO K – CALCULADORA DO DIÂMETRO INTERNO DA TUBAGEM DE AR COMPRIMIDO

Calculadora diâmetro tubagem de ar comprimido



1. Inserir o valor de caudal.

Se necessário, usar o conversor de unidades (l/min para m³/h)

2. Inserir o valor do comprimento da tubagem.

Nota: Se não sabes qual é o consumo da máquina, podes medi-lo com o caudalímetro que a empresa dispõe.

Dados	
1. Caudal	Q <input type="text"/> m ³ /h
2. Comprimento da tubagem	Lt <input type="text"/> m
Queda de pressão admitida:	ΔP 0,2 bar
Pressão de regime	P 6,5 bar

Conversor de unidades	
Caudal	Q <input type="text"/> l/min
	<input type="text" value="0"/> m ³ /h

Diâmetro interno d_{int} mm

Diâmetro externo normalizado d_{ext} mm



ANEXO L – PERDAS DE CARGA DA REDE DE AR COMPRIMIDO

Na Tabela L.1 estão discriminados os valores de pressão obtidos nas medições realizadas nas linhas de distribuição de ar comprimido e a respetiva média.

Tabela L.1 – Valores de pressão das linhas de distribuição de ar comprimido e a respetiva média

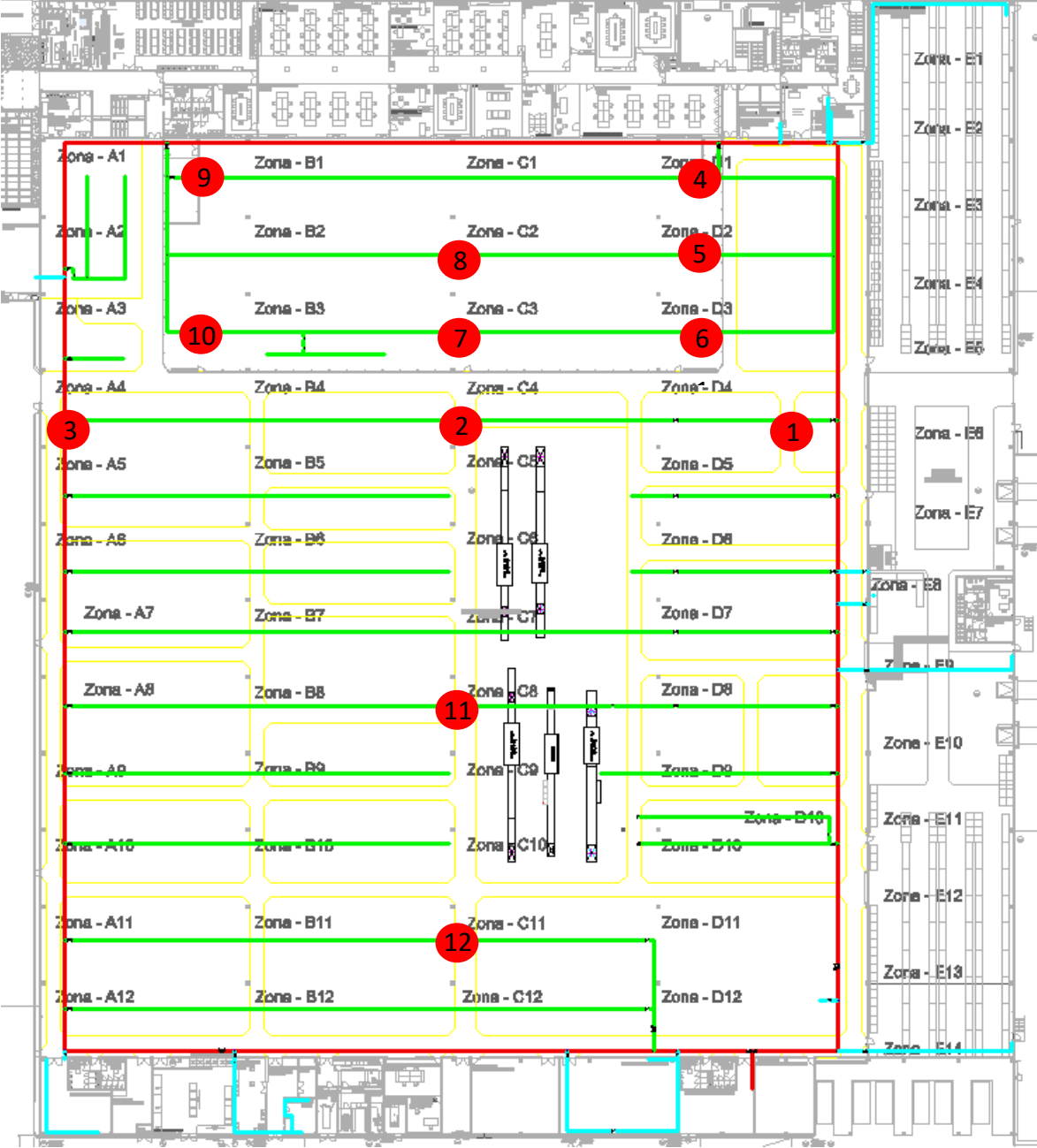
Ponto de medição	Medição 1 [bar]	Medição 2 [bar]	Medição 3 [bar]	Média [bar]
1	6,4	6,4	6,4	6,4
2	6,3	6,4	6,3	6,3
3	6,3	6,4	6,4	6,4
4	6,3	6,3	6,3	6,3
5	6,3	6,3	6,3	6,3
6	6,3	6,2	6,2	6,2
7	6,2	6,2	6,2	6,2
8	6,2	6,3	6,2	6,2
9	6,3	6,2	6,3	6,3
10	6,2	6,3	6,2	6,2
11	6,3	6,3	6,3	6,3
12	6,4	6,4	6,4	6,4

Na Tabela L.2 estão discriminados os valores de pressão obtidos nas medições realizadas nas entradas de ar comprimido das máquinas e a respetiva média. As medições efetuadas no turno da manhã estão designadas por “TM” e as do turno da tarde por “TT”.

Tabela L.2 – Valores de pressão das entradas de ar comprimido das máquinas e a respetiva média

Ponto de medição	Medição 1 [bar]		Medição 2 [bar]		Medição 3 [bar]		Média [bar]
	TM	TT	TM	TT	TM	TT	
1	6,2	6,3	6,2	6,3	6,3	6,2	6,3
2	6,2	6,2	6,2	6,3	6,2	6,2	6,2
3	6,2	6,3	6,2	6,3	6,3	6,2	6,3
4	6,1	6,2	6,0	6,2	6,1	6,2	6,1
5	6,0	6,1	6,0	6,1	6,0	6,2	6,1
6	6,0	6,1	6,0	6,1	6,0	6,1	6,1
7	6,0	6,0	6,0	6,1	6,0	6,0	6,0
8	6,0	6,1	6,0	6,2	6,0	6,0	6,1
9	6,0	6,1	6,0	6,2	6,1	6,1	6,1
10	6,0	6,1	6,0	6,1	6,0	6,0	6,0
11	6,2	6,2	6,1	6,3	6,3	6,3	6,2
12	6,3	6,4	6,2	6,3	6,3	6,3	6,3

ANEXO M – PONTOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO



ANEXO N – QUEDA DE PRESSÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO DA ÁREA ESD

Cada linha de distribuição da área ESD alimenta, em média, 5 linhas. Considerando que cada uma consome o mesmo que a linha de produção onde foi detetado o problema de queda de pressão (2231 L/min), obtém-se o valor de 185,92 L/s.

De acordo com os dados supramencionados, aplicando a equação (2) obtém-se uma queda de pressão 0,3 bar.

$$\Delta P = f \times \frac{Q^{1,85} \times L}{d^5 \times P} \quad (2)$$

Onde:

f – Fator de fricção;

Q – Caudal [L/s];

L – Comprimento da tubagem [m];

d – Diâmetro interno da tubagem [mm];

P – Pressão de regime [bar] [1].