



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Dimensionamento de uma Rede de Ar Comprimido em Ambiente Industrial

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas
Térmicos

Autor

Susana Maria Cardoso da Costa Senra

Orientador

Professor Doutor Avelino Virgílio Fernandes Monteiro Oliveira



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, março de 2024

RESUMO

O crescimento económico global devido à evolução das necessidades energéticas da população e a procura por melhorar continuamente os padrões de vida da população, têm contribuído para o aumento do consumo de energia a nível mundial. No domínio particular da indústria cimenteira, no âmbito da qual foi desenvolvido o presente projeto, a energia é utilizada para a produção de clínquer e cimento, recorrendo à descarbonatação de calcário - processo responsável pela emissão de CO₂. O ar comprimido é uma forma de energia recorrentemente utilizada nos processos produtivos da Cimpor, unidade industrial na qual a autora está integrada a desenvolver um estágio profissional. No processo de produção de ar comprimido (a partir de motores elétricos) é consumida uma elevada parcela de energia elétrica e emitidas quantidades consideráveis de CO₂.

Face aos elevados consumos e custos do ar comprimido numa unidade industrial como a Cimpor, surge o presente projeto de Mestrado em Engenharia Mecânica. O principal objetivo é dimensionar uma Rede de Ar comprimido em Ambiente Industrial, de modo a garantir a produção de ar necessário com o mínimo consumo energético, tendo em conta as necessidades dos equipamentos existentes. A área de estudo será apenas uma secção específica da fábrica – a Ensacagem, mas pretende-se que sirva de exemplo para um projeto de maior dimensão. numa perspetiva de melhoria contínua, em particular no que diz respeito à eficiência energética.

Palavras-chave: Ar comprimido; Eficiência energética; Dimensionamento; Fugas de Ar Comprimido; Perdas de Carga

ABSTRACT

Global economic growth due to the evolving energy needs of the population and the demand for continuously improving living standards has contributed to the increase in energy consumption worldwide. In the specific domain of the cement industry, within which the current project has been developed, energy is used to produce clinker and cement, involving the decarbonization of limestone - a process responsible for CO₂ emissions. Compressed air is a form of energy commonly used in the production processes of Cimpor, an industrial unit where the author is involved in a professional internship. In the compressed air production process (from electric motors), a significant portion of electrical energy is consumed, and considerable amounts of CO₂ are emitted.

Given the high consumption and costs of compressed air in an industrial unit like Cimpor, this master's project in Mechanical Engineering has emerged. The main objective is to design a Compressed Air Network in an Industrial Environment, ensuring the necessary air production with minimal energy consumption, considering the needs of the existing equipment. The study area will only be a specific section of the factory - the Bagging section, but it is intended to serve as an example for a larger-scale project, with a perspective of continuous improvement, particularly regarding energy efficiency.

Keywords: Compressed Air; Energy Efficiency; Dimensioning; Compressed Air Leaks; Pressure Losses

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Licenciatura e o Mestrado em Engenharia Mecânica podem não ter sido uma opção que tivesse desde sempre na memória, mas a vontade de aprender e descobrir mais sobre o que me rodeia sempre esteve presente.

Assim, começo por agradecer ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e a todos os docentes e não docentes do Departamento de Engenharia Mecânica pelo acolhimento ao longo dos últimos cinco anos e por constituírem um pilar de conhecimento e valores.

Ao professor Virgílio Oliveira, por me ter aceitado como orientanda, sem hesitação, revelando-se um apoio excepcional e constante, encorajando-me sempre a continuar e a dar o melhor de mim. Agradeço também por toda a sua presença amiga. Este trabalho é nosso!

Agradeço à empresa Cimpor, Centro de Produção de Souselas, por me ter permitido desenvolver o projeto de mestrado em meio industrial. Tive o privilégio de estar inserida num ambiente de entreajuda e companheirismo, em que as dificuldades se transformam em facilidades. A todas as pessoas do serviço de Manutenção, o meu muito obrigada pelos conhecimentos transmitidos. Um especial agradecimento ao engenheiro Ricardo Borges por, desde o início, me ter apoiado neste projeto e incentivado a não desistir.

Coimbra é uma cidade que ficará eternamente na minha memória. Deu-me amigos e histórias que ficarão guardadas para toda a vida. Agradeço também aos meus amigos que deixei na minha primeira casa porque mesmo estando temporariamente distantes, mantivemos e fortalecemos a nossa amizade. Obrigada por todos os momentos em que foram apaziguadores de angústias e enaltecedores de momentos de felicidade.

Aos meus avós, deixo o meu profundo agradecimento. Pessoas que me ensinaram o valor da humildade, resiliência e paciência na obtenção de resultados.

Ao meu irmão, Afonso, pelos momentos de felicidade que me proporciona todos os dias.

Por último, dirijo o meu mais especial obrigado aos meus pais, Carlos e Salete, que me entusiasma todos os dias a ser uma melhor pessoa, através do seu exemplo. São a razão pela qual luto para alcançar os meus objetivos e sonhos porque sei que os deixarei orgulhos. Sem eles, o culminar deste percurso não seria possível.

A todos, o meu sincero obrigada.

ÍNDICE

Resumo	i
<i>Abstract</i>	ii
Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Índice.....	v
Índice de Equações	viii
Índice de Tabelas	ix
Índice de Figuras	x
Lista de Siglas e Acrónimos.....	xii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do Tema	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura do Documento.....	3
1.4 A Cimpor	3
1.4.1 Produção de Cimento do CPS.....	5
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Ar comprimido: Considerações Gerais	7
2.2 Produção de Ar Comprimido.....	8
2.2.1 Compressores.....	9
2.2.2 Sistema de Controlo do Compressor.....	15
2.3 Tratamento de Ar comprimido	16
2.3.1 Filtros de Ar comprimido.....	17
2.3.2 Separadores de Água/Óleo	18
2.3.3 Secadores de Ar comprimido.....	18
2.4 Armazenamento de Ar comprimido.....	21
2.5 Distribuição de Ar comprimido	23
2.5.1 Tubagens e Conexões	25
2.5.2 Perdas de carga	26
3 Caso de Estudo: Situação Atual.....	29
3.1 Central de Produção de Ar comprimido.....	29
3.1.1 Condições Atmosféricas da Sala de Compressores.....	33

3.1.2	Análise do Perfil de Produção Semanal.....	34
3.1.3	Horas de Funcionamento dos Compressores.....	36
3.1.4	Quantificação das Fugas de ar	37
3.2	Equipamentos Consumidores de Ar	43
3.2.1	Ensacadoras Mecânicas	43
3.2.2	Aplicadores de Sacos.....	44
3.2.3	Filtros de Despoeiramento.....	45
4	Dimensionamento da Rede de Ar comprimido.....	47
4.1	Consumo de Ar Requerido pelos Equipamentos	47
4.2	Tipologia da Rede	52
4.3	Dimensão Nominal das Tubagens.....	56
4.3.1	Seleção do Material das Tubagens.....	56
4.3.2	Diâmetro Interno das Tubagens.....	57
4.4	Compressor.....	64
4.5	Secador	66
4.6	Separador de Água/Óleo	67
4.7	Filtro	67
4.8	Orçamentação.....	68
5	Manutenção Preventiva na Identificação das Fugas.....	70
5.1	Gestão da Manutenção Industrial em SAP.....	70
5.1.1	Plano de Manutenção.....	71
5.1.2	Sensibilização do Pessoal Técnico.....	75
6	Conclusão	76
7	Bibliografia.....	78
	Anexos	84
	Anexo A – Determinar o Fator Consumo de Ar por cm de Curso [l/cm], q	84
	Anexo B –Comparação entre as Propriedades do Alumínio, PPR, Aço Preto, Aço Galvanizado e Aço Inox [50]	85
	Anexo C – Dimensão Nominal (DN) das tubagens	86
	Anexo D – Determinar o Comprimento Equivalente [m].....	87
	Anexo E – Análise da Tubagem B -Passo a Passo.....	88
	Anexo F – Seleção do compressor, relação caudal e pressão	90
	Anexo G – Tabela de Compressor Atlas Copco GA 22-37 VSD.....	91
	Anexo H – Tabela de Compressor Atlas Copco GA 18	92

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Anexo I – Curva Ótima de Funcionamento dos Compressores	93
Anexo J – Tabela de Separadores de Condensados Atlas Copco [46].....	94
Anexo L – Tabela de Filtros Atlas Copco [46]	95
Anexo M – Determinar a velocidade do ar em cada tubagem.....	96

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação (2.1)	27
Equação (2.2)	28
Equação (3.1)	33
Equação (4.1)	48
Equação (4.2)	48
Equação (4.3)	57
Equação (4.4)	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Norma ISO 8573-1:2010.....	16
Tabela 3.1 - Condições ambientais da sala dos compressores.....	33
Tabela 3.2 – Dados que são introduzidos no detetor ultrassónico LD510.....	39
Tabela 3.3 - Resultados da Embalagem e Expedição.....	41
Tabela 3.4 – Balanço económico.....	42
Tabela 4.1 – Consumo de Ar das Ensacadoras	49
Tabela 4.2 - Consumo de ar dos Aplicadores de Sacos	50
Tabela 4.3 - Consumo de ar dos Filtros de despoeiramento	51
Tabela 4.4 – Cálculo do diâmetro interno das tubagens, a partir do L1.....	59
Tabela 4.5 – Cálculo do Comprimento equivalente, L2.....	60
Tabela 4.6 - Cálculo da Dimensão Nominal das tubagens.....	63
Tabela 4.7 – Orçamentação do Projeto	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Centro de Produção de Souselas, Coimbra.....	4
Figura 1.2 - Diagrama do processo de produção de cimento [12]	5
Figura 2.1 - Compressores: a) Radial; b) Axial [14].....	9
Figura 2.2 - Compressores: a) Simples Efeito; b) Duplo Efeito [19].....	10
Figura 2.3 - Compressor <i>Roots</i> [20].....	11
Figura 2.4 - Compressor de Palhetas [21].....	12
Figura 2.5 - Compressor de Anel Líquido [14]	12
Figura 2.6 - Compressor de Espiral [23].....	13
Figura 2.7 - Compressor de Dentes [24].....	13
Figura 2.8 - Compressor Parafuso [25].....	14
Figura 2.9 - Separador de Água/Óleo [28].....	18
Figura 2.10 – Secadores de Refrigeração [30]	19
Figura 2.11 - Secador de Adsorção [31].....	20
Figura 2.12 – Secador de Absorção [32].....	20
Figura 2.13 - Secador de Membrana [32].....	21
Figura 2.14 - Reservatório de Armazenamento de Ar comprimido [32].....	21
Figura 2.15 – Circuito aberto [34]	24
Figura 2.16 - Circuito fechado [34].....	24
Figura 2.17 – Cotovelo [35].....	25
Figura 2.18- Válvula Diafragma e Globo [36]	25
Figura 2.19- Válvula Macho Esférico [36].....	25
Figura 2.20 – Filtro-Regulador-Lubrificador [37].....	26
Figura 3.1 – a) Edifício da Ensacagem e b) Centro de Produção de Souselas, Coimbra [40].....	29
Figura 3.2 – Sala de Produção de Ar comprimido	30
Figura 3.3 – Compressores.....	30
Figura 3.4 – Secador.....	32
Figura 3.5 – Filtros	32
Figura 3.6 - Separador de Condensados Água/Óleo	32
Figura 3.7 - Aparelho Termo-higrómetro Testo 175H1	33

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Figura 3.8 – Aparelhos: a) Caudalímetro; b) Registo de Pressão; c) Registo corrente	35
Figura 3.9 - Perfil de produção com base nas horas de trabalho semanais (168 horas/semana)	35
Figura 3.10 - Horas de Funcionamento dos Compressores, 168 horas semanais...	36
Figura 3.11 - Caudal de fugas de ar da área da Embalagem e Expedição	38
Figura 3.12 - Detetor ultrassónico LD510, câmara integrada.....	38
Figura 3.13 - Principais componentes com fugas de ar	40
Figura 3.14 - Incorretas fixações dos equipamentos: a) Eletroválvula; b) Filtro e Lubrificador.....	40
Figura 3.15 - Correta fixação dos equipamentos	41
Figura 3.16 - Doseador	43
Figura 3.17 - Ensacadora.....	43
Figura 3.18 -- Produção de sacos das 4 Ensacadoras, ano de 2022	44
Figura 3.19 - Aplicador de Sacos	44
Figura 3.20 - Filtro de Despoeiramento (Mangas)	45
Figura 3.21 -Esquema do Filtro de Mangas	46
Figura 4.1 – Tempo de funcionamento, em horas, das 4 Ensacadoras ao longo do ano de 2022	48
Figura 4.2 - Representação total da Rede de Distribuição	52
Figura 4.3 - Representação pormenorizada do Piso 0	53
Figura 4.4 - Representação pormenorizada do Piso 1	54
Figura 4.5 – Representação pormenorizada dos Pisos 2 e 3.....	55
Figura 4.6 - Classificação das tubagens da Rede de Ar comprimido [10].....	58
Figura 4.7 – Compressor com Secador integrado	66
Figura 4.8 – Separador água/óleo [28].....	67
Figura 4.9 – Filtro UD ⁺ [46].....	67
Figura 5.1 - Planos de Baixa Frequência.....	72
Figura 5.2 – Transação IA11 no SAP	73
Figura 5.3 - Exemplo da tarefa, número de executantes, duração no SAP.....	73
Figura 5.4 – Periodicidade de tarefas no SAP	73
Figura 5.5 – Transação IP04 no SAP.....	74
Figura 5.6 – Janela SAP	74

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

CPS	Centro de Produção de Souselas
DRE	Direção Regional da Economia
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FRL	Filtro – Regulador - Lubrificador
I&D	Investigação e Desenvolvimento
ISO	<i>Internacional Standards Organisation</i>
OT	Ordem de Trabalho
PDP	Pressão de Ponto de Orvalho
PVC	Policloreto de Vinil
RAC	Reservatório de Ar comprimido
RPM	Rotações por minuto
SAC	Sistemas de Ar comprimido
SAP	<i>Systems Applications and Products</i>

1 INTRODUÇÃO

O presente projeto foi realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, ramo de Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos, e foi desenvolvido na Cimpor, Indústria de Cimentos S.A, em particular no Centro de Produção de Souselas, Coimbra (CPS) no âmbito de um estágio profissional que decorreu no período de 3 de abril de 2022 a 4 de abril de 2023. Este estágio permitiu acompanhar e contactar com a realidade fabril de uma indústria cimenteira em laboração contínua.

Este capítulo apresenta uma breve contextualização do tema, os objetivos, a metodologia, a organização do projeto, bem como, a empresa Cimpor e o seu processo de produção de cimento.

1.1 Enquadramento do Tema

O crescimento económico global devido à evolução das necessidades energéticas da população e o melhoramento contínuo dos padrões de vida, são os maiores contribuidores para o aumento do consumo de energia a nível mundial [1].

A energia é um vetor imprescindível ao normal funcionamento da sociedade e está na base do funcionamento de setores como a agricultura, a indústria, os transportes e a investigação. Espera-se que entre 2010 e 2040, o consumo global de energia aumente 56%, sendo o setor industrial responsável por consumir 30% da energia total produzida [2] [3].

No período de 2009 a 2019, o consumo energético na indústria desceu 7,3%. O consumo de eletricidade, em 2019, representou 31% do total de energia consumida, enquanto em 2009 representou 26% [3].

A indústria cimenteira representa, a nível mundial, cerca de 7% do consumo de energia da indústria, enquanto a nível nacional esse valor é de 13% [4].

No processo produtivo do cimento, os combustíveis fósseis como o carvão e o *petcoque* têm sido substituídos por combustíveis alternativos, valorizando-se a energia calorífica dos resíduos. Esta realidade permite minimizar a dependência energética de combustíveis fósseis de outros países, a quantidade de resíduos depositados em aterro e o nível de emissões de dióxido de carbono (CO₂).

Deste modo, a indústria cimenteira, a par com outros setores, alinha-se com o objetivo nacional de alcançar a neutralidade carbónica em 2050, ou seja, reduzir as emissões de CO₂ entre 85 e 90% face a 2005. Esta meta assenta num modelo económico circular e uma utilização mais eficiente dos recursos [5] [6].

O ar comprimido é uma das formas de energia mais comuns na indústria. Por ser proveniente do ar atmosférico, não há risco de poluição ambiental, o que o torna bastante indicado nas indústrias farmacêutica e alimentar, em que as restrições são elevadas. Em meios industriais com atmosferas explosivas, o ar comprimido é uma das energias mais utilizadas por não constituir uma fonte de ignição, pois permite a utilização de ferramentas pneumáticas que facilitam o trabalho dos operadores fabris [7].

As fugas de ar podem representar, aproximadamente, 10 a 15% do consumo de ar comprimido numa instalação de ar comprimido, existindo instalações com valores superiores a estes, entre 30 e 40% [8].

Atualmente, o elevado nível de automatização dos processos industriais e a necessidade de elevada fiabilidade, contribuem para elevados consumos de energia [9]. Assim, a procura por medidas que melhorem a eficiência energética pode contribuir significativamente para um futuro energeticamente mais sustentável [1].

Durante o tempo de vida útil de um compressor para a produção de ar comprimido, cerca de 73% do custo total refere-se à energia elétrica consumida [10]. Da energia elétrica consumida por um compressor, apenas 15% é utilizada diretamente para a produção de ar comprimido; a restante energia é perdida na forma de calor, atrito, e ruído [7]. Constata-se, assim, que neste domínio particular há ainda um longo caminho a percorrer na melhoria do rendimento.

De modo a garantir a produção de ar comprimido necessária com o mínimo consumo energético, tendo em conta as necessidades dos equipamentos existentes, uma rede de ar comprimido deve ser corretamente dimensionada [9]. O dimensionamento da rede de ar comprimido é importante para a eficiência, a fiabilidade e o custo da produção de ar comprimido. Sistemas de distribuição inadequados conduzem a faturas de energia elevadas, reduzida produtividade e desempenho das ferramentas pneumáticas [10]. O relatório de projeto aqui apresentado identifica-se com este tema.

1.2 Objetivos

O presente projeto de mestrado tem como principal objetivo o dimensionamento de uma rede de ar comprimido em ambiente industrial do Centro de Produção de Souselas. A secção da unidade industrial que será analisada em concreto é a área da Ensacagem dos sacos de cimento.

Primeiramente, pretende-se estimar as necessidades de ar comprimido dos equipamentos consumidores da rede, perceber quais os seus pontos críticos, nomeadamente os locais em que consumos de ar desnecessários podem ser evitados, tais como, fugas de ar comprimido e perdas de carga. Posteriormente, define-se a tipologia da rede, seleccionam-se os respetivos acessórios e equipamentos e, procede-se ao dimensionamento.

Numa perspetiva complementar, pretende-se que todas as competências e conhecimentos adquiridos durante o estágio profissional se identifiquem com os objetivos académicos do Mestrado em Engenharia Mecânica, traduzindo-se, assim, num contributo para a aproximação do meio industrial às atividades de ensino e de I&D.

1.3 Estrutura do Documento

O presente documento encontra-se organizado em 5 capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo é dedicado ao enquadramento, definição de objetivos, motivação e metodologia do tema, assim como, à apresentação da empresa que permitiu o desenvolvimento do estudo;

Capítulo 2 – Revisão da Literatura

Expõe-se a literatura considerada fundamental para a realização deste trabalho. A pesquisa abrange a produção, o tratamento, o armazenamento e a distribuição do ar comprimido;

Capítulo 3 – Caso de estudo

Este capítulo apresenta a secção da fábrica que será alvo de estudo, com principal destaque para os equipamentos produtores (compressores) e consumidores de ar comprimido (Enscadoras, Aplicadores de Sacos e Filtros de Despoeiramento);

Capítulo 4 – Dimensionamento da Rede de Ar comprimido

Desenvolve-se a metodologia utilizada para dimensionar a rede de ar comprimido e apresentam-se os resultados obtidos;

Capítulo 5 – Manutenção Preventiva na identificação das fugas de ar

Apresenta-se uma abordagem da Manutenção Preventiva como medida de identificação das fugas de ar comprimido, com o complemento do *software* SAP (*Systems Applications and Products*).

Capítulo 6 – Conclusão e Desenvolvimentos futuros

Referem-se as principais conclusões deste trabalho, bem como os desenvolvimentos futuros a efetuar para o melhorar.

1.4 A Cimpor

A empresa Cimpor foi fundada em 1976 e possui sede em Lisboa. Está presente em Portugal, Cabo Verde, Turquia e Costa de Marfim. A sua principal atividade é a produção de cimento, betão, agregados, argamassas e a sua comercialização [11].

A nível nacional, é detentora de 3 Centros de Produção - Alhandra, Loulé e Souselas, destinados à produção de clínquer e cimento [11].

O Centro de Produção de Souselas (Figura 1.1), onde decorreu o estágio, integra 135 trabalhadores, tem uma produção anual de 2,4 milhões de toneladas de clínquer e 3,5 milhões de toneladas de cimento [11].

A escolha do local para a instalação desta nova fábrica obedeceu a dois pressupostos: aproximá-la tanto quanto possível do mercado do norte do país, mas situando-a à beira de Jazidas de matérias calcárias e argilosas de composição adequada ao fabrico de cimento. O interesse da indústria cimenteira pela área de Souselas–Brasfemes, resultou da qualidade da pedra que a fábrica da cal começara a extrair, em 1969, da serra do Alhastro. Esta zona transformou-se na pedreira em exploração da Cimpor, da qual se têm extraído calcários e calcários margosos, com vista à produção de cimento [11].



Figura 1.1 - Centro de Produção de Souselas, Coimbra

1.4.1 Produção de Cimento do CPS

A Figura 1.2 ilustra o diagrama de produção de cimento [12].

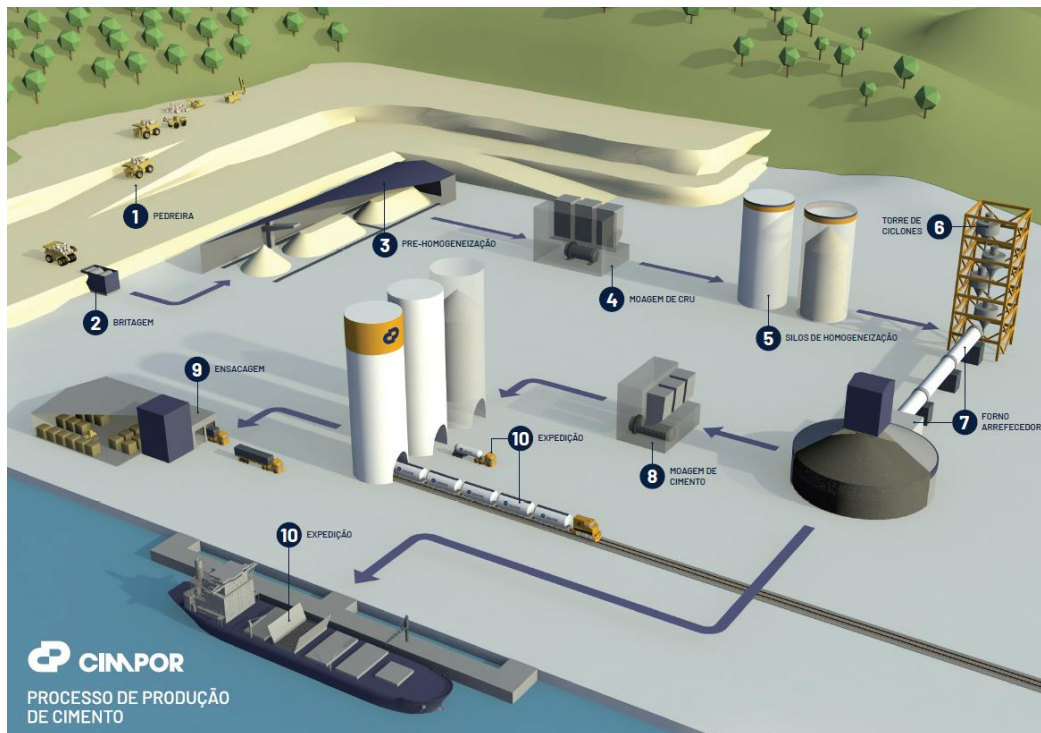


Figura 1.2 - Diagrama do processo de produção de cimento [12]

O processo de produção de cimento inicia-se na pedreira **(1)**, de onde são extraídas as matérias-primas necessárias, nomeadamente o calcário. Este processo é realizado através da perfuração e desmonte da pedreira com a utilização de explosivos [12].

Após a fase de extração, o material apresenta-se sob a forma de blocos, com dimensões próximas de 1 metro cúbico (m^3), pelo que, de seguida, devem ser sujeitos a um processo de redução de tamanho de modo a obter dimensões inferiores a 40 milímetros (mm). Este processo é denominado de britagem **(2)** e, dependendo da resistência dos materiais à compressão, da sua abrasividade, do caudal a tratar e do tipo de fragmentação aquando do desmonte, recorre a britadores de impacto, de maxilas, de martelos, cilindros ou giratórios [12].

A etapa que se segue consiste na pré-homogeneização **(3)** do material britado. Na pré-homogeneização estes materiais são depositados em camadas longitudinais, originando uma pilha composta por 10 mil a 30 mil toneladas [12].

O material obtido na pré-homogeneização é denominado de mistura e segue para a secção de moagem. Nesta etapa ocorre um processo de moagem do material num moinho vertical **(4)** [12].

De modo a promover a maior homogeneização possível do cru obtido no moinho, este segue para os silos com fluidificadores **(5)** que uniformizam o material e o tornam menos denso. O material que se obtém após este tratamento designa-se de farinha [12].

Dos silos de homogeneização, a farinha é introduzida no forno, passando antes pela fase de descarbonatação **(6)**. Nesta etapa, os pré-calcinadores aproveitam o calor proveniente do forno e promovem o aquecimento inicial do material [12].

Em seguida, inicia-se o processo de cozedura. A farinha passa pelo forno **(7)** que opera a uma temperatura até 1450°C (graus Celsius), resultando em clínquer, um nódulo bastante pequeno com 3 a 4 centímetros (cm) de diâmetro, de cor cinza-escuro e é o constituinte nobre do cimento. Este, por sua vez, é arrefecido até à saída do arrefecedor de grelhas (100-200°C) e encaminhado para silos ou *stocks* polares, onde fica armazenado [12].

Após ser extraído dos silos ou do *stock* polar, o clínquer é transportado até às tremonhas das moagens de Cimento **(8)**, sendo aí doseado juntamente com aditivos de *filler*, gesso, calcário, cinzas volantes, escórias, pozolanas que permitem conferir as propriedades requeridas pelo consumidor final [12].

Por fim, o cimento obtido é ensacado em sacos de 25 e 50 quilogramas (kg) **(9)** que, posteriormente, são distribuídos por paletes ou embalados em forma de pacotão. O cimento pode ser expedido por via ferroviária, marítima ou rodoviária **(10)** [12].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo descreve a revisão de literatura efetuada, considerada fundamental para este trabalho. A pesquisa abrange pormenorizadamente a Produção, o Tratamento, o Armazenamento, a Distribuição e a Eficiência dos Sistemas de Ar comprimido.

2.1 Ar comprimido: Considerações Gerais

O ar atmosférico consiste numa mistura, em termos volumétricos, de 78% de azoto, 21% de oxigénio e 1% de outros gases, nomeadamente o árgon, o néon, o hélio, o metano, o dióxido de carbono, o monóxido de azoto e o hidrogénio. Caracteriza-se pelas suas propriedades de compressibilidade (diminuição do volume do quando sujeito à ação de uma força externa), elasticidade (retorno ao volume original do ar quando a força que causa a compressão é interrompida), expansibilidade (possibilidade de ocupar totalmente o volume de qualquer recipiente, adquirindo o seu formato) e difusibilidade (capacidade de se misturar homoganeamente com qualquer meio gasoso que não esteja saturado) [9] [13].

O ar comprimido é uma forma de energia amplamente utilizada na indústria e que resulta de uma transformação termodinâmica do ar atmosférico, através de uma compressão mecânica realizada por um compressor [9].

A primeira aplicação prática do ar comprimido foi a construção de uma catapulta que o utilizava como impulsor há cerca de 2000 anos por Ctesibios, fundador da Escola de Mecânicos em Alexandria [14].

A nível industrial, a utilização de ar comprimido surge com a necessidade de fundir metais. Esta operação necessitava de um conjunto de foles que introduziam no sistema uma grande quantidade de ar, elevando consideravelmente a temperatura de funcionamento da forja [14].

A partir da 2ª Guerra Mundial, esta forma de energia teve um incremento mais significativo, transpondo a indústria para um universo mais automatizado através de atuadores lineares (cilindros pneumáticos lineares) e rotativos (motores pneumáticos e cilindros de rotação), de electroválvulas, de sensores e de válvulas de regulação [14].

Segundo [14], do ponto de vista das aplicações, o ar comprimido pode ser dividido, além de energia, em processo e controle. O uso energético desse recurso é verificado em operações em que essa energia é usada para produzir movimento e/ou exercer uma força [14].

2.2 Produção de Ar Comprimido

Uma central de produção de ar comprimido deve garantir todas as condições ambientais favoráveis à compressão de ar, nomeadamente, a temperatura ambiente, de ponto de orvalho, humidade relativa, ventilação e contaminação de ar de admissão da central [15].

As grelhas de admissão de ar do exterior constituídas por aberturas bem dimensionadas e livres de eventuais obstruções causadas por objetos são recomendadas para que se efetue uma boa ventilação da central [15].

A temperatura do ar aspirado pelo compressor influencia diretamente o seu consumo energético. Quanto mais frio, maior a densidade do ar, ocupando, assim, menor volume do que aquele que é ocupado por uma massa de ar mais quente. Assim, quanto menor for a temperatura do ar admitido, maior será a quantidade de ar admitida pelo compressor para a mesma velocidade e potência. Devido a este fenómeno físico, a temperatura do interior da sala deve ser monitorizada, uma vez que a temperatura no interior da sala é tendencialmente superior à temperatura do exterior [15].

O aumento de 3 °C na temperatura do ar de admissão aumenta a potência consumida em cerca de 1% e o ar húmido é responsável pelo aparecimento de corrosões e pelo mau funcionamento dos equipamentos. Um aumento das perdas de carga na admissão do ar, por exemplo de 10 milibar (mbar), aumenta o consumo de ar dos aparelhos pneumáticos em 1%. Assim sendo, o ar aspirado pelo compressor deve ser frio e limpo, evitando-se locais soalheiros, húmidos ou poeirentos [8].

Na impossibilidade de alojar uma central de produção num espaço interior, a instalação deverá ser feita no exterior. Nestes casos, é necessário considerar o risco de congelamento dos componentes dos equipamentos, as condições atmosféricas envolventes (procedendo-se à proteção contra chuva e neve nas aberturas ou canais de entrada do ar de admissão); e a presença de substâncias inflamáveis ou agressivas [13].

A produção de ar comprimido pode ser centralizada (uma única central de compressores) ou descentralizada (em vários pontos de produção de ar comprimido distribuídos) [15].

Um sistema centralizado combina necessidades intermitentes e variáveis de ar comprimido de diferentes aplicações para uma carga relativamente constante com uma capacidade total reduzida. Para estes sistemas, deve ser previsto um compressor reserva para atender picos de caudal momentâneos ou, ainda, para assumir a carga quando algum compressor principal estiver em manutenção [16].

2.2.1 Compressores

A produção de ar comprimido é realizada por compressores. A compressão tem como objetivo debitar o ar a uma pressão superior à pressão atmosférica original [17].

O compressor é o principal equipamento responsável pela produção de ar comprimido que, conseqüentemente, irá abastecer um conjunto de equipamentos para realizarem o seu trabalho [18].

Existem dois princípios básicos para a compressão do ar: compressão de deslocamento positivo e compressão dinâmica. O primeiro consiste na admissão do ar numa ou mais câmaras de compressão, nas quais é reduzido o seu volume, originando conseqüentemente um aumento da pressão e, quando esta pressão iguala a pressão de saída, a válvula de descarga abre e o ar abandona a câmara de compressão. O segundo consiste na captação de ar atmosférico (a uma determinada velocidade) e que devido ao aumento progressivo da secção desde a entrada até à saída da pá impulsora, a velocidade diminui e, conseqüentemente a pressão aumenta, ou seja, a energia cinética é convertida em energia de pressão [14].

Um sistema de ar comprimido eficiente energeticamente depende da escolha do compressor mais adequado para cada atividade, ressaltando-se que a eficiência energética não é apenas determinada pela conceção do compressor, mas também pela instalação, utilização e manutenção adequadas do mesmo [8] [14].

2.2.1.1 Compressores Dinâmicos

Os compressores Dinâmicos podem ser do tipo Centrífugos ou Axiais, operam a velocidades de funcionamento superiores às dos compressores Volumétricos. Nas indústrias aeronáutica e espacial atingem, frequentemente, velocidades de rotação na ordem das 10000 a 50000 rotações por minuto (rpm.) Estas unidades compressoras dividem-se em Radiais e Axiais (Figura 2.1) [14].



Figura 2.1 - Compressores: a) Radial; b) Axial [14]

Os compressores Dinâmicos de fluxo radial comprimem o ar de forma perpendicular ao veio do motor e a descarga efetua-se segundo a tangente ao raio das pás impulsoras, ou seja, radialmente.

Os débitos de ar variam entre os 600 e os 51000 metros cúbicos por hora (m^3/h) para pressões de 3 a 24 bar. As indústrias vidreiras, celulose, têxtil, petrolífera e de papel são exemplos de aplicações deste tipo de compressores [14].

Os compressores Dinâmicos de fluxo axial comprimem o fluxo de ar na direção axial, paralelamente ao veio. Apresentam dimensões inferiores aos compressores Radiais. Operam a velocidades superiores a 25% relativamente aos Radiais. Comumente utilizados no fornecimento de caudal acima de 234 000 m^3/h e a pressões até 14 bar [14].

2.2.1.2 Compressores Volumétricos

Os compressores Volumétricos caracterizam-se pela diminuição do volume do ar contido numa câmara de compressão, com o conseqüente aumento de pressão. Estas unidades compressoras dividem-se em compressores Alternativos e Rotativos [14].

Os compressores Alternativos admitem ar numa ou mais câmaras de compressão, onde o seu volume é reduzido, originando o aumento de pressão pretendido. Industrialmente, estas unidades compressoras têm vindo a ser substituídas por compressores rotativos de parafuso, quando se pretende produzir ar comprimido a uma pressão até cerca de 14 bar. No entanto, para pressões superiores a 14 bar, continua a ser recorrentemente utilizado. Os compressores Alternativos apresentam cilindros com várias configurações, sendo subdivididos em cilindros Alternativos de Simples e Duplo Efeito [14].

A Figura 2.2 representa os compressores Alternativos de Simples e Duplo Efeito [19].



Figura 2.2 - Compressores: a) Simples Efeito; b) Duplo Efeito [19]

Os compressores de cilindro de Simples Efeito caracterizam-se por uma compressão apenas numa das faces do pistão.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Nos compressores de cilindro de Duplo Efeito, a compressão é efetuada em ambas as faces do pistão, isto é, quando o êmbolo se desloca num sentido, admite ar num dos lados e comprime ar do lado oposto e, quando se desloca no sentido contrário as fases de admissão e compressão invertem-se [10].

Os compressores Rotativos comprimem o ar no interior do compartimento que o contém, através de um movimento de rotação, produzindo assim um fluxo contínuo de ar. Na indústria, os compressores Rotativos de Parafuso são os mais utilizados, contudo existem outros modelos também frequentes, tais como, *Roots*, Palhetas, Anel Líquido, Espiral e de Dentes [10].

- Compressor *Roots*

O compressor *Roots* (Figura 2.3) não possui um sistema de produção de ar através da compressão de ar no seu interior, mas sim, pelo “arrastar” do mesmo desde a entrada até à saída da câmara. Possui um corpo de secção elíptica (oval) que contém dois rotores simétricos em forma de oito, que rodam em sentidos opostos.

Este tipo de equipamento não possui válvulas pelo que a contrapressão existente à saída da câmara é responsável pela baixa eficiência que este apresenta, cerca de 80%, embora o rendimento mecânico seja de, aproximadamente, 95% [14].

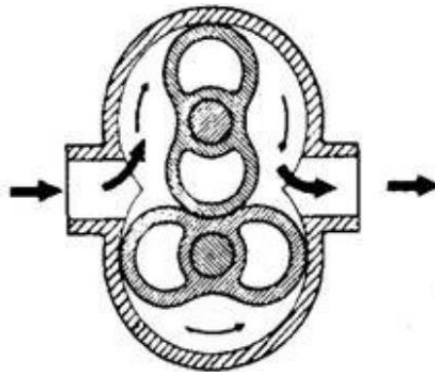


Figura 2.3 - Compressor *Roots* [20]

- Compressor de Palhetas

O compressor de Palhetas (Figura 2.4) possui apenas um rotor, contrariamente ao compressor *Roots*. Os eixos do rotor e o do estator são paralelos, possuindo, no entanto, o primeiro, uma pequena excentricidade que, por sua vez, é responsável pela existência de volumes variáveis durante o movimento de rotação.

A maioria dos compressores de Palhetas são lubrificados a óleo. Este compressor possui um rotor que quando gira pressiona as palhetas contra as paredes do estator por ação da força centrífuga [14].

O ar é aspirado quando a distância entre o rotor e o estator aumenta. Devido ao seu princípio de funcionamento, as pressões estão limitadas a 10 bar. Este tipo de compressor é muito utilizado em laboratórios [14].

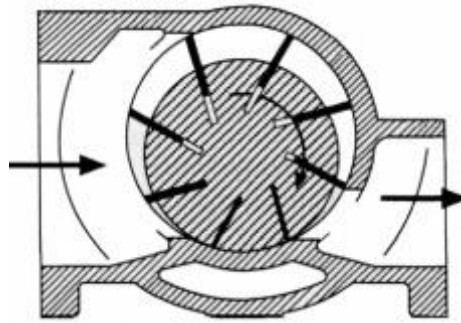


Figura 2.4 - Compressor de Palhetas [21]

- Compressor de Anel Líquido

O compressor de Anel Líquido (Figura 2.5) possui um rotor com um conjunto de alhetas fixas num cilindro e é isento de óleo [22]. Durante o funcionamento, o líquido contido no cilindro é suportado em volta desta pela ação das lâminas do rotor. As aplicações mais comuns deste tipo de compressor encontram-se na indústria de papel; funcionam também como bomba de vácuo na indústria metalúrgica [14].

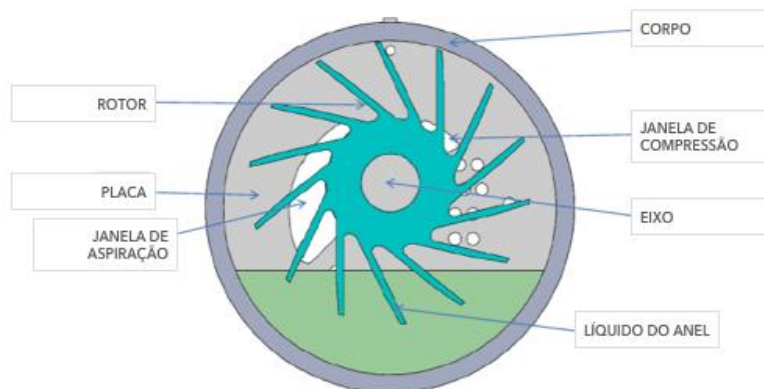


Figura 2.5 - Compressor de Anel Líquido [14]

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

- Compressor de Espiral

O compressor de Espiral possui um princípio de funcionamento que se baseia na interação entre uma espiral fixa e outra orbitante; deste modo, à medida que a espiral móvel orbita, o ar vai sendo progressivamente comprimido numa câmara cada vez menor.

A espiral móvel executa um movimento elíptico, capaz de reduzir o volume de ar entre as espiras sempre que tal acontece. Este tipo de compressor opera com caudais de 2,7 a 25 litros por segundo (l/s) e compressões de funcionamento até 10 bar [14].

Os compressores de Espiral são silenciosos devido às lentas velocidades de funcionamento e à ausência de contacto. Esta simplicidade de funcionamento torna os compressores de Espiral adequados na medicina dentária, por exemplo [14].

Na Figura 2.6, representa-se esquematicamente o princípio e as fases de funcionamento deste modelo de compressor. Ao longo das cinco posições diferentes verifica-se que ar de admissão entra pelo lado exterior do elemento orbitante. Assim que o ar se encontra no interior da câmara, a espiral móvel veda a abertura de entrada e o espaço entre ambas vai diminuindo, produzindo assim um caudal contínuo [14].



Figura 2.6 - Compressor de Espiral [23]

- Compressor de Dentes

O compressor de Dentes (Figura 2.7), tal como o de Parafuso possui um rotor macho e um rotor fêmea que rodam em sentidos opostos, originando uma câmara de compressão na qual o volume de ar é reduzido gradualmente. O processo de compressão consiste na admissão, compressão e saída do ar. Distinguem-se dos helicoidais pelo facto dos elementos básicos de compressão possuírem dentes [14].

Estes compressores são isentos de óleo. Operam a pressões compreendidas entre 4 e 10 bar. São bastante utilizados na indústria farmacêutica, alimentar e eletrónica [14].



Figura 2.7 - Compressor de Dentes [24]

- Compressor de Parafuso

O compressor de Parafuso (Figura 2.8) tem um princípio de funcionamento baseado em dois rotores que giram dentro de um bloco fixo, entre uma abertura de admissão (entrada) e uma de descarga (saída).



Figura 2.8 - Compressor Parafuso [25]

Este possui a forma de parafuso, sendo um de lóbulos, denominado macho que roda a cerca de 3600 rpm, e a outra fêmea que roda a 2400 rpm. À medida que os parafusos giram, o ar vai sendo aspirado para espaços vazios cada vez menores, onde é comprimido por redução do seu volume [14].

Os compressores de Parafuso Rotativo funcionam a velocidades elevadas, combinando, em simultâneo, um caudal elevado e pequenas dimensões exteriores.

As aplicações mais comuns destes equipamentos são aplicações contínuas, como o meio industrial. Existem duas versões principais: compressores de Parafuso Rotativo isentos de óleo e lubrificados a óleo, com a opção de controlo de carga/vazio e velocidade variável. A principal vantagem dos compressores do tipo Parafuso Rotativo é a eficiência energética [14].

O compressor de Parafuso isento de óleo modernos têm perfis de parafuso assimétricos, resultando numa eficiência energética significativamente melhorada. Como os rotores não entram em contacto um com o outro nem com a carcaça do compressor, não é necessária nenhuma lubrificação dentro da câmara de compressão. Consequentemente, o ar comprimido é isento de óleo [10].

Os compressores de Parafuso lubrificados a óleo injetam óleo na câmara de compressão que arrefece e lubrifica o compressor, além de que minimiza as fugas na câmara de compressão. Este equipamento pode funcionar durante 24 horas seguidas sem efeitos adversos. Operam com pressões entre 4 e 40 bar [14].

2.2.2 Sistema de Controlo do Compressor

O sistema de controlo do compressor deve obedecer aos requisitos máximos de consumo de uma instalação, ou seja, aos picos máximos que, normalmente, acontecem muito esporadicamente. Este facto tem como consequência o sobredimensionamento face às necessidades médias da instalação [26].

Por outro lado, uma instalação com padrões de consumo distintos e uma grande aleatoriedade no consumo de ar, acrescida a diferentes níveis de consumos diários em função dos turnos de laboração, ou ao acréscimo do fim de semana com necessidades de ar mínimas, deve ter uma capacidade de produção que se ajuste e responda aos diferentes patamares de consumo [26].

Os sistemas de controlo de um compressor classificam-se em: Arranque-Paragem, Carga-Vazio e Velocidade Variável. Estes dois últimos são os mais comumente utilizados e têm como principais objetivos: equilibrar o caudal produzido com o caudal requerido pela rede e consumir o mínimo de energia [26].

O sistema de controlo arranque-paragem consiste num compressor que admite o ar e comprime-o até atingir o valor da pressão máxima previamente definido num pressostato. Uma vez atingido esse valor, o compressor desliga-se automaticamente (o motor elétrico desliga-se). De forma análoga, o compressor arranca assim que um valor de pressão mínimo seja atingido [17].

Por razões relacionadas com a segurança, bem como por preocupações energéticas, quando a potência dos compressores excede 11 kilowatt (kW), opta-se por outro tipo de controlo alternativo: o controlo carga-vazio [18].

No sistema de controlo carga-vazio, o motor elétrico fica ininterruptamente ligado, mesmo que o compressor não se encontre a comprimir o ar. A unidade compressora opera entre os limites de pressão máxima e mínima previamente definidos, nomeadamente, assim que a pressão no reservatório atinge o valor máximo, o compressor deixa de comprimir ar por ação de uma válvula piloto que obriga à abertura permanente das válvulas de admissão de ar, até que a pressão mínima seja atingida. Nesta situação, o compressor encontra-se em regime vazio.

Este período é penoso energeticamente, porque para um caudal nulo corresponde um consumo de 30% da potência instalada [26].

Posteriormente, quando o valor da pressão mínima é detetado, o compressor retoma a produção de ar iniciando o período de carga [27]. Para este tipo de controlo, o regime de plena carga é a opção mais eficiente [26].

O sistema de velocidade variável adequa-se a perfis de consumo de ar comprimido variáveis, ou seja, a velocidade do motor do compressor ajusta-se automaticamente de acordo com o caudal de ar comprimido necessário para suprimir as necessidades dos consumidores. Isto significa que este tipo de compressor consome menos energia durante o período de carga parcial, quando comparado com o compressor carga-vazio [26].

Em síntese, perfis de consumo estáveis justificam o controlo por carga-vazio, enquanto perfis com elevadas flutuações aceitam um controlo por velocidade variável. Neste sentido, o primeiro indicador a retirar de uma central de compressores, poderá ser o fator de carga do compressor. Este corresponde ao quociente entre as horas em carga e as horais totais em operação [26].

2.3 Tratamento de Ar comprimido

O tratamento do ar comprimido tem como objetivo garantir que a qualidade do ar está conforme as especificações pretendidas, evitando a deterioração precoce dos componentes da rede de ar comprimido [18].

Relativamente ao nível de pureza do ar comprimido, é crucial considerar as aplicações críticas e não críticas. As aplicações críticas englobam ambientes como hospitais e laboratórios, onde a qualidade do ar para respiração humana é primordial. Para esses casos, é imprescindível o uso de compressores isentos de óleo, a fim de prevenir a contaminação da rede de distribuição em situações de acidente [14].

A Norma Internacional ISO 8773-1:201: *Compressed air, Part 1: Contaminants and purity classes* (ISO- *Internacional Standards Organisation*) estabelece as classes de qualidade do ar comprimido com base em partículas, teor de água e teor de óleo. Categoriza o ar comprimido em sete classes de pureza (entre 0 e 6). Quanto menor a classe de pureza, melhor será a qualidade do ar [14].

A Tabela 2.1 foi adaptada da Norma ISO 8573-1:2010.

Tabela 2.1 – Norma ISO 8573-1:2010

Classe de Pureza	Partículas Sólidas			Água		Óleo
	Número máximo de partículas por m ³			Ponto máximo de orvalho		Concentração máxima
	0,1-0,5 mícron	0,5-1 mícron	1,0-1,5 mícron	°C	°F	mg/m ³
0	Conforme especificado pelo utilizador ou fornecedor do equipamento e mais rigorosa do que a classe 1.					
1	≤ 20000	≤ 400	≤ 10	≤ -70	≤ -94	≤ 0,01
2	≤ 40000	≤ 6000	≤ 100	≤ -40	≤ -40	≤ 0,1
3	-	≤ 90000	≤ 1000	≤ -20	≤ -4	≤ 1
4	-	-	≤ 10000	≤ +3	≤ 37,4	≤ 5
5	-	-	≤ 100000	≤ +7	≤ 44,6	-
6	≤ 5 mg /m ³			≤ +10	≤ 50	-

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

As classes indicam o nível máximo de contaminação de partículas sólidas e óleo por metro cúbico de ar e a máxima quantidade admissível de água no ar comprimido sob pressão [14].

A qualidade do ar comprimido é importante para o correto funcionamento dos equipamentos pneumáticos, nomeadamente válvulas e atuadores.

As impurezas e humidade em excesso contribuem para o encurtamento do tempo de vida útil dos equipamentos através da perda de lubrificação, bloqueio das válvulas, desgaste dos vedantes, assim como para o aumento de fugas. A filtragem do ar melhora o desempenho e a fiabilidade, na medida em que prolonga a vida dos equipamentos e diminui as paragens para manutenção [14].

A qualidade do ar deve ser considerada como uma das principais etapas para o dimensionamento de qualquer sistema pneumático [14].

2.3.1 Filtros de Ar comprimido

Os filtros de ar comprimido removem os contaminantes presentes ou formados na fase de compressão que podem interferir na qualidade do produto final. Consoante os valores admissíveis, seleciona-se o tipo de filtragem a utilizar nos Sistemas de Ar Comprimido (SAC). Atualmente, as tecnologias de filtragem disponíveis apresentam uma elevada eficiência na eliminação das partículas. A seleção de um filtro é condicionada pela aplicação e exigência do processo. Em instalações com compressores lubrificados, o ar comprimido deve primeiramente atravessar um pré-filtro para filtragem do óleo e, posteriormente, atravessar um filtro para remoção das partículas e vapores resultantes [8].

2.3.1.1 Pré-Filtragem de Partículas

A pré-filtragem é essencial na remoção do óleo proveniente do processo de compressão do ar, assim como na proteção do secador relativamente a contaminantes em excesso. Além disso, a pré-filtragem melhora o processo de secagem do ar, minimizando o consumo energético. Assim, o ar comprimido que entra no secador encontra-se isento de óleo e de partículas sólidas. O pré-filtro é colocado anteriormente ao secador e tem como função remover 30% dos contaminantes sólidos e/ou líquidos. Este pré-filtro protege o secador, retendo partículas de até 1 micron proporcionando um residual de óleo $0,1 \text{ mg/m}^3$ [8].

Nos filtros de remoção de óleo, o ar comprimido entra pelo interior atravessando o filtro, à medida que os seus aerossóis de água e óleo coalescem formando pequenas gotas no papel do filtro que, posteriormente, são removidas pela parte exterior do filtro. A vida útil destes filtros está limitada a perdas de carga entre os 0,45 e 0,55 bar, sendo que a faixa normal de utilização é 0,2 bar. Estes elementos devem ser substituídos quando atingirem a perda de carga de 1 bar no máximo, pois a perda de carga do filtro aumenta exponencialmente no final do seu tempo de vida útil [14].

2.3.1.2 Pós-Filtragem de Partículas

A filtragem de partículas/poeiras tem como função remover a humidade residual, aproximadamente 30%, não removida pelo separador de condensados do secador tal como a retenção de partículas sólidas não retidas no filtro de óleo [14].

Neste tipo de filtros, o ar comprimido entra pelo exterior atravessando a película filtrante, sendo que as partículas de maiores dimensões ficam retidas enquanto as de menores dimensões são retidas à medida que o ar progride no filtro. O pós-filtro remove partículas de até 0,01 microm, proporcionando um residual de óleo 0,01 mg/m³ [14].

2.3.2 Separadores de Água/Óleo

Os separadores de Água/Óleo são colocados antes do secador. Este equipamento não se encontra totalmente integrado no circuito de ar comprimido, mas sim, a operar em paralelo de forma a tratar os condensados, uma mistura de água e óleo que pode danificar a rede de distribuição e os seus equipamentos, comprometendo o produto final. Os líquidos dos filtros e secadores não podem ser depositados no meio ambiente sem um tratamento prévio [14].



Figura 2.9 - Separador de Água/Óleo [28]

2.3.3 Secadores de Ar comprimido

O ar atmosférico contém vapor de água. Durante o processo de compressão, para além do aumento da temperatura, a capacidade de retenção de água aumenta. Depois de comprimido, o ar tende a arrefecer nas tubagens e equipamentos e devido ao seu estado de saturação, o ar condensa facilmente. A remoção de vapor de água do ar comprimido realiza-se recorrendo a secadores, com diferentes características definidas consoante os parâmetros de referência como a pressão, temperatura de entrada, temperatura ambiente [29].

O Ponto de Orvalho (PDP) à pressão atmosférica consiste na temperatura na qual o vapor de água contido no Ar comprimido condensa após a sua despressurização. O Ponto de Orvalho à pressão de operação consiste na temperatura na qual o vapor de água contido no ar comprimido, a uma certa pressão, condensa [13].

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Depois de sair do compressor e antes de entrar no secador de ar, o ar comprimido passa por um permutador de calor com drenagem automática, de forma a precipitar a água que, de outro modo, condensaria nas tubagens. Na maioria dos casos, o permutador de calor é incorporado nos compressores [14].

Os secadores de ar têm como principal objetivo remover a humidade da rede de ar comprimido, tornando-o tecnicamente seco. Os secadores podem ser de Refrigeração, Adsorção, Absorção e Membrana, quanto à forma como removem a humidade do ar e pelo seu grau de secagem [14].

2.3.3.1 Secador de Refrigeração

O secador de Refrigeração pode ser a Água ou a Ar (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Secadores de Refrigeração [30]

O secador de **Refrigeração a Água** é posicionado imediatamente após o compressor e antes do reservatório, de modo a extrair 75% a 90% do vapor de água contido no ar. Isto previne dilatações e evita choques térmicos ao longo da rede de distribuição. Assim, o ar proveniente do compressor atravessa um conjunto de tubos, em sentido oposto ao fluxo de água de refrigeração, alterando constantemente de direção. À saída do compressor, existe um separador de condensados que tem como objetivo conduzir a água condensada para uma câmara de retenção, e, posteriormente, expulsá-la para a atmosfera, por purga (manual ou automático) [14].

A temperatura da água fornecida para refrigerar o ar deve ser constantemente monitorizada, para não comprometer o desempenho do arrefecedor. Este secador foi concebido de forma a combinar um nível elevado de refrigeração com um consumo de água muito reduzido [14].

O secador de **Refrigeração a Ar** é posicionado imediatamente após o compressor e antes do reservatório, tal como o anterior. O arrefecimento do Ar comprimido é efetuado pela passagem do ar num radiador (constituído por um bloco de alumínio) que, por sua vez, realiza a permuta de calor com o ar. Este equipamento inclui, normalmente, um separador de água com purga automática de modo a evitar a acumulação de água no secador [14].

2.3.3.2 Secador de Adsorção

O secador de Adsorção (Figura 2.11) tem como principal objetivo remover vapor do Ar comprimido sem condensá-lo, através da passagem do ar por material adsorvente. Deste modo, as moléculas de vapor de água ficam retidas na superfície de um adsorvente higroscópico e granulado, nomeadamente sílica-gel, alumina ativada e rede molecular, proporcionando um eficiente tratamento do ar comprimido [14].

O processo de Adsorção é regenerativo, ou seja, quando saturado, o adsorvente inicia um ciclo de regeneração, libertando a água por passagem de um fluxo de ar seco no sentido contrário ao de secagem [14].



Figura 2.11 - Secador de Adsorção [31]

2.3.3.3 Secador de Absorção

O secador de Absorção (Figura 2.12) tem como principal objetivo remover a humidade do ar comprimido por absorção. [14]

Deste modo, o seu princípio de funcionamento baseia-se na remoção de vapor de água do ar comprimido através da sua passagem por material absorvente, líquido ou gasoso que, por sua vez, é eliminado para a atmosfera através de um dreno na parte inferior do secador [14]



Figura 2.12 – Secador de Absorção [32]

2.3.3.4 Secador de Membrana

O secador de Membrana (Figura 2.13) é constituído por dois sistemas: o primeiro consiste num conjunto de dois pré-filtros que removem as partículas sólidas, água e óleo; o segundo é constituído por um aglomerado de tubos de fibras de membranas [14].

Deste modo, à medida que o ar comprimido percorre o secador, previamente filtrado, o vapor de água nele contido fica retido nas fibras enquanto o ar seco prossegue. O vapor de água e as partículas líquidas das paredes são purgados para a atmosfera [14].

O secador de Membrana é simples de operar, silencioso em operação, não possui partes móveis [33].



Figura 2.13 - Secador de Membrana [33]

2.4 Armazenamento de Ar comprimido

Os reservatórios de ar comprimido (Figura 2.14) são elementos essenciais numa rede de ar comprimido, tendo como principal objetivo armazenar de forma temporária o ar comprimido para compensar as variações de pressão da rede de distribuição num curto período [14].



Figura 2.14 - Reservatório de Armazenamento de Ar comprimido [34]

Numa instalação podem existir diferentes necessidades de consumo de ar, sendo que o total do fluxo de ar requerido deve ser corrigido com acréscimo, a fim de evitar quedas abruptas de pressão nas linhas de distribuição.

Para as situações de consumo elevado durante um breve período, podem-se prover tais fontes de consumo com um sistema de ar separado, ou instalar um reservatório de ar auxiliar [16].

Um reservatório deve assegurar uma reserva de emergência, respeitar sempre a pressão máxima admissível. Pode apresentar configurações verticais - mais comuns em elevadas necessidades de ar ou horizontais - mais comuns em reduzidas necessidades de ar [14].

O reservatório possui as principais funções: armazenar e arrefecer o ar comprimido, promovendo a eliminação de condensados (caso não possua secagem de ar na produção de ar); compensar as flutuações de pressão em todo o sistema de distribuição; estabilizar o fluxo de ar e controlar e minimizar os arranques dos compressores [16].

O armazenamento assume-se como um elemento determinante na eficiência energética do sistema do ar, na medida em que é um elemento que regulariza e, simultaneamente, armazena, sendo capaz de estabelecer equilíbrios desejáveis entre a produção e o consumo [26].

De acordo com o [35], os recipientes de ar comprimido classificam-se nas seguintes classes de perigo consoante a energia potencial dos mesmos e o risco associado à instalação e funcionamento, tendo em conta a definição de diferentes graus de exigência para cada uma das instalações:

$PS \times V \geq 30\,000 \text{ bar} \times \text{litro}$ (**classe de perigo A**)

$15\,000 \leq PS \times V < 30\,000 \text{ bar} \times \text{litro}$ (**classe de perigo B**)

$3000 \leq PS \times V < 15\,000 \text{ bar} \times \text{litro}$ (**classe de perigo C**)

De notar que a PS corresponde à Pressão Máxima Admissível e V corresponde ao volume interno total do recipiente expresso em litros [35].

A instalação de Reservatórios de Ar comprimido (RAC) deverá ser feita de modo a salvaguardar a segurança de pessoas e bens, de preferência em local isolado, suficientemente amplo, com arejamento, iluminação adequada e com acessos fáceis, rápidos e seguros [35].

A instalação dos reservatórios deve ser efetuada de modo a ser possível a inspeção do recipiente em toda a sua superfície exterior, assegurando uma distância mínima de 600 milímetros (mm) entre a superfície exterior do recipiente a paredes, tetos e outros objetos.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

A distância da parte inferior do recipiente ao solo não poderá ser inferior a 300 mm. A colocação de tubagens, cabos elétricos ou quaisquer outros elementos necessários à instalação não pode impedir o livre acesso ao recipiente [35].

Em nenhuma circunstância é autorizado instalar um RAC em local inacessível ou enterrado [35].

Relativamente aos elementos de segurança, tais como, válvulas de segurança, manómetros e todo o tipo de aparelhos de controlo, estes devem ser instalados e localizados de modo a não poderem ser facilmente tornados inoperantes por quaisquer meios, incluindo os ambientais [35].

O sistema de purga de condensados deve permitir que estes sejam conduzidos para esgoto em condições adequadas à sua natureza e exigências do ambiente envolvente [35].

Não é permitida a instalação de RAC no interior de edifícios com pé-direito inferior a 2 metros [35].

As tubagens de distribuição devem ser identificadas com coloração azul-clara, tal como indicado na Norma Portuguesa (NP) 182 (1966). É recomendável que o RAC apresente a mesma coloração.

Sempre que o RAC se encontre instalado em local próximo de passagem de veículos ou movimentação de máquinas, de tal forma que represente um risco à sua integridade, deve ser colocada proteção adequada, fixa ao solo e ou paredes, na área em torno do perímetro do recipiente e afastada deste no mínimo 600 mm. Em nenhuma circunstância esta proteção pode limitar o acesso ao recipiente. Em casos especiais e devidamente fundamentados, a Direção Regional de Economia (DRE) pode autorizar alternativas aos requisitos para a instalação de RAC referidos anteriormente, desde que estes garantam o mesmo nível de segurança [35].

2.5 Distribuição de Ar comprimido

A rede de distribuição de ar comprimido tem um papel significativo, sendo responsável por encaminhar o ar desde a produção até aos pontos de consumo. Esta deve fazê-lo com a menor perda de carga possível, menor quantidade de fugas de ar ao longo de toda a tubagem, preservando sempre a qualidade do ar [10].

O traçado e o diâmetro da rede dependem de um compromisso entre considerações técnicas e considerações económicas. A rede de distribuição divide-se em: tubagem de interligação, tubagem principal e secundária [26].

A tubagem de interligação permite ligar todos os equipamentos pertencentes à central. Caracteriza-se por troços retos e curtos e que contêm curvas, “tês”, válvulas ou coletores de entrada ou saída. Estes elementos podem desencadear fenómenos de turbulência.

A linha principal permite ligar a central de ar comprimido a uma vasta área de pontos consumidores. A linha secundária ramifica-se a partir da linha principal e sustenta uma determinada zona de trabalho [7].

Existem, tipicamente, duas configurações de redes de ar comprimido: circuito aberto ou circuito fechado.

O circuito aberto (Figura 2.15) é utilizado maioritariamente em instalações simples, em que o ponto de consumo final de ar se encontra relativamente próximo do ponto de produção.

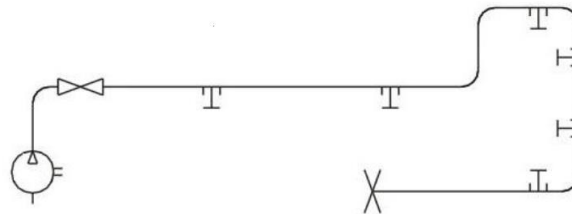


Figura 2.15 – Circuito aberto [36]

O circuito fechado (Figura 2.16) é recorrentemente utilizado em unidades fabris. Neste tipo de circuitos a distribuição do ar é uniforme. Este tipo de tipologia da rede dificulta a separação da humidade [7] [13].



Figura 2.16 - Circuito fechado [36]

A inclinação da tubagem é um fator a ter em consideração para evitar acumulações de água e resíduos no interior da tubagem. Se a temperatura das tubagens for superior à temperatura de saída do ar à saída dos secadores, este sairá praticamente seco. Se a temperatura reduzir, haverá, precipitação de água. Neste contexto, a inclinação permite recolher essa eventual condensação e impurezas, conduzindo-as para o ponto mais baixo, onde são eliminadas para a atmosfera, através de um dreno (automático ou manual). O valor recomendado da inclinação é de 0,5 a 2% do comprimento reto da tubagem. No caso de uma rede extensa, recomenda-se inserir mais do que um dreno, distanciados, aproximadamente, 20 a 30 metros um do outro [13].

A cor aconselhada para tubagens de ar comprimido, de acordo com a Norma Portuguesa NP182, é o azul-claro [14].

2.5.1 Tubagens e Conexões

Esta subsecção de capítulo apresenta alguns acessórios da rede de distribuição.

Os Cotovelos (Figura 2.17) efetuam as curvas do percurso da rede de ar comprimido. Devem possuir na curvatura interior um raio mínimo de duas vezes o diâmetro externo do tubo. [13]



Figura 2.17 – Cotovelo [37]

As válvulas de Macho-Esférico são as mais recomendadas para as redes de ar comprimido. Estão enquadradas na categoria de “válvulas de corte” e, como tal, apenas têm duas posições: totalmente abertas ou totalmente fechadas. Permitem isolar a rede em várias secções para inspecionar ou realizar tarefas de manutenção. Assim, evita-se que outras secções sejam atingidas, não havendo paralisação da produção. As perdas de carga destas válvulas são muito inferiores às válvulas de Globo [7]. De seguida, nas Figuras 2.18 e 2.19 estão ilustradas a válvula diafragma e globo (Figura 2.18) e válvula macho esférico (Figura 2.19).



Figura 2.18- Válvula Diafragma e Globo [38]



Figura 2.19- Válvula Macho Esférico [38]

De modo a garantir a qualidade do ar à entrada dos equipamentos de uso final são utilizados Filtro-Regulador-Lubrificadores (FRL). Este equipamento (Figura 2.20) filtra, regula e lubrifica o ar comprimido antes de entrar nos equipamentos.



Figura 2.20 – Filtro-Regulador-Lubrificador [39]

A filtração permite remover as partículas que se formaram no ar desde a sua produção. A regulação permite atenuar as variações de pressão da rede e garantir que a pressão que sustenta o equipamento é constante. A lubrificação permite reduzir o atrito e lubrificar os equipamentos, aumentando-lhes o tempo de vida útil [7]. Este equipamento pode ser aplicado de forma única na rede, contudo, consoante o tipo de equipamento que este irá preceder, pode ser aplicado unicamente o filtro e o regulador de pressão.

Os Purgadores são utilizados para reter a condensação ao longo da tubagem de ar comprimido. Estes devem ser colocados nos pontos mais baixos da rede para aproveitar a ação gravítica para a recolha de condensados. A seleção do tipo de purgador é essencial para a remoção correta de condensados. O dimensionamento incorreto ou manutenção deficiente podem comprometer o funcionamento dos purgadores [7].

Relativamente às ligações entre tubos, processam-se de diversas formas, roscada, soldada, flangeada, acoplamento rápido, devendo apresentar uma perfeita vedação [13].

As uniões soldadas são as que permitem o melhor isolamento do ar que circula no interior das tubagens, contudo, apresentam um custo superior às uniões roscadas. As ligações roscadas efetuam-se até diâmetros de 3 polegadas. Para diâmetros superiores, recomendam-se uniões soldadas [13].

Em instalações que devem apresentar um alto grau de confiabilidade, recomenda-se o uso de uniões flangeada e soldada. No caso de instalações provisórias, recomenda-se o acoplamento rápido, também estanque [13].

2.5.2 Perdas de carga

A perda de carga é um indicador de eficiência da instalação, uma vez que expressa a facilidade ou dificuldade do ar em suprir os pontos de consumo e que corresponde a uma percentagem de energia que é dissipada [26].

A maioria das tubagens apresenta várias secções de transição nas quais se verifica a variação de diâmetros, ou seja, o diâmetro do tubo de alimentação é diferente do tubo de descarga.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Estas mudanças de diâmetro da secção podem ser abruptas ou suaves (com uma mudança gradual da área disponível para o escoamento). As perdas de carga podem diferir se a variação do diâmetro for gradual [40].

Os acessórios adicionais contribuem para a perda de carga na tubulação. Normalmente, estas perdas são denominadas de perdas localizadas (ou singulares). Por vezes, as perdas de carga singulares são fornecidas em termos de comprimento equivalente.

Nesta terminologia, a perda de carga através de um componente é fornecida em termos do comprimento do tubo que produz a mesma perda de carga que o componente [40].

A perda de carga de uma tubulação é igual à soma da perda de carga do comprimento equivalente de um tubo reto com o somatório dos comprimentos equivalentes dos componentes adicionais da tubulação [40].

A perda de carga é calculada analisando, primeiramente, o tipo de regime do fluxo utilizando o número de Reynolds, a rugosidade da superfície e os pontos de estrangulamento [41].

O número de Reynolds corresponde o quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade do fluido. Isto determina o regime do fluxo, laminar ou turbulento.

O número de Reynolds elevado significa que as forças de inércia são superiores às forças de viscosidade; deste modo, as forças viscosas não podem evitar a flutuação aleatória e rápida do fluido. Quando o número de Reynolds é reduzido, as forças viscosas são grandes o suficiente para suprimir flutuações devido a forças inerciais. Portanto, o fluxo é turbulento no primeiro caso e laminar no segundo caso. [41] A zona de transição entre os regimes laminar e turbulento corresponde a um número crítico de Reynolds de, aproximadamente, $Re = 2300$, no caso de tubos de secção circular, situação que corresponde ao presente Projeto [41].

$$Re = \frac{\text{Forças de Inércia}}{\text{Forças de Viscosidade}} \quad (2.1)$$

A partir da rugosidade relativa, definida como o quociente entre a altura média de rugosidade do tubo e o diâmetro do tubo, e do número de Reynolds, determina-se o fator de atrito [41].

A expressão 2.2 permite determinar a Perda de Carga ao longo de um troço de tubagem [10]:

$$\Delta P = 450 \times \frac{Q^{1,85} \times L}{d^5 \times p} \quad (2.2)$$

ΔP – Queda de pressão [bar]

Q – Caudal [l/s]

L – Comprimento da tubagem [m]

d – Diâmetro interno da tubagem [mm]

P – Pressão absoluta inicial [bar]

3 CASO DE ESTUDO: SITUAÇÃO ATUAL

A Cimpor usufrui de uma rede de ar comprimido bastante vasta e importante para o funcionamento do processo de produção de cimento. A rede permite a utilização de ferramentas pneumáticas como os cilindros pneumáticos no interior das ensacadoras mecânicas e nos aplicadores de sacos, bem como, a utilização de electroválvulas para despoeiramento dos filtros e controlo do processo.

A rede geral de ar comprimido da unidade fabril – Centro de Produção de Souselas – produz cimento, quer para o mercado interno quer para exportação, e localiza-se junto à Serra do Alhastro, onde existem elevadas reservas de calcários. A fábrica fica situada na Rua dos Troviscais, nº10, União de Freguesias de Souselas e Botão, Souselas. Encontra-se localizada a cerca de 15 km da cidade de Coimbra, usufruindo de grande proximidade a portos marítimos e a bons acessos ferroviários e rodoviários. A área da fábrica que será alvo de estudo neste projeto de mestrado é o edifício da Ensacagem dos sacos, representado na Figura 3.1. Este Edifício tem 5 Pisos.

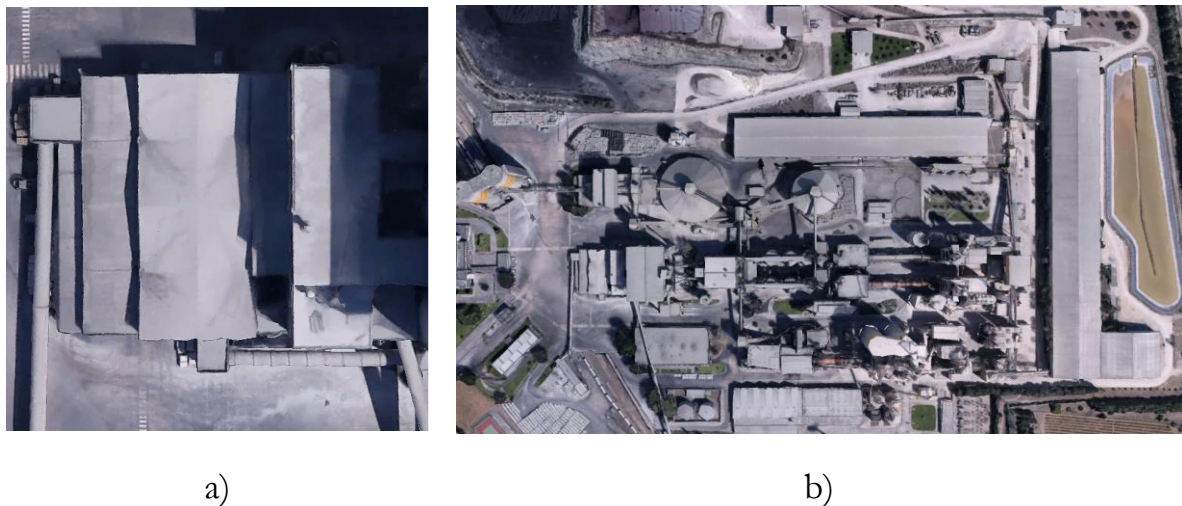


Figura 3.1 – a) Edifício da Ensacagem e b) Centro de Produção de Souselas, Coimbra [42]

3.1 Central de Produção de Ar comprimido

A central de ar comprimido em estudo situa-se no Piso 1 do Edifício da Ensacagem (Figura 3.2). É constituída por quatro compressores, três secadores, três reservatórios, dois filtros e dois separadores água/óleo.

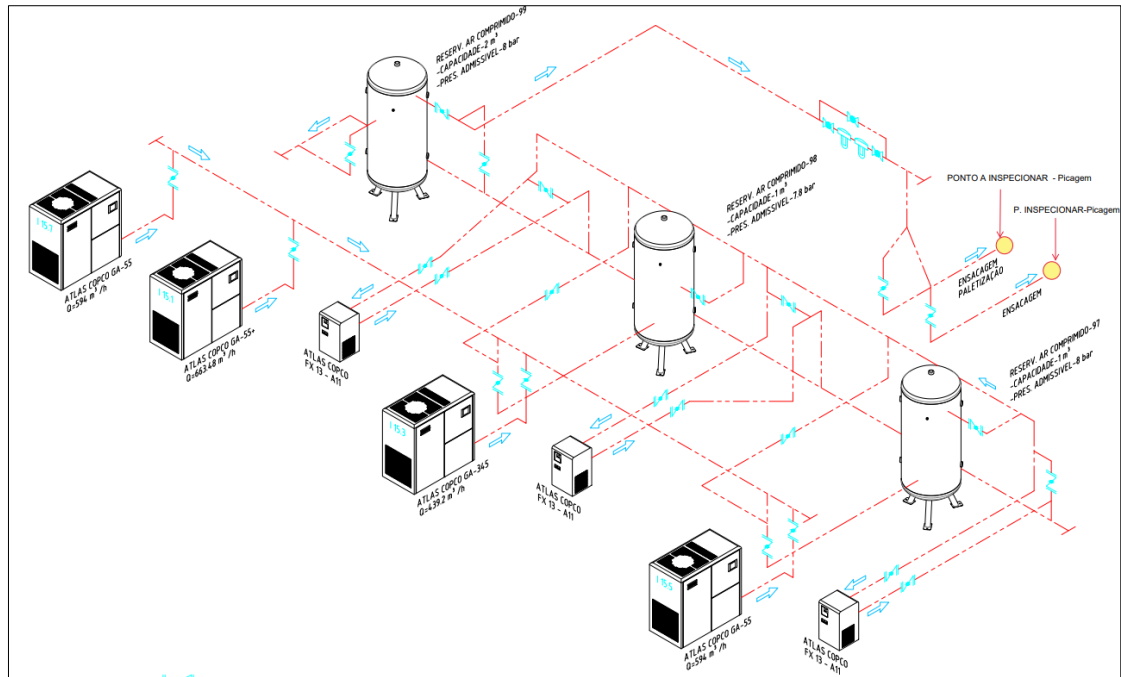


Figura 3.2 – Sala de Produção de Ar comprimido

Os quatro compressores são de Parafuso Rotativo com injeção de óleo, da marca Atlas Copco, de tecnologia de velocidade fixa e controlo carga/vazio (Figura 3.3)



Figura 3.3 – Compressores

O compressor GA 55+ API625246 tem cerca de 6 anos de operação, apresentando à data de auditoria realizada pela Atlas Copco no período de 4 a 11 de novembro de 2023, cerca de 26477 horas de funcionamento. Trata-se de um equipamento da marca Atlas Copco, que a uma pressão absoluta de serviço de 7 bar, o caudal correspondente é de 184 l/s (11,1 m³/min) e a potência instalada de 55 kW.

O compressor GA 345 ARP668946 tem cerca de 35 anos de operação, apresentando à data de auditoria realizada pela Atlas Copco no período de 4 a 11 de novembro de 2023 cerca de 88056 horas de funcionamento.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Trata-se de um equipamento da marca Atlas Copco, que a uma pressão absoluta de serviço de 7 bar, o caudal correspondente é de 121,7 l/s (7,3 m³/min) e a potência instalada de 44,8 kW.

O compressor GA55 ARP890794 tem cerca de 32 anos de operação, apresentando à data de auditoria realizada pela Atlas Copco no período de 4 a 11 de novembro de 2023, cerca de 167985 horas de funcionamento. Trata-se de um equipamento da marca Atlas Copco, que a uma pressão absoluta de serviço de 7 bar, o caudal correspondente é de 169 l/s (10,2 m³/min) e a potência instalada de 55 kW.

O compressor GA55 AII476612 tem cerca de 21 anos de operação, apresentando à data de auditoria realizada pela Atlas Copco no período de 4 a 11 de novembro de 2023, cerca de 66194 horas de funcionamento.

Trata-se de um equipamento da marca Atlas Copco, que a uma pressão absoluta de serviço de 7 bar, o caudal correspondente é de 169 l/s (10,2 m³/min) e a potência instalada de 55 kW.

Os compressores são comandados individualmente através do respetivo módulo de controlo, estando parametrizados em cascata, isto é:

- I15.1(GA55+ API625246): Pressão de carga de 5,2 bar e Pressão de vazio de 6,7 bar
- I15.3(GA345 ARP668946): Pressão de carga de 6 bar e Pressão de vazio de 7,1 bar
- I15.5(GA55 ARP890794): Pressão de carga de 6,5 bar e Pressão de vazio de 7,3 bar
- I15.7(GA55 AII476612): Pressão de carga de 6,3 bar e Pressão de vazio de 7,4 bar

A regulação dos módulos, as variações de consumo da rede e a operação de cada compressor podem originar flutuações no valor da pressão, o que desencadeia arranques repentinos associados a perdas energéticas significativas [26].

Os compressores comprimem o ar para um reservatório de 1 m³ e 2 reservatórios de 2 m³. Os três reservatórios estão interligados entre si.

A função dos reservatórios é de armazenar o ar comprimido, mas sobretudo a de atenuar as eventuais oscilações de pressão na rede de distribuição.

O ar proveniente de cada reservatório é tratado através de três secadores de ar de refrigeração do tipo FX 13 (Figura 3.4) equipados na saída com filtros de partículas do tipo PD 390 e DD 390, da marca Atlas Copco (Figura 3.5). O caudal máximo admissível é de 0,12 m³/s, com uma perda de carga de 0,2 bar e um ponto de orvalho de 3°C. A pressão de trabalho máxima é de 20 bar.



Figura 3.4 – Secador



Figura 3.5 – Filtros

Os condensados são encaminhados para 2 separadores água/óleo (Figura 3.6) que, tal como o nome indica, separam a água, que posteriormente é encaminhada para a Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) do óleo que, posteriormente, é encaminhado para o armazém de resíduos da fábrica. Os separadores de condensados são da marca Jorc Sepremium 30, sendo o caudal de 30 m³/min.



Figura 3.6 - Separador de Condensados Água/Óleo

3.1.1 Condições Atmosféricas da Sala de Compressores

No período de 06 a 11 de março de 2023, de 30 em 30 minutos, recolheram-se os dados relativamente à Humidade Relativa e à Temperatura Ambiente da Sala de Produção de Ar comprimido do edifício da Ensacagem, através do termo-higrómetro Testo 175H1 (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Aparelho Termo-higrómetro Testo 175H1

A Tabela 3.1 apresenta os resultados.

Tabela 3.1 - Condições ambientais da sala dos compressores

Condições ambientais da sala de compressores, Pressão atmosférica 101,325 kPa			
	Humidade Relativa [%]	Temperatura ambiente [°C]	Ponto de Orvalho [°C]
Valor Máximo	80	17,90	13,90
Valor Mínimo	57,60	18,00	9,52

A partir da Humidade Relativa e da Temperatura do ar é possível calcular o Ponto de Orvalho, como ilustrado através da fórmula de Magnus-Tetens (3.1) [43].

$$Td = T - \frac{100 - HR}{5} \quad (3.1)$$

Td - Ponto de Orvalho [°C]

T - Temperatura do ar [°C]

HR – Humidade Relativa [%]

O valor máximo registado de Humidade Relativa foi de 80% para uma temperatura da sala de compressores de 17,9°C e Ponto de Orvalho de 13,90 °C. O valor mínimo registado de Humidade Relativa foi de 57,60%, para uma temperatura da sala de compressores de 18°C e Ponto de Orvalho de 9,52 °C.

Durante o período contabilizado, 40% dos dados indicaram uma Humidade Relativa da sala de compressores igual ou superior a 75%.

O fenómeno de condensação da água é o resultado da compressão do ar. A quantidade de água produzida pelo compressor e que, conseqüentemente, irá passar pelo secador depende da temperatura e humidade do ar atmosférico à entrada do compressor. Caso o secador não esteja preparado para alta humidade, a sua eficiência pode ficar comprometida, resultando num ar comprimido de menor qualidade.

A humidade na forma de vapor de água, se não for devidamente controlada, pode originar diversos problemas, tais como: elevados custos de manutenção, redução da vida útil dos equipamentos e afetação do desempenho dos equipamentos pneumáticos, desencadeando paragens não programadas [18].

Os compressores emitem calor durante o seu funcionamento, o que incita o aumento da temperatura da sala de produção de ar. Assim, a ventilação da sala de compressores é essencial para a dissipação do calor [44].

Atualmente, a sala de compressores do edifício da Ensacagem possui uma janela do lado poente por onde entram os equipamentos da sala de elevadas dimensões que não passam através da porta principal. Esta deveria estar permanentemente fechada de forma a evitar a entrada de poeiras e substâncias corrosivas do ar, típicas de um ambiente cimenteiro, mas tal não acontece, o que pode ser um dos fatores para o registo do valor de humidade relativa elevado. Idealmente, o ambiente da sala de compressores deveria ser pressurizado, ou seja, a pressão no seu interior deveria ser superior à pressão ambiente.

3.1.2 Análise do Perfil de Produção Semanal

Face aos elevados consumos e de custos do ar comprimido numa unidade industrial com estas características, a Cimpor, numa perspetiva de melhoria contínua, em particular no que diz respeito à eficiência energética, resolveu redimensionar toda a rede. Neste contexto, foi contactada a empresa Atlas Copco, que ficou responsável por todo o projeto. Uma das primeiras tarefas consistiu em elaborar, de forma detalhada, uma análise do perfil de consumo semanal. Foi considerado interessante para este projeto dispor deste tipo de informação, pelo que se resolveu incluir o perfil semanal de produção de ar comprimido com base nas horas de trabalho semanais (168 horas/semana) dos compressores relativos aos edifícios da Ensacagem, da Paletização (processo de dispor os sacos em paletes) e do Pacotão (processo de envolver os sacos por um plástico). Assim, apesar de o perfil representado na Figura 3.9 não se identificar com o projeto em apreço, ainda assim é apresentado face à sua importância.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

A análise do perfil de consumo de ar comprimido teve como base a semana de 04 a 11 de novembro de 2023. Os dados foram recolhidos através de um caudalímetro, um registo de pressão e um registo de corrente, no decorrer de um estudo realizado pela empresa Atlas Copco (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Aparelhos: a) Caudalímetro; b) Registo de Pressão; c) Registo corrente

Na Figura 3.9 está representado o perfil semanal de produção de ar comprimido com base nas horas de trabalho semanais (168 horas/semana) dos compressores mencionados na secção 3.1. Os dados não são relativos apenas ao edifício da Ensacagem, mas também aos edifícios da Paletização e do Pacotão, pelo que os valores são apenas indicativos.

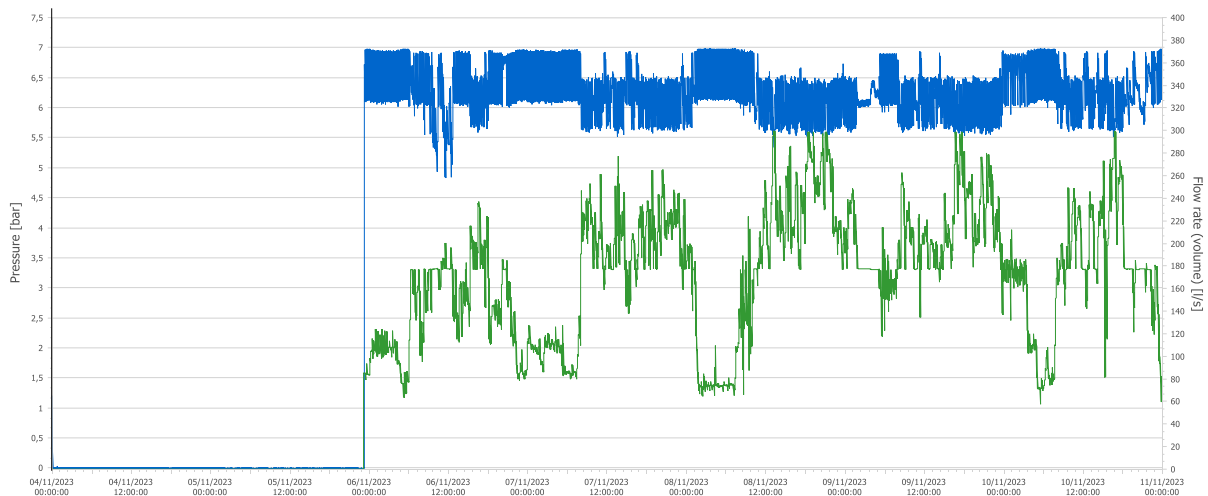


Figura 3.9 - Perfil de produção com base nas horas de trabalho semanais (168 horas/semana)

A Figura 3.9 mostra que nos dias 04 e 05 de novembro (referentes ao fim de semana) não há registos da pressão (representada a linha azul) e do caudal (representado a linha verde) dos compressores. Isto justifica-se porque, apesar da fábrica laborar continuamente durante 365 dias por ano (excetuando as paragens programadas), a instalação da Ensacagem está parada aos fins de semana.

O arranque da instalação aconteceu às 00h00 do dia 06 de novembro, sendo possível observar um pico de consumo relativo à pressurização da rede. A pressão máxima naquela semana foi de 7 bar.

O caudal total produzido foi de 299 l/s (17,94m³/min) e o caudal total produzido médio foi de 124 l/s (7,44 m³/min).

Para 168 horas, o volume total produzido pelos compressores foi de 75 200 m³, o que corresponde a um total de energia consumida de 9 644 kWh.

3.1.3 Horas de Funcionamento dos Compressores

As horas de operação, os tempos em vazio dos compressores e os tempos de paragem são valores importantes na avaliação do desgaste dos equipamentos, da distribuição de cargas entre si e dos desperdícios de energia resultantes das horas de vazio [26].

A Figura 3.10 representa as horas de funcionamento dos compressores, nomeadamente, as horas em carga, vazio e paragem.

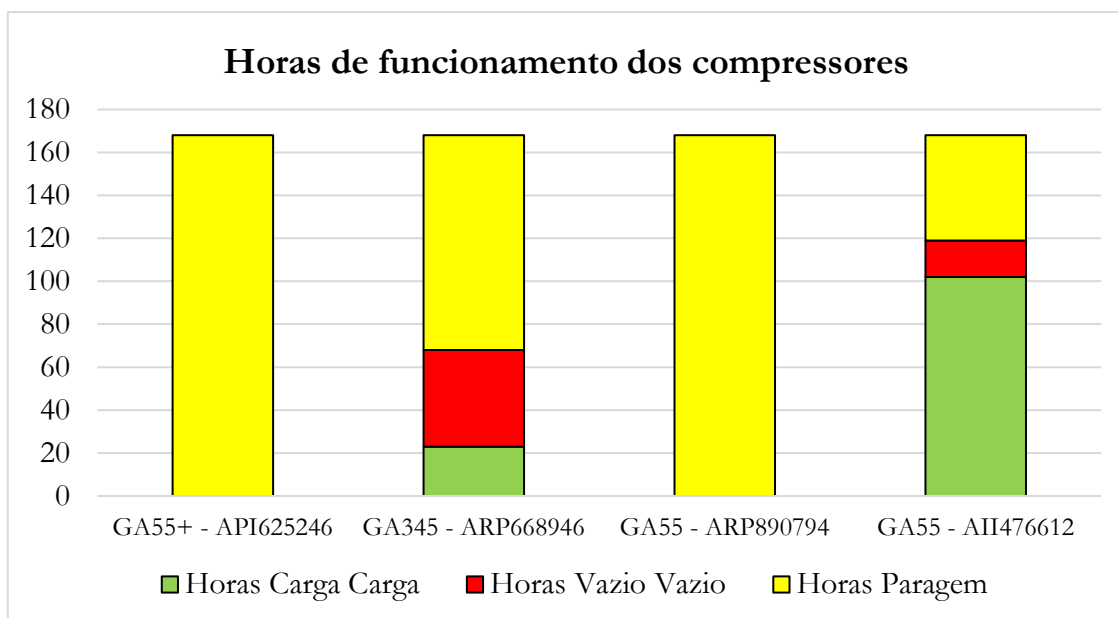


Figura 3.10 - Horas de Funcionamento dos Compressores, 168 horas semanais

Compressores		Período Registo	Horas Carga	Horas Vazio	Horas Paragem
GA55+ - API625246	I15.1	168	0	0	168
GA345 - ARP668946	I15.3	168	23	45	100
GA55 - ARP890794	I15.7	168	0	0	168
GA55 - AII476612	15.5	168	102	17	49

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Pela análise da Figura 3.10, observa-se que os compressores GA55+API625246 e GA55 ARP890794 estiveram parados durante os 7 dias de análise.

O compressor GA345 ARP668946 permaneceu mais tempo em vazio do que em carga, com o tempo em vazio representando aproximadamente 66% das horas totais de operação. Esta situação pode ser atribuída, principalmente, à ineficiente interligação de comando entre os quatro compressores.

Como mencionado anteriormente, esses compressores operam em cascata, respondendo aos diferentes níveis de consumo da instalação. Cada compressor opera de forma independente, ou seja, a sequência de entrada/saída dos compressores é fixa. Por exemplo, se considerarmos os 2 compressores que estiveram em funcionamento durante a semana de análise: o compressor GA345 tem sua pressão mínima (em carga) definida como 6 bar e sua pressão máxima (em vazio) como 7,1 bar. Quando a pressão da instalação atinge o valor máximo do compressor, ele entra em modo de vazio. No entanto, à medida que a pressão diminui, ela atinge a pressão mínima do compressor GA55 (6,5 bar), que então inicia seu ciclo de carga. Isso resulta em um maior número de ciclos de carga/vazio, ciclos de carga mais curtos, arranques frequentes e desgaste dos equipamentos.

O compressor GA55 AR890794 permaneceu parado durante todo o período devido à manutenção. Enquanto isso, o compressor GA55 AII476612 operou principalmente em carga, representando 86% do tempo total de operação.

A Figura 3.10 indica que, dos quatro compressores na sala de ensacagem, apenas dois estiveram em operação durante uma semana de produção normal na unidade fabril.

3.1.4 Quantificação das Fugas de ar

A fim de compreender o caudal de fugas de ar presente e a sua influência quando comparado com o volume de produção, como parte do estudo de eficiência energética conduzido pela Atlas Copco, durante um período em que a área de Embalagem e Expedição da fábrica estava inativa enquanto os compressores permaneciam em operação, o caudal de fugas foi medido utilizando um caudalímetro.

A Figura 3.11 ilustra o caudal de fugas de ar (linha verde) e pressão (linha azul) da sala de compressores, medidos a partir de um caudalímetro. O valor do caudal de fugas de ar foi de, aproximadamente, 72 l/s.

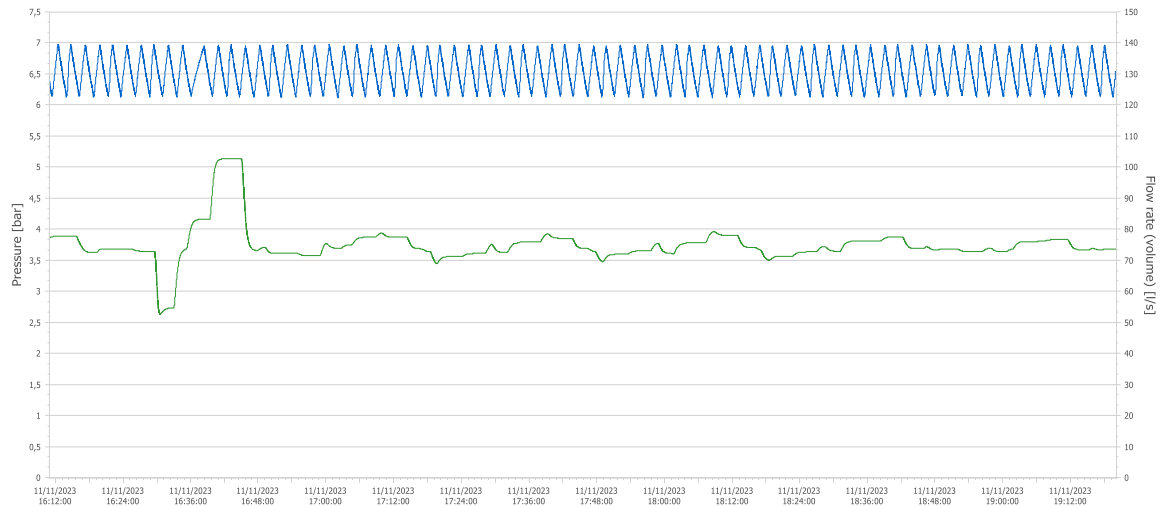


Figura 3.11 - Caudal de fugas de ar da área da Embalagem e Expedição

Durante o estágio profissional realizado na Cimpor, foi conduzido um estudo abrangente sobre as fugas de ar comprimido em toda a extensão da fábrica, durante o período compreendido entre 5 de outubro de 2022 e 25 de janeiro de 2023. Apenas serão apresentados os resultados relativos à área de estudo do Projeto: Embalagem e Expedição.

Os objetivos primordiais delineados desta atividade enumeram-se da seguinte forma: identificar e quantificar as fugas de ar, bem como reconhecer os locais críticos suscetíveis ao surgimento de fugas, com o propósito de apresentar sugestões de otimização e aprimoramento do sistema.

O equipamento utilizado para identificar as fugas foi o detetor de fugas ultrassónico LD510, dotado de uma câmara integrada, conforme ilustrado na Figura 3.12, para a identificação das fugas. Este dispositivo permite a deteção de fugas tanto audíveis quanto inaudíveis, viabilizando inspeções enquanto as linhas de produção estão em operação.



Figura 3.12 - Detetor ultrassónico LD510, câmara integrada

Com base na amplitude de onda ultrassónica, expressa em decibéis, e considerando o diâmetro da fuga e a pressão da tubagem, medida em bar, é possível determinar o caudal de ar perdido, o qual está diretamente associado aos custos energéticos.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Por conseguinte, tal equipamento proporciona uma análise quantitativa e económica das fugas de ar comprimido.

Na Tabela 3.2 estão discriminados os parâmetros que foram ajustados antes de iniciar a deteção das fugas.

Tabela 3.2 – Dados que são introduzidos no detetor ultrassónico LD510

Pressão da rede	7 bar
Tipo de sensor	Trompete acústico
Distância de medição (entre o equipamento e o ponto de fuga)	1 / 3 / 5/ 6 metros
Preço de eletricidade/ kWh*	0,16 €/kWh

*kWh: kilowatt-hora

O preço da eletricidade é calculado como uma média ponderada dos períodos de ponta, cheia, vazio e super vazio, excluindo o termo de redes de potência e a energia reativa consumida.

O tempo de operação dos compressores considerado foi de 6240 horas para a área de Embalagem e Expedição (devido à operação em 5 dias úteis por semana).

Embora a pressão seja um parâmetro ajustável, a pressão inicial à saída do compressor foi considerada como 7 bar.

No entanto, ao longo da instalação, a pressão do ar diminui até atingir o consumidor final devido às perdas de carga e fugas de ar dos equipamentos.

A distância de medição pretendida era de 1 metro do equipamento, mas em casos de acesso difícil, outras distâncias (3, 5 ou 6 metros) foram selecionadas.

No detetor ultrassónico, é inserido o custo da eletricidade por 1000 m³, que é calculado a partir do preço definido da eletricidade (0,16 €/kWh) e do caudal máximo teórico de um compressor em cada sala de compressores (m³/min). Foram consideradas 3 salas de compressores e, para cada uma delas, foi selecionado o compressor com o maior caudal teórico.

O compressor selecionado para os cálculos teóricos da área da Embalagem e Expedição debita um caudal de 10,3 m³/min de ar e tem uma potência de 55 kW.

O valor calculado dos custos de energia (14,24€/1000m³) é introduzido no detetor ultrassónico (*input*) e, a partir daí, obtém-se o valor do custo global, que inclui os custos de energia, os custos de manutenção e o investimento inicial dos equipamentos (20,34€/1000m³).

Do total de fugas da instalação, foram identificados alguns fatores que, no caso da instalação inspecionada, encurtam o tempo de vida útil dos componentes e fomentam o aparecimento de fugas de ar comprimido.

As fugas de ar podem ocorrer em qualquer parte da rede de ar comprimido, contudo, existem zonas favoráveis ao seu aparecimento. Durante a inspeção, verificou-se que a maioria das fugas (33%) correspondia a tubagens e acessórios, seguindo-se as electroválvulas (incluem-se as dos filtros, 28%), os conjuntos lubrificadores, filtros e reguladores (23%), os cilindros pneumáticos (11%) e as válvulas (5%).

A Figura 3.13 ilustra o gráfico dos principais componentes com fugas de ar.

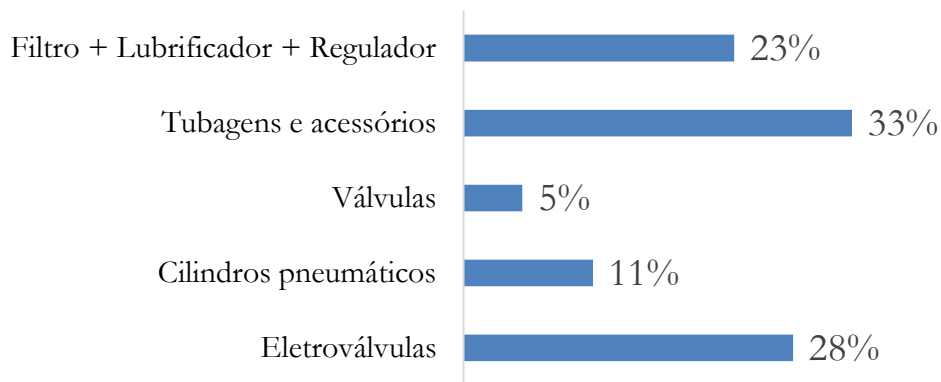


Figura 3.13 - Principais componentes com fugas de ar

A Figura 3.14 representa os equipamentos sem fixações.



a)



b)

Figura 3.14 - Incorretas fixações dos equipamentos: a) Eletroválvula; b) Filtro e Lubrificador

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

A Figura 3.15 representa os equipamentos bem posicionados.



a)



b)

Figura 3.15 - Correta fixação dos equipamentos

O corte de tubos com ferramentas inapropriadas, aplicação de fita de *teflon* aplicado no sentido contrário ou em quantidades não recomendadas, aperto excessivo ou insuficiente das roscas são algumas das causas possíveis para o aparecimento de fugas de ar.

A seleção adequada dos materiais também é um fator importante tendo em conta as condições do meio ambiente; a combinação de acessórios incompatíveis mecanicamente também é uma causa comum de fugas.

O estudo permitiu identificar na área da Embalagem e Expedição 68 fugas de ar comprimido, totalizando um caudal de ar debitado de 23,70 l/s (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Resultados da Embalagem e Expedição

Número total de fugas de ar:	68
Caudal de ar debitado:	23,70 l/s
Energia consumida anual:	85,85 MWh
Custo energético evitável anual:	13 752,41€
Custo global evitável anual:	19 646,30€
Emissões de CO ₂ :	22,66 Ton/MWh

**Ton/MWh: Toneladas por MegaWatt-hora

O fator de emissão da eletricidade nacional considerado para o cálculo das emissões de CO₂ foi de 0,264 [45].

Os principais motivos para a não reparação, até à data, de 100% das fugas identificadas enumeram-se da seguinte forma: inexistência de material em *stock* no armazém (sendo que algum material não tinha histórico no SAP(*System Applications and Products in Data Processing*), por ser a primeira vez que era substituído e foi necessário codificar o material); impossibilidade de parar os equipamentos para não interromper o normal funcionamento do processo de fabrico; inexistência de recursos humanos disponíveis devido à priorização de outras atividades. Contudo, todas estas causas são solucionáveis.

Por último, na Tabela 3.4 é apresentado o balanço económico final com a reparação das fugas de ar até à data (25/01/2023), considerando o período de 365 dias. O balanço económico resulta da diferença entre o proveito económico da reparação das fugas e o material utilizado para as reparar.

Tabela 3.4 – Balanço económico

Da reparação de 88 % fugas identificadas	
Proveito económico com a reparação de 88% das fugas de ar da Embalagem e Expedição:	(+) 17 288,74 €
Custos do Material utilizado na Embalagem e Expedição:	(-) 6 054,46 €
Balanço económico final anual:	(+) 11 234,28 €

Os valores apresentados são puramente teóricos, derivados exclusivamente dos dados fornecidos pelo fabricante sobre o caudal debitado e a potência dos compressores que sustentam a fábrica.

Estes valores não consideram as perdas de energia na saída dos secadores, as perdas de carga ao longo da instalação, as horas de operação dos compressores, nem a idade e o estado de conservação dos equipamentos. É importante notar que um compressor mais antigo, em geral, necessita fornecer um caudal de ar superior a um compressor mais recente para atingir a mesma pressão, o que resulta em um consumo maior de energia elétrica. Portanto, é esperado que o caudal contabilizado pelos caudalímetros (72 l/s) seja superior ao registado pelo equipamento ultrassónico (23,7 l/s), considerando essas variações.

3.2 Equipamentos Consumidores de Ar

Os equipamentos consumidores de ar comprimido da instalação são 4 Ensacadoras Mecânicas, 4 Aplicadores de Sacos e 10 Filtros de Despoeiramento.

3.2.1 Ensacadoras Mecânicas

Como referido no primeiro capítulo, existem duas formas principais de remessa de cimento: a granel ou em sacos de 25 e 50 kg. Na primeira, o cimento é expedido na forma de granel, sendo transferido diretamente do silo de cimento para camiões-cisterna, para cisternas para transporte ferroviário, ou ainda por navios de transporte de cimento. Na segunda, o cimento do silo “desce” para um equipamento designado por doseador de cimento (Figura 3.17) e, posteriormente, para a Ensacadora Mecânica respetiva (Figura 3.16).



Figura 3.16 - Doseador



Figura 3.17 - Ensacadora

O ensacamento é feito por 4 Ensacadoras Mecânicas rotativas que permitem o enchimento de sacos e os libertam quando atingem o peso especificado (25 e 50 kg). Cada ensacadora tem 8 bicas de enchimento. A Ensacadora 1 ensaca cimento em sacos de 50 kg. As Ensacadoras 2, 3, 4 e 5 ensacam cimento em sacos de 25 kg.

A Figura 3.18 ilustra o número de sacos por hora produzidos por cada ensacadora ao longo do ano de 2022. A capacidade nominal de enchimento de sacos das ensacadoras é de 2100 sacos por hora.

Durante o ano de 2022, nenhuma das ensacadoras atingiu esse valor, sendo o valor médio inferior a 1500 sacos por hora.

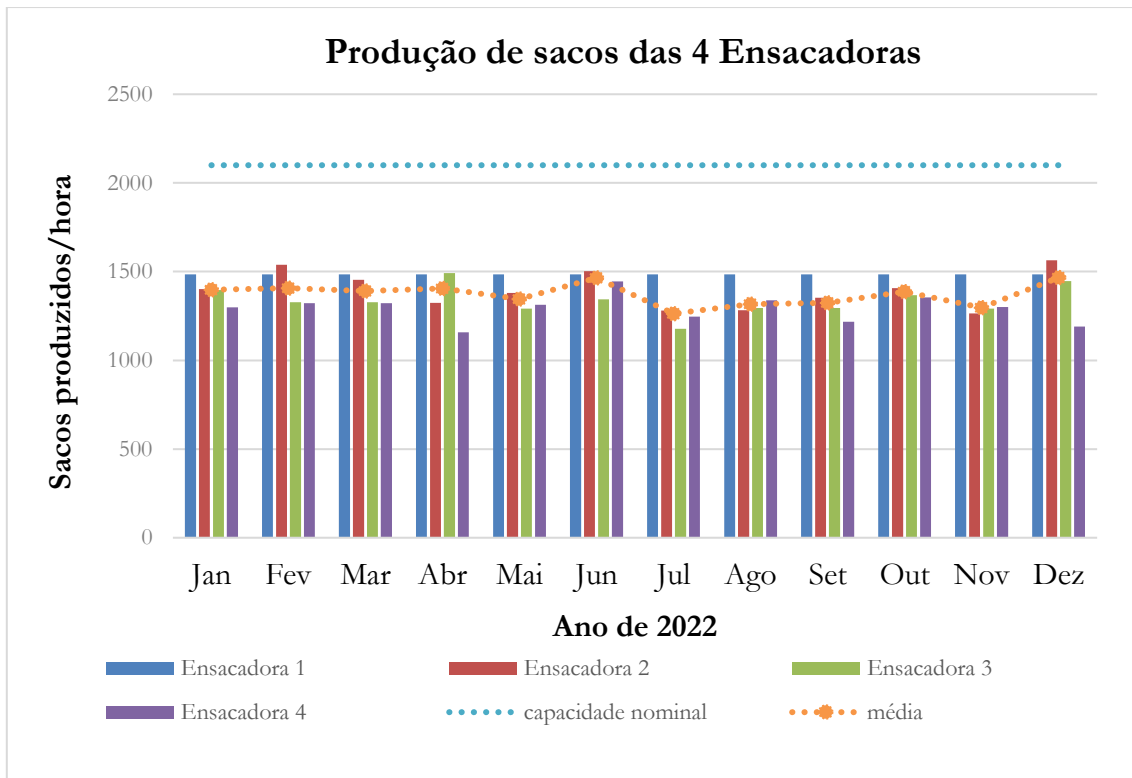


Figura 3.18 — Produção de sacos das 4 Ensacadoras, ano de 2022

3.2.2 Aplicadores de Sacos

O saco é expelido por um Aplicador de Sacos (Figura 3.19) e inserido nos bicos da ensacadora. Posteriormente, o cimento é injetado para o interior do saco, com fluxo controlado.



Figura 3.19 - Aplicador de Sacos

Após o enchimento, o saco é deslocado por um transportador com correias que o leva até a balança. Esta é calibrada para os limites inferiores de 49,5 kg e 24,5 kg e para o limite superior de 50,5 kg e 25,5 kg, consoante o tipo de saco. Os sacos que são retirados do processo pelo alçapão são cortados por uma serra e expelidos para fora do sistema e o cimento retorna para a ensacadora para ser ensacado novamente.

3.2.3 Filtros de Despoeiramento

Os Filtros de Despoeiramento (Figura 3.20) são equipamentos que têm como principal objetivo minimizar a emissão de gases poluentes para o meio ambiente pelas atividades industriais. Existem alguns tipos de sistemas de despoeiramento, de entre os quais podemos citar os sistemas com filtro de manga, os sistemas com filtro de cartuchos, os sistemas com ciclones e sistemas de lavagem de gases.



Figura 3.20 - Filtro de Despoeiramento (Mangas)

Os Filtros de Despoeiramento da instalação em estudo são de Mangas. O ar pulverulento entra no Filtro de Mangas por uma tubagem lateral que conduz o ar para o interior das mangas. As partículas de maiores dimensões ficam retidas na tremonha, T, uma vez que a velocidade ascendente do fluido na direção das Mangas é insuficiente para arrastá-las. As de menor granulometria acompanham o ar no sentido das Mangas M (as quais são sustentadas por gaiolas-armações de metal que organizam as mangas por fileiras), fixando-se nesse ponto, saindo o ar limpo do interior da manga M para a parte superior do filtro e desta para o ventilador.

A regulação da limpeza dos tecidos filtrantes efetua-se através do programador eletrónico, 2. Este aciona uma válvula eletromagnética, 4, que, por sua vez, provoca um impulso de abertura para a rampa de injeção, 3, e bico injetor, 5, do ar comprimido correspondente.

O ar à pressão de 6 a 7 bar escoar-se pela tubagem 3 e 5. Este jato provoca uma indução de arrastamento de ar limpo aumentando uma indução de arrastamento de ar limpo, aumentando assim o caudal insuflado para o interior da Manga M, em contracorrente.

Este facto provoca uma vibração no tecido o que, aliado à contracorrente, proporciona a sua limpeza. Como este processo é muito rápido (aproximadamente 0,2 segundos) não existem, praticamente, perturbações na regularidade de aspiração. A limpeza é feita em sequência, fila por fila. Cada Manga é limpa individualmente.

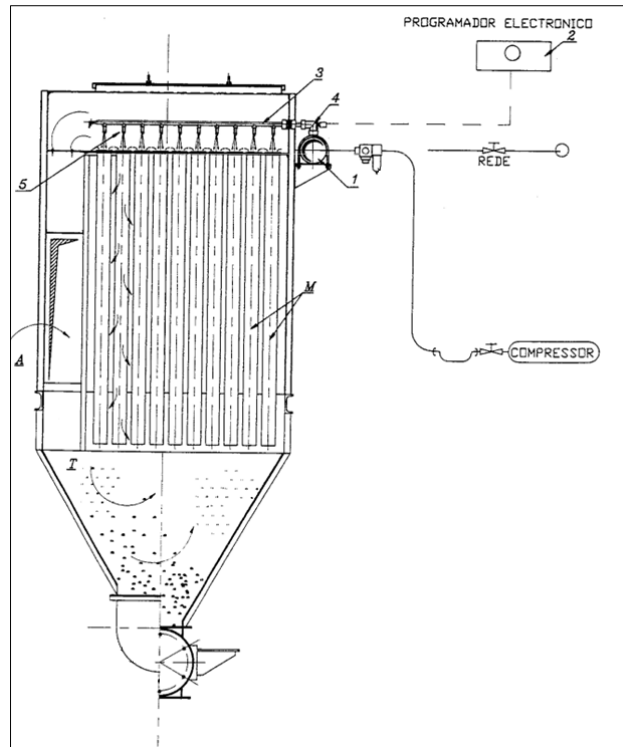


Figura 3.21 -Esquema do Filtro de Mangas

4 DIMENSIONAMENTO DA REDE DE AR COMPRIMIDO

Face à informação exposta nos capítulos anteriores, o presente capítulo apresenta, de forma detalhada, os passos inerentes ao dimensionamento da Rede de Ar comprimido do edifício da Ensacagem. A metodologia aplicada tem por base, essencialmente, os livros “Automação Pneumática” e “Compressed Air Manual” ambos mencionados nas Referências Bibliográficas.

Um sistema de distribuição de ar comprimido exige três requisitos principais: uma reduzida Perda de Carga entre o compressor e os pontos de consumo, um mínimo de fugas de ar nas tubagens de distribuição e uma qualidade de ar adequada [10].

Segundo [10] e [14] primeiramente estima-se a quantidade total de ar comprimido requerida pelos consumidores da rede, define-se a pressão de serviço necessária, a qual normalmente é a pressão mais elevada, determina-se o diâmetro interno das tubagens, seleciona-se o tipo de compressor e os acessórios necessários para a rede, estabelece-se o traçado da rede, define-se o material da tubagem e a perda de carga conforme o tipo de tubo (de distribuição, de elevação ou de serviço).

4.1 Consumo de Ar Requerido pelos Equipamentos

O caudal de Ar comprimido total requerido para o funcionamento da instalação é calculado através da soma do consumo dos consumidores de ar individuais. Posteriormente, adiciona-se um fator relativo às fugas de ar (5 a 10%) e um fator de segurança (20 a 40%) sobre o valor final calculado, o qual se aplica para futuras ampliações da rede [14].

Os consumidores de ar do Presente Projeto são 4 Ensacadoras Mecânicas, 4 Aplicadores de Sacos e 9 Filtros de Despoeiramento.

Para o cálculo do consumo de ar dos Aplicadores de Sacos e das Ensacadoras, é necessário conhecer o diâmetro interno dos cilindros (mm), o curso útil (cm ou mm), a pressão de trabalho (bar), o número de ciclos por minutos (n/min) e se os cilindros são de duplo ou simples efeito. A partir do diâmetro do cilindro e da pressão de serviço, determina-se o fator de consumo, “q” (Anexo A) [14].

Os consumos de ar estimados para cilindros de Simples e de Duplo Efeitos são dados pelas equações 4.1 e 4.2, respetivamente [14]:

$$Q = (s \cdot n \cdot q) \quad (4.1)$$

$$Q = 2(s \cdot n \cdot q) \quad (4.2)$$

Q - Consumo de ar [l/min]

s - Curso [cm]

n - Número de ciclos por minuto

q - Fator consumo de ar por cm de curso [l/cm]

Os equipamentos consumidores de ar operam durante 5 dias por semana, consoante as necessidades do mercado. A Figura 4.1 apresenta o tempo de funcionamento, em horas, ao longo do ano de 2022 das 4 Ensacadoras. Os 4 Aplicadores de Sacos operam simultaneamente com as Ensacadoras, pelo que as horas de funcionamento consideradas serão iguais entre si.

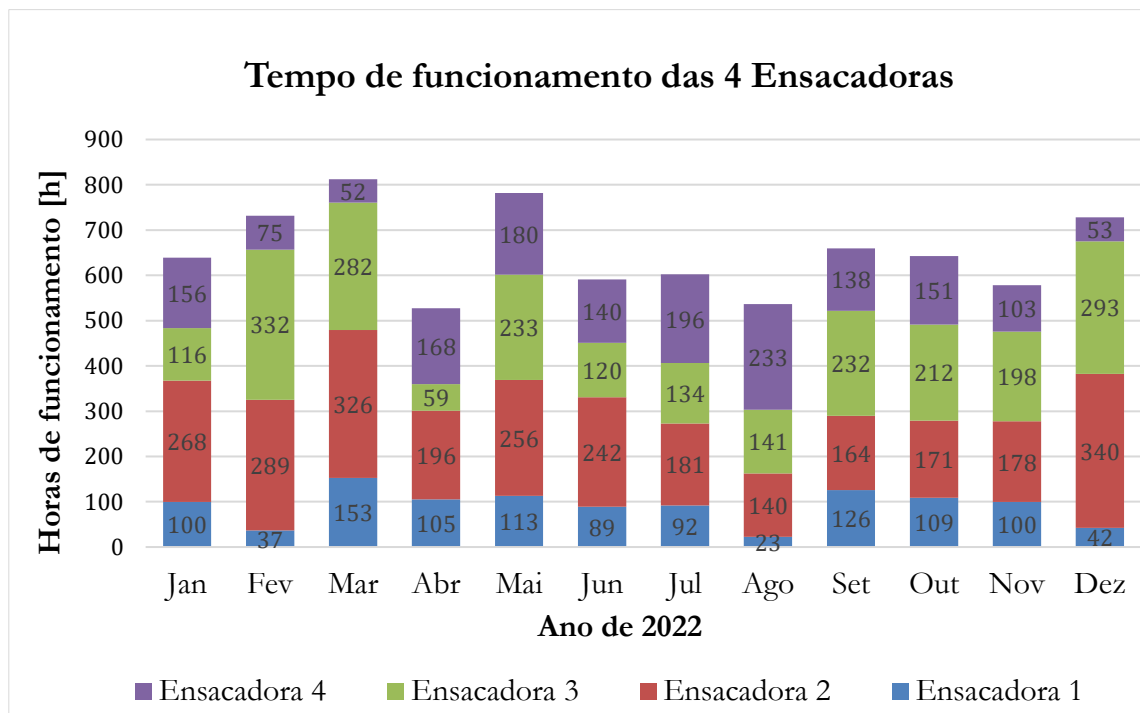


Figura 4.1 – Tempo de funcionamento, em horas, das 4 Ensacadoras ao longo do ano de 2022

O total de horas de funcionamento, durante o ano de 2022, das 4 Ensacadoras foi de 15508, 16056, 16748 e 16160, respetivamente para as Ensacadoras 1, 2, 3 e 4.

Cada Ensacadora tem um total de 25 cilindros de Duplo Efeito e cada Aplicador tem um total de 4 cilindros de Duplo Efeito, pelo que a fórmula utilizada para o cálculo do consumo de ar é a (4.2).

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

O parâmetro “Número de ciclos por minuto” foi determinado tem em conta a capacidade nominal de produção de sacos por hora de cada ensacadora, igual a 2100 sacos/hora.

A Tabela 4.1 apresenta o valor determinado do consumo de ar das 4 Ensacadoras.

Tabela 4.1 – Consumo de Ar das Ensacadoras

Ensacadora Mecânica							
Cilindros	Quantidade	Curso [cm]	Diâmetro [mm]	Fator consumo de ar por cm de curso, q [l/cm]	Pressão de trabalho [bar]	Número de ciclos por minuto	Consumo de ar [m ³ /h]
Cilindro de Duplo Efeito	8	4	40	0,085	6	4,4	1,44
Cilindro de Duplo Efeito	8	6,5	40	0,085	6	4,4	2,33
Cilindro de Duplo Efeito	8	2,5	20	0,022	6	4,4	0,23
Cilindro de Duplo Efeito	1	2,5	20	0,022	6	35	0,23
Consumo de ar de 1 Ensacadora (considerando o fator de segurança de 40% e o incremento de 10% para as fugas de ar)							6,51
Total de consumo de ar comprimido de 4 Ensacadoras (considerando o fator de segurança de 40% e o incremento de 10% para as fugas de ar)							26,06

A Tabela 4.2 apresenta o valor determinado do consumo de ar dos 4 Aplicadores de Sacos.

Tabela 4.2 - Consumo de ar dos Aplicadores de Sacos

Aplicador de Sacos							
Cilindros	Quantidade	Curso	Diâmetro	Fator consumo de ar por cm de curso, q	Pressão de trabalho	Número de ciclos por minuto	Consumo de ar
		[cm]	[mm]	[l/cm]	[bar]		[m ³ /h]
Cilindro de Duplo Efeito	1	5	40	0,085	6	35	1,79
Cilindro de Duplo Efeito	1	10	40	0,085	6	35	3,57
Cilindro de Duplo Efeito	1	2,5	40	0,085	6	35	0,89
Cilindro de Duplo Efeito	1	5	40	0,085	6	35	1,79
Cilindro de Duplo Efeito	1	15	50	0,134	6	35	8,44
Consumo de ar de 1 Aplicador de Sacos (considerando o fator de segurança de 40% e o incremento de 10% para as fugas de ar)							25,38
Total de consumo de ar comprimido de 4 Aplicadores de Sacos (considerando o fator de segurança de 40% e o incremento de 10% para as fugas de ar)							101,52

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

A Tabela 4.3 apresenta o valor determinado do consumo de ar dos 9 Filtros de Despoeiramento.

Tabela 4.3 - Consumo de ar dos Filtros de despoeiramento

Filtros de Despoeiramento			
	Área total filtrante [m ²]	Pressão de trabalho [bar]	Consumo de ar [m ³ /h]
Filtro de Mangas I1.2	19,50	6	15,48
Filtro de Mangas I1.5	334	6	27,72
Filtro de Mangas I2.23	80	6	23,40
Filtro de Mangas I2.2	18	6	15,48
Filtro de Mangas I2.5	334	6	27,72
Filtro de Mangas I1.22	80	6	23,40
Filtro de Mangas I3.3	18	6	23,40
Filtro de Mangas I4.3	180	6	55,44
Filtro de Mangas I3.4	28	6	21,60
Total de consumo de ar comprimido dos 9 Filtros (considerando o fator de segurança de 40% e o incremento de 10% para as fugas de ar)			233,64

Integrando a informação recolhida nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, procede-se ao cálculo do diâmetro mínimo interno da tubagem, à seleção dos equipamentos da central de produção e componentes da rede.

4.2 Tipologia da Rede

A tipologia da rede de ar comprimido está representada nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. O traçado apresenta as tubagens de distribuição e de serviço da instalação, todos os pontos de consumo e os acessórios constituintes.

O ponto de origem da rede é a sala de compressores, a partir da qual se ramifica para atender às diferentes necessidades das diversas áreas de utilização. No nível do Piso 0, são identificados quatro Filtros de Depoeiramento. No Piso 1, são destacados quatro Aplicadores de Sacos e quatro Ensacadoras. No Piso 2, são apresentados dois Filtros de Depoeiramento, enquanto no Piso 3 são visíveis três Filtros de Depoeiramento, conforme ilustrado na Figura 4.2.

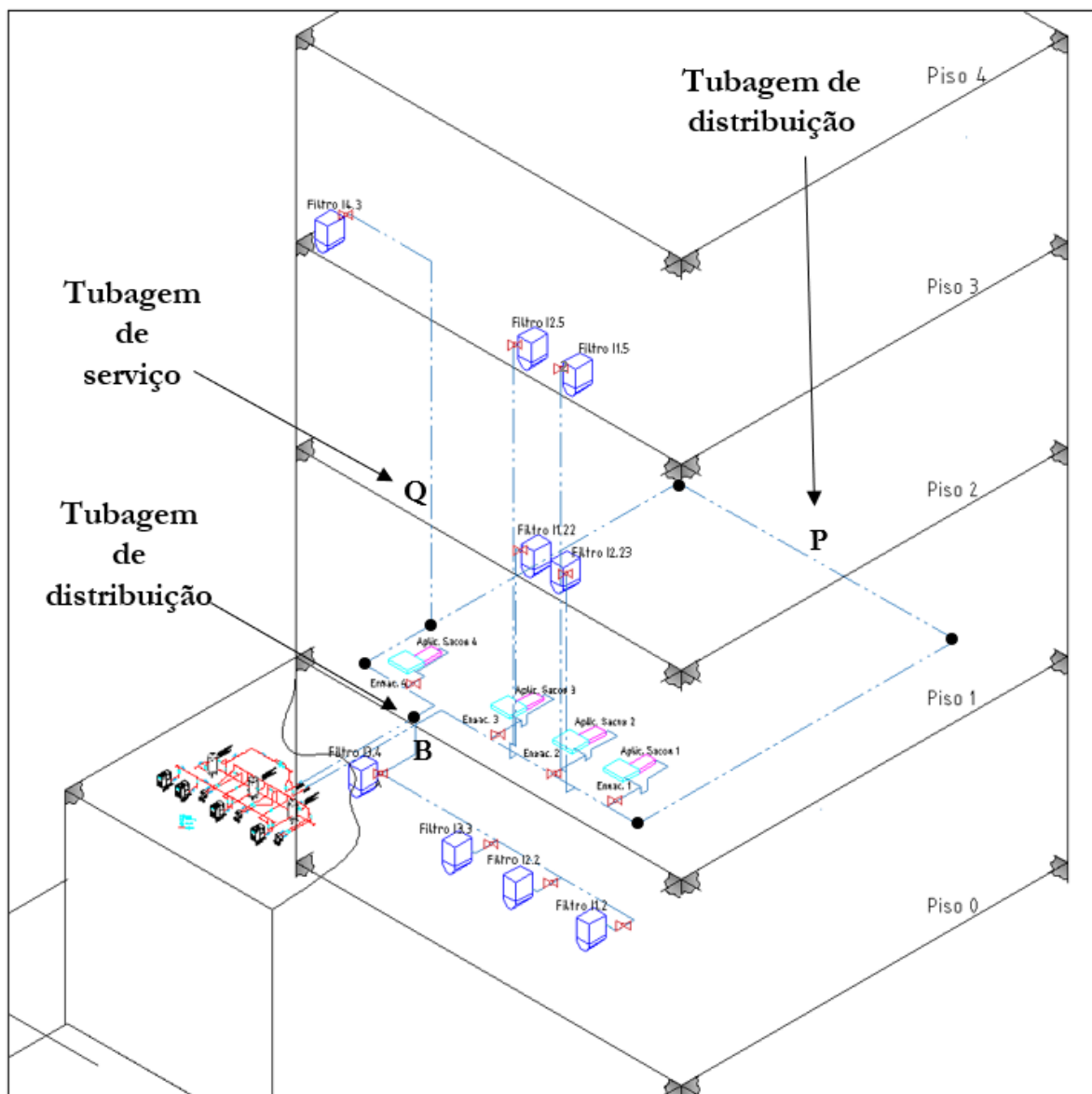


Figura 4.2 - Representação total da Rede de Distribuição

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

A tipologia da rede é de circuito fechado (Piso 1) e, a partir deste piso, derivam as tubagens de serviço que irão suprir 4 Ensacadoras, 4 Aplicadores de Sacos e 5 Filtros de Despoeiramento.

A Figura 4.3 ilustra, em pormenor, os Filtros de Despoeiramento I3.4, I3.3, I2.2 e I1.2, a tubagem de distribuição (B) e as tubagens de serviço (C, D, E, F).

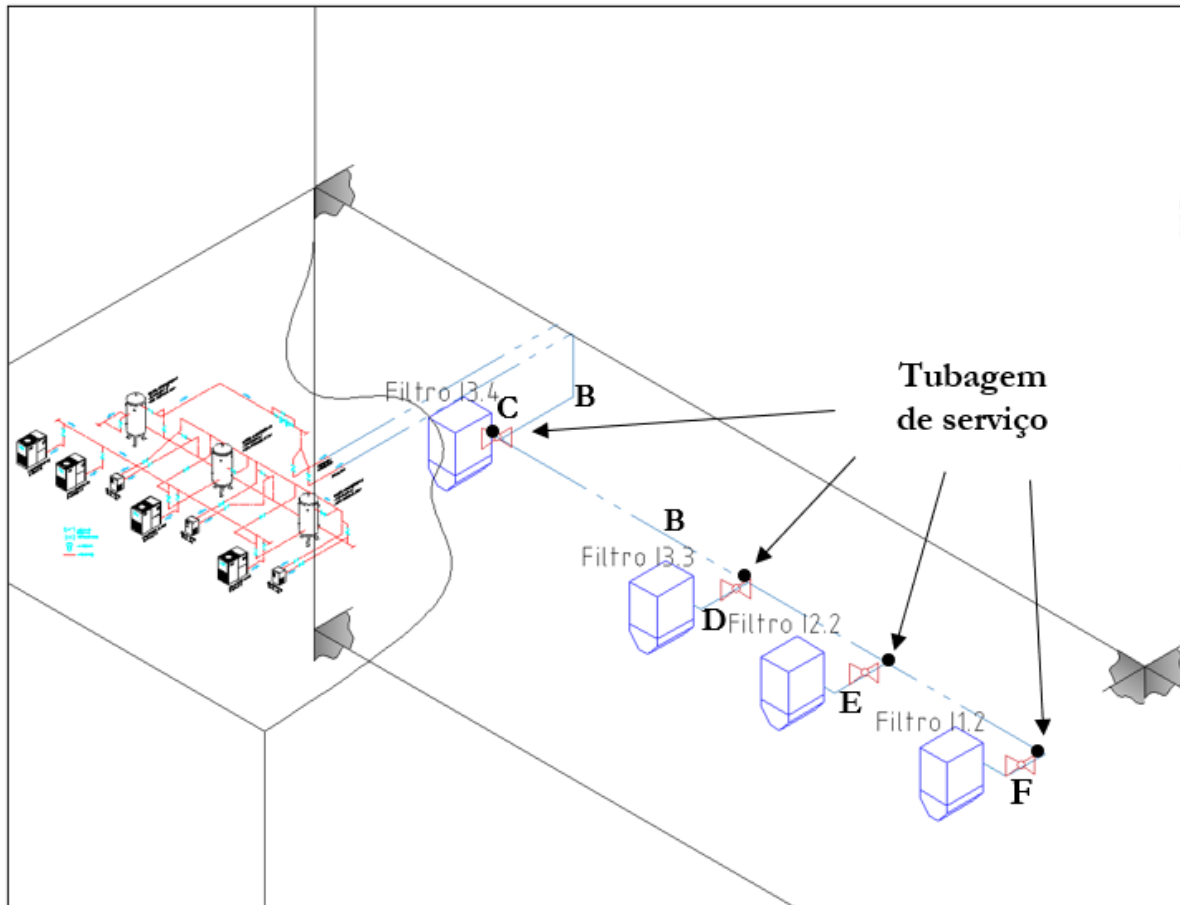


Figura 4.3 - Representação pormenorizada do Piso 0

A Figura 4.4 expõe, em pormenor, as 4 Ensacadoras e respetivos Aplicadores de Sacos, e as tubagens de serviço (G, H, I, J, L, M, N, O).

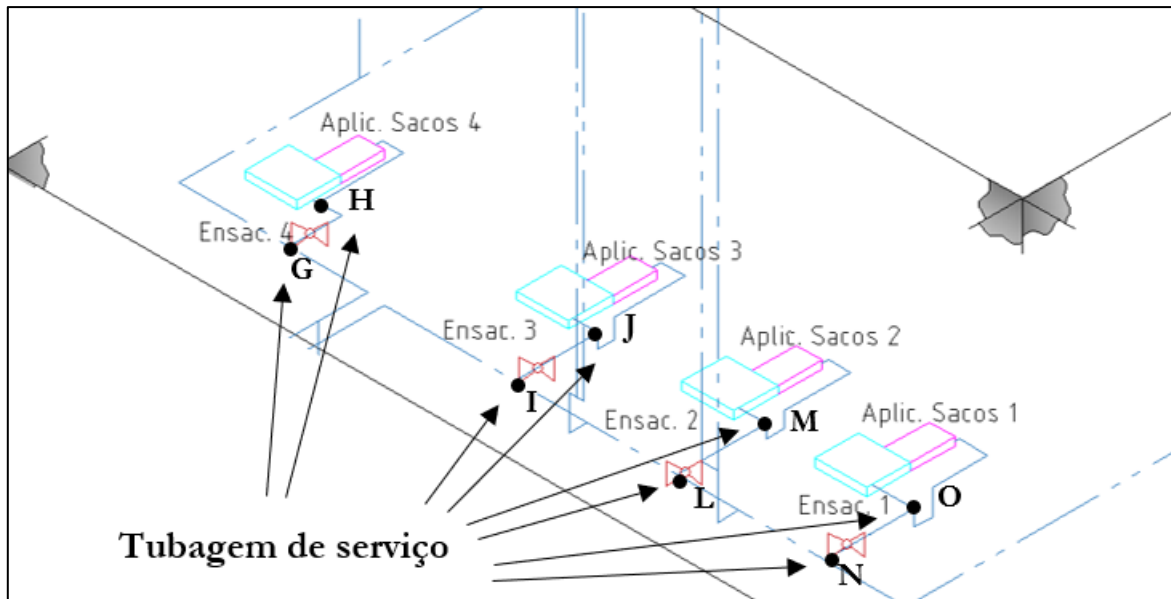


Figura 4.4 - Representação pormenorizada do Piso 1

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

A Figura 4.5 representa, em pormenor, os Filtros de Despoejamento I2.5, I1.5, I1.22 e I2.23 e as tubagens de serviço (S, R, T, U).

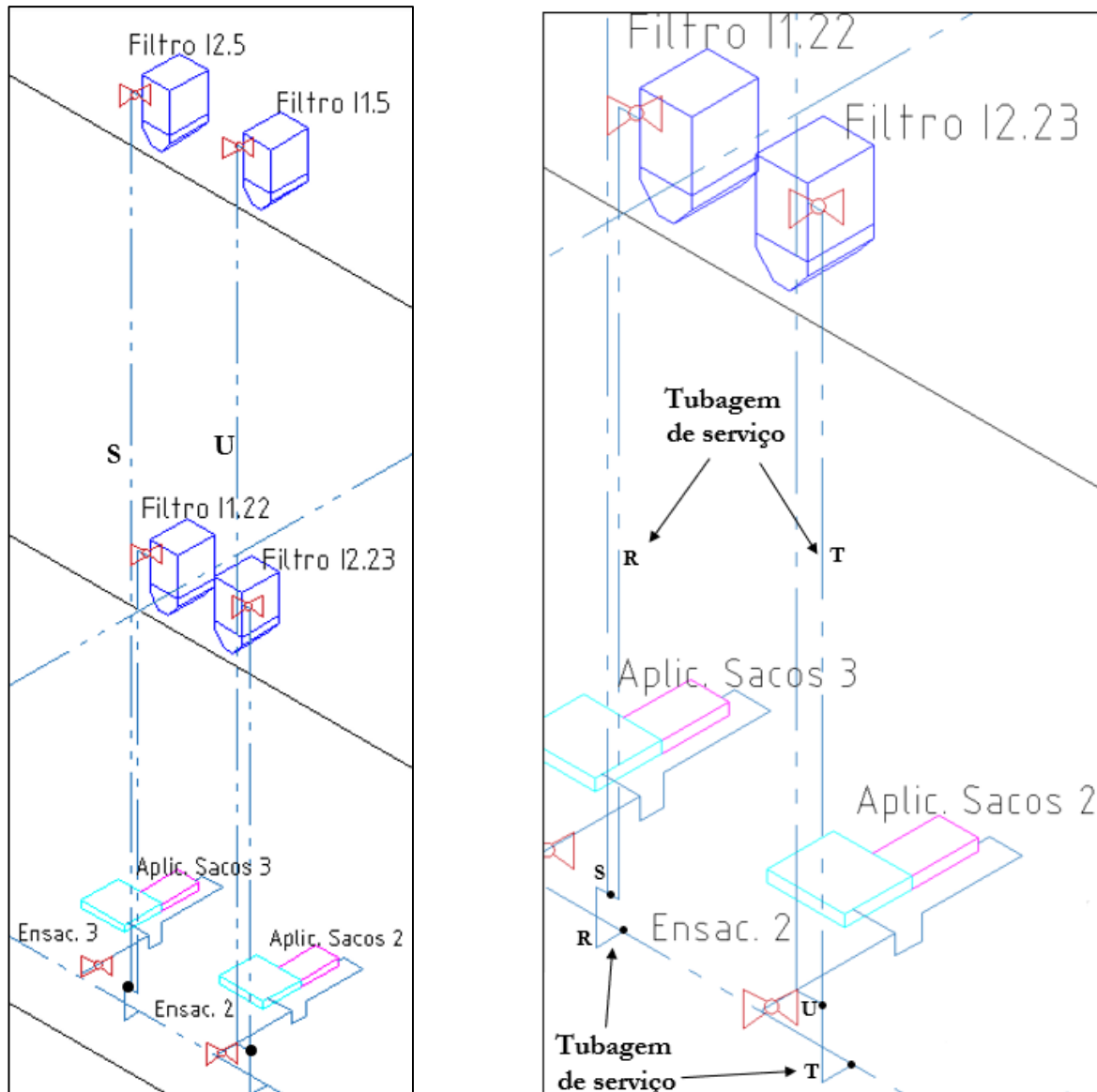


Figura 4.5 – Representação pormenorizada dos Pisos 2 e 3

Este projeto contempla um total de 13 válvulas de Macho-Esférico. O objetivo principal destas válvulas é garantir o fluxo de ar com a menor perda de carga possível, isolar secções específicas da rede quando necessário, facilitando a manutenção dos equipamentos. Quatro são posicionadas nas tubagens de serviço G, I, L, N, permitindo o isolamento de cada Ensacadora (e respetivo Aplicador), o que facilita a manutenção desses equipamentos sem interromper o fornecimento de ar para a restante aplicação.

Considerando que 80% do tempo apenas operam 2 Ensacadoras (e respetivos Aplicadores) encerrando o fluxo de ar que irá para as outras duas Ensacadoras, evitam-se perdas de ar associadas a possíveis fugas de ar e a perdas de carga inerentes à rede.

Nove válvulas são posicionadas nas tubagens de serviço Q, R, S, T, U, C, D, E e F, uma vez que estas tubagens sustentam os Filtros de Despoeiramento da instalação e estes carecem de tarefas de manutenção periódicas.

As válvulas de Diafragma e Globo foram substituídas por válvulas de Macho-Esférico pois estas últimas são, de facto, as válvulas indicadas para as redes de ar comprimido, uma vez que atuam como válvulas de corte (bloqueio), isto é, estabelecem (abrem) ou interrompem (fecham) um dado fluxo sob pressão. Embora possam abrir ou fechar lentamente, de modo a evitar alterações bruscas de pressão na rede onde estão instaladas, são indicadas para posições de: totalmente abertas ou totalmente fechadas. Além disso, permitem uma trajetória do Ar comprimido em linha reta, o que origina uma diminuta perda de carga [17].

4.3 Dimensão Nominal das Tubagens

A Dimensão Nominal (DN) é uma nomenclatura padronizada que permite simplificar o processo de seleção e especificação de componentes, tais como tubagens e acessórios. Após a definição do tipo de material a ser utilizado, procede-se à escolha da norma apropriada que estabelece as respetivas Dimensões Nominais.

4.3.1 Seleção do Material das Tubagens

A determinação do material mais apropriado para o presente projeto foi fundamentada na análise da tabela apresentada no Anexo B, publicada na obra da Atlas Copco. Esta tabela compara as características dos materiais, incluindo o policloreto de vinil (PVC), ferro preto, aço galvanizado, aço carbono, cobre, aço inoxidável e alumínio.

Após avaliação, concluiu-se que o aço inoxidável e o alumínio são os materiais que exibem as características mais vantajosas. Dado que as tubagens de ar comprimido serão instaladas em ambiente industrial, especificamente numa cimenteira, é imperativo selecionar um material capaz de resistir a ambientes corrosivos e condições operacionais adversas [46].

Contactou-se alguns fornecedores de tubagens e acessórios para redes de ar comprimido e estes indicaram que atualmente o alumínio é o material padrão utilizado na indústria, sendo o aço inoxidável mais indicado para ambientes de produção mais minuciosa, nomeadamente, o farmacêutico e alimentar.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

As tubagens de alumínio do fornecedor AIRnet tornou-se padrão na indústria por ser anticorrosivo, leve e fácil de manusear. Todas as tubagens são submetidas a um tratamento de cromato-fosfato, garantindo excelente resistência contra a corrosão.

O material utilizado para o projeto foi o alumínio EN AW-6060 T6, de acordo com a Norma EN 755-2 que especifica os requisitos técnicos para as tubagens de alumínio. As dimensões nominais das tubagens [critérios de especificação dimensional DN (NPS)] são: 20 (¾”), 25 (1”), 40 (1 ½”), 50 (2”), 63 (2 ½”), 80 (3”), 100 (4”) e 158 (6”) mm [47] (Anexo C).

4.3.2 Diâmetro Interno das Tubagens

O cálculo do diâmetro interno das tubagens de ar ilustradas nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 é determinado a partir da equação 4.3.

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q^{1,85} \times L}{\Delta P \times P}} \quad (4.3)$$

ΔP - Queda de pressão [bar]

Q - Caudal [m³/h]

L - Comprimento total da tubagem [m]

d - Diâmetro interno da tubagem [mm]

P - Pressão absoluta inicial [bar]

A pressão (P) que irá ser utilizada nos cálculos seguintes é de 6 bar, pois é a pressão máxima dos equipamentos.

A perda de Carga (ΔP) máxima admissível irá depender dos diferentes tipos de tubagem (tubagem de serviço, de distribuição ou de elevação), como representado na Figura 4.6 [10].

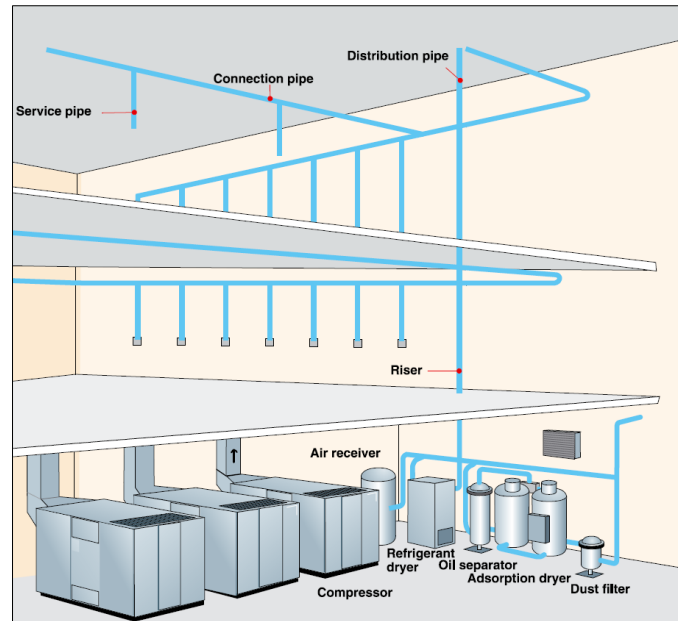


Figura 4.6 - Classificação das tubagens da Rede de Ar comprimido [10]

- *Service pipe* (tubagem de serviço): 0,03 bar
- *Distribution pipes* (tubagem de distribuição): 0,05 bar
- *Across risers* (tubagem de elevação): 0,02 bar

O comprimento total da rede de distribuição (L) é calculado em função do seu comprimento linear ($L1$) acrescido dos comprimentos equivalentes de todos os acessórios ($L2$).

Consideram-se como acessórios, todos os elementos de ligação da rede, nomeadamente, curvas, tês, registos, entre outros, necessários para a distribuição do ar ao longo de toda a instalação industrial. Estes estrangulamentos devem ser convertidos em comprimentos equivalentes ($L2$), de acordo com a tabela do Anexo D.

A fórmula a partir da qual se obtém o comprimento total das tubagens (L) é determinada a partir da equação 4.4 [14].

$$L = L1 + L2 \quad (4.4)$$

L - Comprimento total da rede[m]

$L1$ - Comprimento retilíneo da rede [m]

$L2$ - Comprimento equivalente (pontos de estrangulamento/acessórios) [m]

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

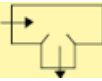


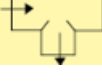
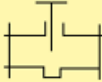

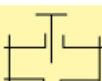


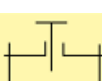


Na Tabela 4.4 estão calculados os diâmetros internos das tubagens da Rede, considerando apenas o comprimento linear da rede (L1).

Tabela 4.4 – Cálculo do diâmetro interno das tubagens, a partir do L1

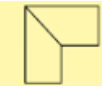
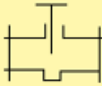
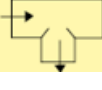

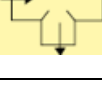
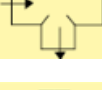


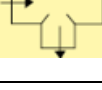
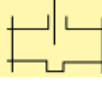
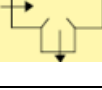

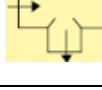

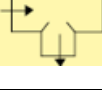
Tipo de tubagem	Tubagem	Caudal requerido, Q [m ³ /h]	Comprimento da tubagem, L1 [m]	Diâmetro interno [mm]	Dimensão Nominal
Distribuição Perda de carga = 0,05 bar	B	75,96	22,65	32,77	1 ½"
	P	285,26	60,00	64,96	3"
Serviço Perda de carga = 0,03 bar	C	21,60	3,20	15,41	¾"
	D	23,40	5,70	17,81	¾"
	E	15,48	5,70	15,29	¾"
	F	15,48	5,70	15,29	¾"
	G	31,89	3,0	17,57	¾"
	H	25,38	2,30	15,31	¾"
	I	31,89	3,0	17,57	¾"
	J	25,38	2,30	15,31	¾"
	L	31,89	3,0	17,57	¾"
	M	25,38	2,30	15,31	¾"
	N	31,89	3,0	17,57	¾"
	O	25,38	2,30	15,31	¾"
	Q	55,44	19,5	31,35	1 ½"
	R	51,12	7	24,78	1"
	S	27,72	13,0	22,37	1"
	T	51,12	13,0	28,05	1 ½"
U	23,40	7,95	19,04	¾"	

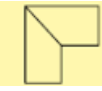
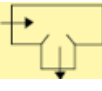

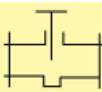
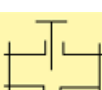

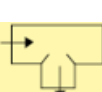





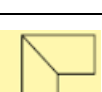

Na Tabela 4.5 estão calculados os comprimentos equivalentes das tubagens (L2), tendo por base os diâmetros internos determinados na Tabela 4.4. Nos casos em que os pontos de estrangulamento são comuns a mais do que uma tubagem, este é contabilizado no lado da tubagem que apresenta uma maior velocidade do ar, e conseqüente maior perda de carga (Anexo M).

Tabela 4.5 – Cálculo do Comprimento equivalente, L2

Tipo de Tubagem	Tubagem	Diâmetro interno [mm]	Pontos de estrangulamento	Comprimento equivalente, L2 [m]
Distribuição Perda de carga = 0,05 bar	B	32,77	1 x  2x 	7,2
	P	64,96	4 x  2 x 	27,6
Serviço Perda de carga = 0,03 bar	C	15,41	1 x 	5
	D	17,81	1 x  1 x  1 x 	8
	E	15,29	1 x  1 x 	6,5
	F	15,29	1 x  1 x 	6,5

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Tipo de Tubagem	Tubagem	Diâmetro interno [mm]	Pontos de estrangulamento	Comprimento equivalente, L2 [m]
	G	17,57	1 x  1 x  1 x 	8
	H	15,31	2 x  1 x 	4,5
	I	17,57	1 x  1 X 	6,5
	J	15,31	5 x  1 x 	9
	L	17,57	1 X  1 x 	6,5
	M	15,31	5 x  1 x 	9
	N	17,57	1 X  1 x 	5

Tipo de Tubagem	Tubagem	Diâmetro interno [mm]	Pontos de estrangulamento	Comprimento equivalente, L2 [m]
	O	15,31	5 x  1 x 	9
	Q	31,35	2 x  1 x 	12,8
	R	24,78	1 x  4 x  2 x 	14
	S	22,37	1 x  1 x 	6,5
	T	28,05	2 x  1 x  1 x 	15,2
	U	19,04	2 x  1 x 	8

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Após o cálculo do comprimento total da tubagem (L), determina-se o diâmetro interno das tubagens, o qual está relacionado com a Dimensão Nominal.

Tabela 4.6 - Cálculo da Dimensão Nominal das tubagens

Tipo de tubagem	Tubagem	Caudal requerido, Q	Comprimento da tubagem, L=L1+L2	Diâmetro interno	Dimensão Nominal
		[m ³ /h]	[m]	[mm]	
Distribuição Perda de carga = 0,05 bar	B	75,96	29,85	34,63	1 ½"
	P	285,26	87,6	70,07	3"
Serviço Perda de carga = 0,03 bar	C	21,60	8,20	18,60	¾"
	D	23,40	13,70	21,22	1"
	E	15,48	12,20	17,80	¾"
	F	15,48	12,20	17,80	¾"
	G	31,89	11	22,78	1"
	H	25,38	6,80	19,02	¾"
	I	31,89	9,50	22,12	1"
	J	25,38	11,30	21,05	1"
	L	31,89	9,5	22,12	1"
	M	25,38	11,3	21,05	1"
	N	31,89	8,0	21,38	1"
	O	25,38	11,30	21,05	1"
	Q	55,44	32,30	34,68	1 ½"
	R	51,12	21	30,65	1 ½"
	S	27,72	19,5	24,26	1"
	T	51,12	28,2	32,75	1 ½"
U	23,40	15,95	21,89	1"	

Considerando ambas as tabelas 4.4 e 4.6, conclui-se que com o acréscimo dos acessórios, o comprimento total de cada troço de tubagem aumentou. Consequentemente, o diâmetro interno de cada tubagem também aumentou. O Anexo E tem um exemplo de como determinar o diâmetro interno da tubagem B.

4.4 Compressor

Segundo [14], depois de se determinar o caudal de ar necessário para o funcionamento da instalação com os devidos fatores de fugas de ar e de possível ampliação da rede, o caudal deve ser dividido a metade e, com base nesta divisão, devem-se selecionar dois compressores que somados satisfaçam o caudal da rede.

A pressão de trabalho máxima dos compressores não deve ser inferior a 7,5 bar, uma vez que o conjunto dos filtros, secadores e tubagens não deve exceder 1,5 bar [10] e a pressão máxima dos equipamentos é de 6 bar, como anteriormente referenciado.

Considerando o cenário em que todos os equipamentos operam simultaneamente, ou seja, 4 Ensacadoras, 4 Aplicadores e 9 Filtros de Despoeiramento, o caudal total necessário para atender às necessidades é de 361,22 m³/h (ou seja, 100,24 l/s).

Dado que o edifício da Ensacagem opera 5 dias com 80% do tempo em que operam 2 Ensacadoras (e seus respetivos Aplicadores) e 20% do tempo em que operam as 4 Ensacadoras (e seus respetivos Aplicadores), para este projeto serão selecionados 3 compressores. Destes, apenas dois irão atuar em simultâneo para atender à necessidade regular de ar, enquanto o terceiro compressor funciona como reserva, pronto para assumir as operações em caso de necessidade ou falha de um dos compressores principais.

O Anexo F representa um gráfico que permite selecionar um compressor, a partir do caudal e da pressão da instalação. Deste modo, considerando o caudal de 50,12 l/s (metade de 100,24 l/s) e a pressão de operação de 7,5 bar, o compressor indicado é o “Compressor Rotativo” [14].

Para este projeto, irão ser selecionados 3 compressores de Parafuso Rotativo lubrificados a óleo por apresentarem um custo inicial inferior aos compressores de Parafuso Rotativo isentos de óleo e por não afetar a qualidade do ar e, conseqüentemente, o processo.

Os três compressores terão a mesma capacidade, pois o objetivo é distribuir equitativamente as horas de funcionamento, minimizando assim o desgaste dos equipamentos, e conseqüentemente, as intervenções de manutenção.

Ter um compressor de reserva idêntico reduz o risco de interrupção no fornecimento de ar comprimido, garantindo a continuidade das operações da instalação mesmo no caso de falha de um dos compressores.

Por outro lado, se apenas fosse considerado um compressor de maior capacidade para suprimir as necessidades da instalação em vez de dois compressores, não seria energeticamente eficiente. Isso ocorreria porque o compressor estaria dimensionado para o caudal máximo de ar necessário na instalação. Como resultado, durante 80% do tempo, o compressor estaria a produzir um caudal muito abaixo de sua capacidade nominal, o que não seria eficiente em termos energéticos.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Relativamente ao sistema de controlo do compressor, os 2 compressores principais serão de velocidade-variável, enquanto o compressor de reserva será carga-vazio. Este requer um investimento inicial bastante inferior quando comparado ao compressor de velocidade variável e será utilizado apenas para o caso de um dos dois compressores principais falhar ou precisar de manutenção. Caso se dê esta situação, este compressor de carga-vazio tem de, juntamente com outro compressor, conseguir sustentar toda a instalação.

Optou-se por um controlo de velocidade variável para os dois compressores principais, porque em termos de eficiência energética são mais eficientes do que os de carga-vazio, pois consomem apenas a energia necessária para fornecer a quantidade requerida e mantêm uma pressão mais estável na linha de ar comprimido, reduzindo as flutuações indesejáveis.

Os compressores selecionados são os seguintes:

- 2 unidades: GA30 VSD (Velocidade Variável)
- 1 unidade: GA18(Carga-Vazio)

O compressor GA 30 VSD (Anexo G), para a pressão de 7 bar, apresenta um caudal mínimo de 13,06 l/s e um caudal máximo de 97,43 l/s. Assim, o caudal nominal é de 55,25 l/s, o que segundo o Anexo E, é o compressor mais indicado uma vez que o caudal que cada compressor de velocidade variável terá de sustentar é no máximo de 50,12 l/s.

O compressor GA 18 (Anexo H), para a pressão de 7 bar, apresenta um caudal de 59,6 l/s, o que, de acordo com o Anexo F, corresponde ao valor mais indicado, por ser o valor imediatamente superior a 50,12 l/s.

Além disso, um compressor de velocidade variável é uma opção energeticamente eficiente quando opera numa faixa de 40 a 85% da sua carga. Fora deste intervalo, nos extremos da curva ótima de funcionamento do compressor (Anexo I), ocorre uma queda na eficiência [26]. Portanto, é crucial que o caudal nominal dos compressores selecionados seja o mais próximo possível da realidade da instalação, de forma a tirar o maior proveito do controlo por velocidade variável.

Os compressores instalados na central de produção de ar comprimido atual foram dimensionados para sustentar um número de equipamentos superior aos referenciados neste projeto, pelo que as características técnicas são previsivelmente distintas. De ressaltar a diferença do sistema de controlo, em que atualmente existem 4 compressores de carga-vazio, e o novo projeto terá 2 compressores de velocidade variável e 1 de carga vazio.

A nível económico, poder-se-ia optar por manter o compressor GA 55+ API625246 que tem cerca de 6 anos de operação no lugar do compressor de reserva. Esta máquina, à pressão de serviço de 7 bar, apresenta o caudal correspondente de 184 l/s (11,1 m³/min) e a potência instalada de 55 kW.

Apesar de esta caudal ser o dobro do caudal necessário, ou seja, estar sobredimensionado para as necessidades, poderá ser utilizado como compressor de reserva, uma vez que o objetivo é utilizar este compressor apenas quando um dos principais não estiver disponível.

Por outro lado, na impossibilidade de substituir os compressores existentes e se fosse opção reutilizá-los, alterando apenas a rede, uma opção a considerar seria instalar um “sistema Maestro” que permitisse gerenciar a atividade dos atuais compressores, minimizando os tempos em vazio dos mesmos.

4.5 Secador

Relativamente aos secadores, estes serão integrados (Figura 4.7) nos compressores do novo projeto, proporcionando vantagens significativas em comparação com os compressores-padrão desprovidos desses recursos. Estas vantagens incluem uma maior qualidade do ar comprimido, onde o secador integrado remove eficientemente a humidade do ar, assegurando um suprimento consistente de ar seco e limpo [48].

Além disso, observa-se uma redução da necessidade de manutenção, uma vez que há menos componentes separados para instalar e manter, diminuindo assim a necessidade de intervenções frequentes e simplificando as operações de rotina. Adicionalmente, esta integração contribui para a economia de espaço, proporcionando proteção aos equipamentos e ferramentas, visto que a remoção de contaminantes do ar comprimido ajuda a proteger equipamentos e ferramentas pneumáticas contra danos e desgaste prematuro, prolongando a sua vida útil e reduzindo os custos associados à manutenção e substituição. Adicionalmente, os secadores integrados podem auxiliar na redução do consumo de energia, garantindo que o ar comprimido esteja devidamente seco, o que é crucial para sistemas que exigem ar comprimido seco para operar de forma eficiente [48].



Figura 4.7 – Compressor com Secador integrado

4.6 Separador de Água/Óleo

O separador de água/óleo foi selecionado conforme o Anexo J é o OCS 95, o qual apresenta um caudal imediatamente superior ao caudal total da instalação. É importante salientar que os condensados gerados pelos compressores com injeção de óleo contêm vestígios de óleo, representando assim um risco ambiental que requer tratamento adequado antes da eliminação [49].

As soluções de gestão de condensados da Atlas Copco permitem a separação eficaz do óleo da água, permitindo a eliminação segura da água limpa no sistema de esgotos [49].



Figura 4.8 – Separador água/óleo [28]

4.7 Filtro

Relativamente aos filtros, foram selecionadas 2 unidades UD⁺ 110 (Anexo L). Os filtros UD⁺ inovadores da Atlas Copco combinam duas etapas de filtragem numa só, o que permite reduzir a perda de carga em 40% e, ao mesmo tempo, cumprir os mais elevados requisitos de qualidade. Permitem reduzir em 50% os custos de instalação e de espaço, reduzir os custos de manutenção [50].



Figura 4.9 – Filtro UD⁺ [50]

4.8 Orçamentação

A Tabela 4.7 representa os custos dos equipamentos e da instalação e montagem da rede de Ar comprimido, de acordo com o contacto estabelecido com a empresa Atlas Copco.

Tabela 4.7 – Orçamentação do Projeto

Descrição	Quantidade	Preço unitário (€)	Total (€)
Compressor e Secador integrado GA30 VSD	2	25 500,00	51 000,00
DRYER BYPASS	2	625,00	1 250,00
Filtro UD110+	2	925,00	1 850,00
Separador de condensados OSC 95	1	850,00	850,00
Compressor e Secador integrado GA18	1	12 000,00	12 000,00
Fornecimento e montagem da rede em alumínio			17 365,00
Total		84 315,00	

O valor da instalação e montagem de uma rede completamente nova de alumínio é de 17 365 €.

Como referenciado anteriormente, o valor de caudal teórico requerido pela instalação é de 100,24 l/s. Como mencionado na secção de capítulo 1.1, em casos mais extremos, as fugas de ar podem registar valores entre 30 a 40%. Considerando o valor de 35% para as fugas de ar, tem-se que 35 l/s correspondem a fugas de ar e 65 l/s corresponde ao caudal necessário dos consumidores.

Para o caudal de 35 l/s a 7 bar corresponde a potência de 11kW.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Considerando que as horas de operação dos compressores são 6240 horas por ano, tem-se que:

$$\begin{aligned} 11 \text{ kW} &= 1 \text{ hora} \\ x &= 6240 \text{ horas} \\ x &= 68640 \text{ kW/ano} \end{aligned}$$

Considerando o preço de eletricidade de 0,16 €/kWh:

$$68\ 640 \text{ kW} \times 0,16 \text{ €/kWh} = 10\ 982,4 \text{ € em fugas de ar comprimido/ ano}$$

Assim, $17\ 365 / 10\ 982,4 = 1,58$ anos

Isto significa que o retorno de investimento da nova rede de Ar comprimido é de aproximadamente 2 anos. Relativamente às emissões de CO₂, consegue-se evitar a emissão de 18,12 ton/MWh.

5 MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA IDENTIFICAÇÃO DAS FUGAS

Face à informação exposta na secção de capítulo 3.1.4, relativa aos resultados obtidos na identificação e caracterização das fugas de ar comprimido na área da Embalagem e Expedição, este capítulo tem como principal objetivo elucidar sobre a aplicação da Manutenção Preventiva como uma estratégia para promover a eficiência energética de uma rede de ar comprimido, essencialmente no que diz respeito à deteção e reparação de fugas de ar, utilizando o *software* SAP.

5.1 Gestão da Manutenção Industrial em SAP

A Gestão da Manutenção Industrial pode ser definida por um conjunto de atividades desenvolvidas que permitem orientar as atividades de manutenção, criando um padrão ótimo de prestação de serviço com os recursos existentes, atuando na causa dos problemas, antecipando-se às falhas [51]. As falhas têm um impacto significativo no desempenho dos equipamentos, afetando negativamente a sua fiabilidade e tornando-os impróprios para utilização, além de aumentarem os custos da sua manutenção e reduzirem a disponibilidade operacional de um equipamento.

No âmbito do serviço de Manutenção, enquadrado no Centro de Produção de Souselas, utiliza-se o *software* de Gestão SAP PM (*Plant Maintenance*). Este *software* de gestão combina todos os aspetos técnicos e tarefas de gestão realizadas durante o ciclo de vida de um equipamento, para mantê-lo operacional ou para devolvê-lo à condição pretendida. As Notas de Manutenção e as Ordens de Trabalho são duas ferramentas muito utilizadas no SAP.

As Notas de Manutenção fornecem informações valiosas para otimizar os processos de manutenção e custos associados. Podem ser designadas de M1, M2, M3, M4 e M5.

M1 - surgem de emergências identificadas

M2 - surgem de uma observação espontânea e não planeada, ou seja, que foram identificadas durante a ronda habitual do trabalhador

M3 - são identificadas devido a ordens de trabalho planeadas

M4 - são notas de segurança, ou seja, que informam uma necessidade de reparação ou instalação devido a um risco identificado de segurança ou meio ambiente.

M5 - são notas de Melhoria que surgem para propor melhorias.

As Ordens de Trabalho, também designadas de Ordens de Manutenção são uma ferramenta de gestão de manutenção que pode surgir de Notas de Manutenção. Permitem solicitar, planear, programar atividades de manutenção em equipamentos.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

As classes de Ordens existentes são:

OEME - Ordem de Emergência: ordem criada quando um trabalho deve ser executado de imediato devido à sua urgência.

OCOR - Ordem Corretiva: ordem que provém das notas de manutenção do tipo M2.

OPRM - Ordem programada anual: ordem criada tendo por finalidade identificar falhas conhecidas dos equipamentos, ou seja, é uma avaliação à condição.

OPRP - Ordem programada planeada: ordem que é previamente definida no sistema e que obedece a uma certa periodicidade.

OIMP - Ordem de Melhoria: ordem que surge a partir de observações ou falhas repetitivas nos equipamentos.

OREF - Ordem de renovação: surge pela necessidade de reparar um material ou equipamento que foi substituído por outro na linha de produção.

As Ordens são essenciais para organizar e controlar as atividades de manutenção, garantindo que os trabalhos sejam realizados de forma eficiente, segura e dentro dos prazos estabelecidos. Além disso, as ordens de trabalho também são importantes para registar o histórico de manutenção de cada equipamento, facilitando a análise de falhas, o planejamento de manutenção preventiva e preditiva, e a tomada de decisões estratégicas relacionadas à gestão de ativos.

Em termos específicos da gestão de uma rede de ar comprimido, o SAP pode ser utilizado para monitorizar e otimizar o desempenho dos equipamentos, como detetar fugas de ar, agendar manutenções preventivas, gerir inventários de peças sobressalentes, entre outras funcionalidades relacionadas à eficiência energética e gestão de ativos.

5.1.1 Plano de Manutenção

A Manutenção Planeada Preventiva é um tipo de manutenção que tem por objetivo intervir no ciclo de vida de um equipamento, de modo a prevenir avarias irreversíveis, custos associados à reparação dos equipamentos e/ ou ao processo de fabrico. Assim, desempenha um papel crucial no aumento da durabilidade dos equipamentos, na redução do tempo de inatividade não planeado e, em última análise, na diminuição dos custos de manutenção a longo prazo. Pode ter um carácter sistemático (em função do tempo ou consumo) ou condicionado (em função do estado de condição de um equipamento avaliado através da análise de vibrações, termografia, medição de ruído). [52]

Um Plano de Manutenção é desenvolvido com base nas necessidades específicas de manutenção de cada ativo e inclui: identificação de todos os equipamentos ou ativos que requerem manutenção; determinação da periodicidade com que as atividades de manutenção devem ser realizadas; descrição detalhada das atividades que devem ser realizadas durante a manutenção; identificação dos recursos humanos, materiais, ferramentas e equipamentos necessários para a execução das atividades de manutenção; definição do cronograma para a realização das atividades de manutenção, levando em consideração a disponibilidade de recursos e a prioridade de cada equipamento. [53]

A Figura 5.1 tem representado os Planos de Manutenção de toda a fábrica, de Baixa Frequência, ou seja, Planos que contemplam tarefas de manutenção que são lançadas no sistema para serem executadas apenas de 6 em 6 meses.



S...	Pln.manuten.	Texto plano manut.	Estrat
	P102MPR00002	Plano BF Etapa Alimentação forno 3	MS2L...
	P102MPR00005	Plano BF Etapa Linha forno 3	MS2L...
	P102MPR00008	Plano BF Etapa Mcarvão 2	MS2L...
	P102MPR00011	Plano BF Etapa Alimentação mcarvão 2	MS2L...
	P102MPR00013	Plano BF Etapa Transporte mcarvão2	MS2L...
	P102MPR00016	Plano BF Etapa Alimentação mcru 3	MS2L...
	P102MPR00018	Plano BF Etapa Linha mcru 3	MS2L...
	P102MPR00022	Plano BF Etapa Transporte mcru 3	MS2L...
	P102MPR00025	Plano BF Etapa Britagem 2	MS2L...
	P102MPR00030	Plano BF Etapa Transp. comum britagens	MS2L...
	P102MPR00033	Plano BF Etapa Transp. mat. brit 2	MS2L...
	P102MPR00035	Plano BF Etapa Circ. gas poeiras l3	MS2L...
	P102MPR00038	Plano BF Etapa Transporte forno 3	MS2L...
	P102MPR00041	Plano BF Transf. armazém	MS2L...
	P102MPR00043	Plano BF Transf. linha 3	MS2L...
	P102MPR00045	Plano BF Transf. Subestação	MS2L...
	P102MPR00047	Plano BF Transf. linha 2	MS2L...
	P102MPR00049	Plano BF Transf. linha 1	MS2L...
	P102MPR00051	Plano BF Transf. cimentos 1/2	MS2L...
	P102MPR00053	Plano BF Transf. cimentos 3/4	MS2L...

Figura 5.1 - Planos de Baixa Frequência

No âmbito do presente projeto, o que se propõe é criar um Plano de Manutenção direcionado para a identificação das fugas de ar comprimido, o qual designar-se-ia de “P102MPR00054 Plano BF Identificação das fugas de ar”.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

O primeiro passo seria criar a tarefa de manutenção pretendida “Identificar fugas de ar comprimido (Figura 5.2).

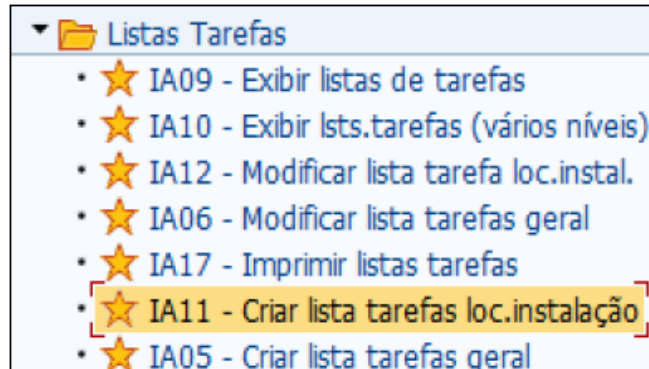


Figura 5.2 – Transação IA11 no SAP

A identificação das fugas de ar comprimido seria executada com o auxílio do Detetor ultrassónico, por 1 pessoa e pelo tempo estimado de 1 hora (Figura 5.3).

Síntese geral de operações												
Oper	Sb...	CenTrab	Cen.	Ctrl	Descrição operação	T.	Trab.	Un.	Ex.	Duração	Un.	C Pec
0010		EME_E&E	P102	PM01	Identificar Fugas de Ar Comprimido	<input type="checkbox"/>	1,0	H	1	1,0	H	2 100

Figura 5.3 - Exemplo da tarefa, número de executantes, duração no SAP

A pessoa a realizar esta tarefa deverá ser do Gabinete de Inspeção e Preparação do serviço de Manutenção do CPS. Cada Preparador de trabalho tem-lhe atribuído uma área respetiva da fábrica e, por isso, o responsável de cada zona deverá identificar as fugas com o aparelho.

A tarefa deverá ser executada de 6 em 6 meses (Figura 5.4).

Síntese operação pacotes manut.												
Op.	SOp	Descrição operação	1M	2M	3M	6M	1A	2A	3A	4A	5A	6A 12
0010		Identificar Fugas de Ar Comprimido	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 5.4 – Periodicidade de tarefas no SAP

A tarefa fica associado a um código “Grupo da Lista de Tarefas” que, por sua vez, fica associado ao item de manutenção (Figura 5.5) e transporta o utilizador para a janela da Figura 5.6.

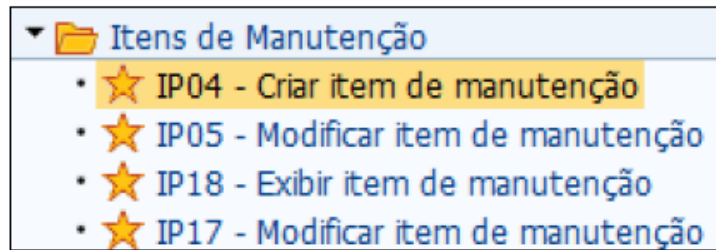


Figura 5.5 – Transação IP04 no SAP

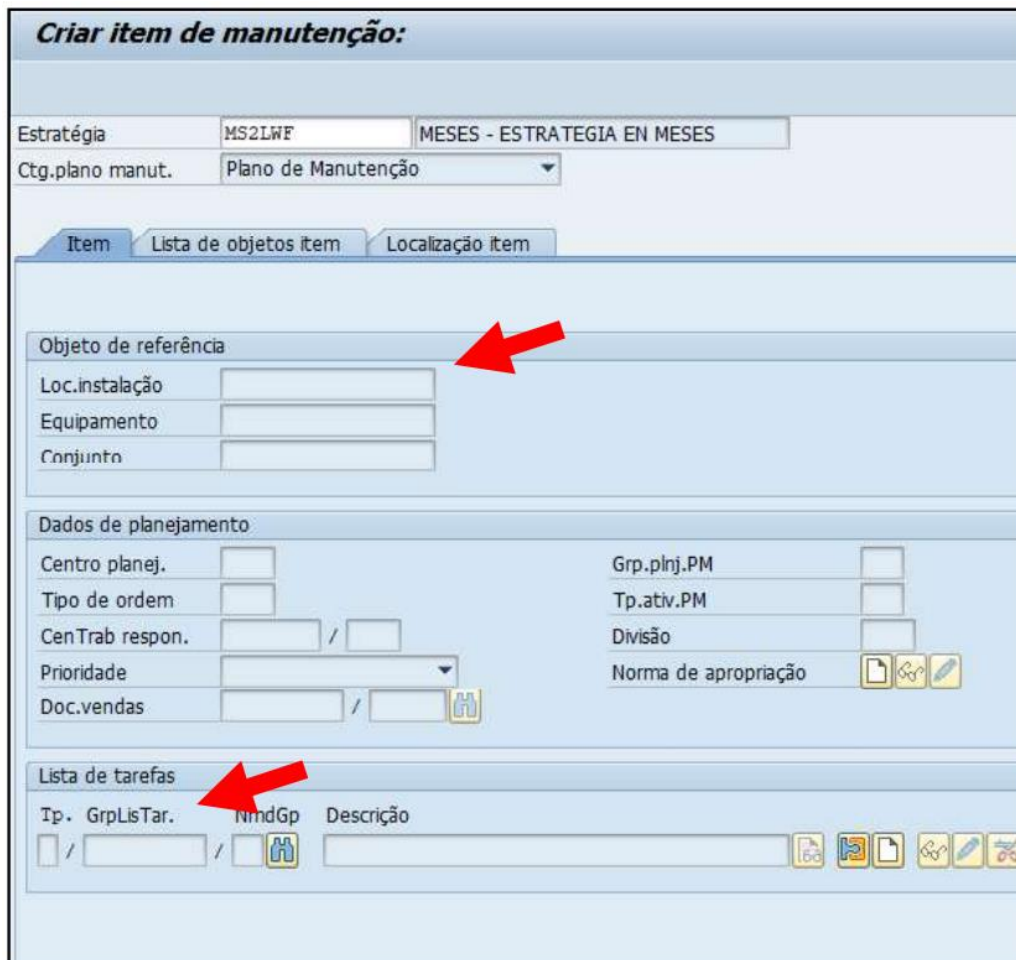


Figura 5.6 – Janela SAP

A última etapa consiste em atribuir o item de manutenção que, por sua vez tem associada a tarefa, ao Plano de Manutenção existente.

5.1.2 Sensibilização do Pessoal Técnico

Durante o estágio profissional, depois de analisados os dados referentes à identificação das fugas de ar comprimido, os mesmos foram apresentados ao pessoal técnico da fábrica, nomeadamente aos oficiais de conservação mecânica e elétrica e aos oficiais de fabricação. Estes profissionais assumem um papel muito importante no despiste das fugas de ar comprimido, porque lidam diretamente e diariamente com os equipamentos da fábrica. Do total de fugas identificadas, o valor de 33% era referente a tubagens e acessórios danificados ou mal apertados, sendo de fácil resolução no momento. Nesse seguimento, foi também pedido que, quando fosse detetada qualquer fuga, verificassem se a mesma poderia ser resolvida com um aperto manual; casos contrário, deveriam abrir no sistema SAP uma nota M2 (no caso dos oficiais de conservação) ou reportar nos Relatórios de turno (no caso dos oficiais de fabricação).

Por outro lado, foi possível sensibilizar os técnicos para o corte de ar comprimido das máquinas que não estão a ser usadas e que se encontram em carga, através das válvulas de seccionamento.

6 CONCLUSÃO

O presente projeto integrou-se no contexto de um estágio profissional realizado na empresa Cimpor, serviço de Manutenção, e teve como principal objetivo o dimensionamento de uma rede de ar comprimido, tendo por base uma determinada secção da fábrica, o edifício da Ensacagem. Optou-se por restringir o projeto apenas a uma área da instalação, devido à complexidade e extensão do Centro de Produção de Souselas, com a finalidade de servir de orientação e modelo para a restante fábrica.

Em suma, esta trabalho explorou os principais princípios envolvidos no dimensionamento eficiente de uma rede de ar comprimido. Ao longo da pesquisa, foram identificadas várias considerações-chave que são essenciais para assegurar a eficiência energética.

As fugas de ar e as perdas de carga são apontadas como as principais responsáveis pela ineficiência dos Sistemas de ar comprimido.

O acompanhamento realizado durante o estágio possibilitou eliminar 88% das fugas, o que equivaleu a um proveito de 17 288,74 €. Com as fugas não reparadas, que representam os restantes 12%, é ainda possível economizar 2 357,56 €. Até ao momento, foram gastos 6 054,46 € em material para reparar as fugas de ar comprimido. O trabalho desenvolvido permite que futuramente esta análise seja feita de 6 em 6 meses, através da implementação do detetor ultrassónico nas atividades dos colaboradores do Gabinete de Inspeção e Preparação, numa perspetiva de identificar as fugas audíveis e inaudíveis para serem posteriormente solucionadas. Além disso, foram sensibilizados os técnicos para a importância de reportar possíveis sinais que acelerem o aparecimento de fugas. A nível ambiental, com a eliminação de 100% das fugas identificadas, poupar-se-á 22,66 Ton/MWh de CO₂.

O comprimento equivalente nos cálculos do dimensionamento das tubagens é um fator que deve ser tido em conta, pois ele permite quantificar o impacto dos componentes na rede. Neste caso em concreto, depois de serem considerados todos os comprimentos equivalentes, 100% das tubagens aumentaram de diâmetro, sendo que 50 % tiveram um impacto mais significativo porque aumentaram a sua Dimensão Nominal.

Na possibilidade de se reaproveitarem os equipamentos existentes na central de produção de ar antiga para a nova rede de ar comprimido, alterando apenas a rede em si, obter-se-iam melhorias nas perdas de carga da instalação. Isto porque a tipologia em circuito fechado e material das tubagens seria nova e em alumínio, ao contrário do material que está atualmente instalado, em aço galvanizado. Deste modo, com menos incrustações, menos rugosidade, menos metros de tubo e maiores diâmetros, esperar-se-ia minimizar as perdas de carga da instalação.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

A nível económico, caso se preferisse instalar uma rede completamente nova em alumínio, o valor seria de 17 365 € (inclui a mão-de-obra), sendo que o retorno do investimento seria de, aproximadamente, 2 anos. A nível ambiental, poupar-se-ia a emissão de 18,12 ton/MWh de CO₂.

O presente projeto cumpre com o objetivo inicialmente definido do projeto: dimensionar uma rede de ar comprimido, sendo de salientar a viabilidade da sua implementação face ao reduzido período de retorno de investimento.

Por fim, a principal limitação deste estudo foi a dificuldade de comparação entre a instalação antiga e a instalação nova, tendo em conta que a primeira, relativamente à segunda, foi projetada para um número superior de equipamentos consumidores de ar.

No sentido de complementar o trabalho desenvolvido, há sugestões de trabalho futuro que podem ser implementadas. Entre estas sugestões, destacam-se:

- Comparar a Dimensão Nominal das tubagens com a aplicação de “curvas de raio longo” e “joelho”.
- Comparar os diâmetros da tubagem inicial com os diâmetros da tubagem da instalação nova.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Santos, “Caracterização e Otimização Energética de uma Unidade Fabril do Setor Automóvel,” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2017.
- [2] G. Makridou, K. Andriosopoulos, M. Doumpos e C. Zopounidis, “Measuring the efficiency of energy-intensive industries across European countries,” vol. 88, pp. 573-583, Janeiro 2016.
- [3] “Energia em Números | 2021,” [Online]. Available: https://www.ffms.pt/sites/default/files/2022-07/Energia_em_numeros_vfinal_1.pdf. [Acedido em 31 Agosto 2023].
- [4] R. Pinto, “Eficiência energética e exergética da indústria do cimento,” Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2018.
- [5] A. T. d. I. d. Cimento, “Indústria: Contributo para a Economia Circular,” [Online]. Available: <https://www.atc.pt/industria-economia-circular/>. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [6] A. P. d. Ambiente, “Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050,” [Online]. Available: <https://apambiente.pt/clima/roteiro-para-neutralidade-carbonica-2050>. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [7] J. R. T. d. Figueiredo, “Gestão de uma Rede de Ar Comprimido,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.
- [8] ADENE, “Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido,” 2014. [Online]. Available: https://www.erse.pt/media/wqvjvee2/mee_sistemasarcomprimido_aden_e_ppec2013-2014.pdf. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [9] A. Silva, “Otimização do Procedimento de Monitorização de Fugas e das Perdas de Carga do Sistema de Ar Comprimido,” Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga, 2020.
- [10] A. Copco, Compressed Air Manual 7th edition, Belgium: Atlas Copco Airpower NV, 2010.
- [11] Cimpor, “Quem somos,” 2023. [Online]. Available: <https://www.cimpor.com/>. [Acedido em Julho 2023].
- [12] Cimpor, “Porcesso de produção de cimento,” [Online]. Available: <https://www.cimpor.com/documents/20124/373571/PROCESSO+PRODUOTIVO+DE+CIMENTO+LEGENDADO.pdf/d28e9029-75db-8247-87bc-30cd299f6202?t=1645022206442>. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [13] P. Training, Dimensionamento de Redes de Ar Comprimido, Jacareí: Apostila M1004 BR, 2006.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

- [14] A. Santos e A. Silva, *Automação Pneumática: Produção, Tratamento e Distribuição de Ar Comprimido*, Porto: Pubblindústria, 2014.
- [15] A. M. A. D. Freitas, “Eficiência energética em sistemas de ar comprimido,” Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.
- [16] H. D. Olesko, “Uma proposta de eficiência energética para Sistemas de Ar Comprimido Industriais,” Monografia de Especialização, Departamento de Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [17] J. Novais, *Ar Comprimido Industrial: Produção, Tratamento e Distribuição*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1995.
- [18] L. J. S. Dias, “Estudo da Otimização da Produção de uma Central de Ar Comprimido de Baixa Pressão,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico do Porto, Porto, 2020.
- [19] E. AugustoJLN, “Compressores Industriais,” [Online]. Available: <https://engmecatonico.blogspot.com/2009/10/augusto.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [20] Ques10, “Draw neat diagram of root blower and explain its working,” [Online]. Available: <https://www.ques10.com/p/33134/draw-neat-diagram-of-root-blower-and-explain-its-1/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [21] “Compressores rotativos de palhetas deslizantes e deslizantes,” [Online]. Available: <https://www.ref-wiki.com/pt/content/view/31166/28/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [22] OMEL, “Como funciona uma Bomba de Vácuo de Anel Líquido,” [Online]. Available: <https://www.omel.com.br/artigos-tecnicos/escola-de-bombas/bombas-de-vacu-de-anel-liquido/como-funciona-uma-bomba-de-vacu-de-anel-liquido/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [23] SlidePlayer. [Online]. Available: <https://slideplayer.com.br/slide/1241963/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [24] A. Copco. [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/wiki/compressed-air-articles/tooth-compressors>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [25] “Compressor de Parafuso,” [Online]. Available: <https://www.mtibrasil.com.br/artigos/compressor-de-ar-parafuso-vs-pistao.php>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [26] P. F. d. L. Oliveira, “Análise da Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido de Baixa Pressão,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2018.

- [27] D. D. Ferreira, “Supervisão e controlo remoto da Iluminação e Ar,” Relatório de Projeto. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2019.
- [28] A. Copco, “Separador de óleo/água OSC 12-2500,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/condensate-treatment/osc-12-2500-oil-water-separator>.
- [29] J. P. S. C. Aniceto, “Optimização de unidades de secagem de ar por adsorção recorrendo a técnicas de planeamento de experiências,” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [30] A. C. Portugal, “Secadores de refrigeração industriais FX,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/air-dryers/refrigerant-air-dryers/fx-industrial>.
- [31] A. Copco, “Confiáveis Secadores de Ar por Adsorção,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/ad-bc-cd-series/AD-CD-BD-series-PTBR.pdf>.
- [32] “ARNOVO,” [Online]. Available: <https://arnovo.pt/secadores-ar-comprimido>.
- [33] A. Copco, “Secador de Membrana SD,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/products/air-dryers/membrane-dryers/sd>.
- [34] A. Copco, “Direct Industry,” [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/atlas-copco-compressors/product-5575-1797881.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [35] M. d. Economia, “Decreto-Lei nº 97/2000,” [Online]. Available: <https://dre.tretas.org/dre/114953/decreto-lei-97-2000-de-25-de-maio>.
- [36] “Silo.Tips,” [Online]. Available: <https://silo.tips/download/rede-de-ar-comprimido>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [37] “Ponto do Encanador,” [Online]. Available: <https://www.pontodoencanador.com/produto/i-galv-cotovelo-mf-90-x-12.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [38] “Truper,” [Online]. Available: <https://www.truper.com/valvulas-de-esferaroscables-alta-presion-600-psi.html>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [39] “Proxira,” [Online]. Available: <https://proxira.pt/filtros-reguladores-lubrificadores/9506-filtro-lubrificador-e-desumidificador-14-com-regulador-de-pressao.html?srsId=AfmBOorot1bVp4TaKVCion3wR-QEOGwOa-SvBA49ieo01MCnVtawvvOoygc>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [40] B. R. Munson, D. F. Young e T. H. Okiishi, Fundamentos da Mecânica dos Fluidos, Edgard Blucher, 2004.

- [41] M. F. B. Abdullah, “Study and Design of Compressed Air System for Optimum Operation,” Dissertation of Bachelor of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS , 2008.
- [42] “Cimpor-Quem somos,” [Online]. Available: <https://www.cimpor.com/a-cimpor/quem-somos>. [Acedido em 31 Agosto 2023].
- [43] “Qual é o Ponto de Orvalho na Termodinâmica?,” [Online]. Available: <https://polaridad.es/pt/punto-de-rocio-termodinamica/>.
- [44] A. Copco, “Air Compressor Room Design: Optimal Working Conditions,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/wiki/compressed-air-articles/optimal-working-conditions-compressor-room>. [Acedido em 01 Dezembro 2023].
- [45] A. P. d. Ambiente, “Fator de emissão da eletricidade,” Amadora, 2022.
- [46] A. C. Portugal, “Escolha o material das tubagens para ar comprimido,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/service/parts/airnet-piping>.
- [47] AIRnet, “Por que tubos de alumínio para sistemas industriais de ar comprimido?,” [Online]. Available: https://www.airnet-system.com/pt_br/air-piping-systems/aluminium-compressed-air-piping-system.
- [48] A. Copco, “Compressor com secador integrado,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/compressor-com-secador-integrado-entenda-as-vantagens-dessa-solucao>.
- [49] A. Copco, “Separador de óleo/água OSC 12-2500,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/condensate-treatment/osc-12-2500-oil-water-separator>.
- [50] A. Copco, “Filtros coalescentes para uma proteção máxima,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/air-filters/coalescing>.
- [51] Amaral, Gestão da Manutenção Industrial, Lidel, 2016.
- [52] B. Pratas, “Otimização de Estratégias de Manutenção Industrial em Transformadores de Potência.,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra , 2019.
- [53] B. Pratas, “Otimização de Estratégias de Manutenção Industrial em Transformadores de Potência,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. , Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra , 2019.

- [54] A. C. Brasil, “Tubulação de ar comprimido: compare tipos e características,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/tubulacao-de-ar-comprimido-tipos-e-caracteristicas>.
- [55] “Xintai Valve Group,” [Online]. Available: <https://www.xintaivalves.com/pt/products/cryogenic-globe-valve-2/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [56] “Ciclo Plan do act check,” [Online]. Available: https://www.google.com/search?q=CICLO+Plan+do+act+check&tbm=isch&ved=2ahUKEwib_Jq_ovGCAxWHtScCHeG-DzQQ2-cCegQIABAA&oq=CICLO+Plan+do+act+check&gs_lcp=CgNpbWcQAzoKCAAQgAQQigUQQzoFCAAQgAQ6BAgAEB46BggAEAUQHjoHCAAQgAQQEzoICAAQCBAeEBM6BggAEAgQHlClCVjdI2CwJWgAcA. [Acedido em 03 Dezembro 2023].
- [57] A. Copco, “Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido,” ADENE-Agência para a Energia, 2016.
- [58] Aquatropic, “Compressores Radiais,” 2023. [Online]. Available: <https://aquatropic.com.br/produtos-geral/compressorradial/>. [Acedido em 12 Agosto 2023].
- [59] “Compressor do motor,” Hagar MMA, [Online]. Available: <https://hangarmma.com.br/glossary/glossary-categories/compressor-do-motor/>. [Acedido em 13 Agosto 2023].
- [60] A. Copco, “Rede de ar comprimido: como dimensionar corretamente?,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/como-dimensionar-rede-ar-comprimido>. [Acedido em 28 Setembro 2023].
- [61] “Soluções eficientes em Ar Comprimido,” [Online]. Available: <http://equipoar.com.br/produto.php?i=49>. [Acedido em 05 novembro 2023].
- [62] C. PNEUMATIC, “Compressores Brasil,” [Online]. Available: <https://compressoresbrasil.com.br/produto/242>. [Acedido em 02 Dezembro 2023].
- [63] A. C. Brasil, “Tubulação de ar comprimido: compare tipos e características,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/air-compressor-blog/tubulacao-de-ar-comprimido-tipos-e-caracteristicas>. [Acedido em 15 janeiro 2024].
- [64] T. M. S. Pires, “Proteção à corrosão de estruturas de aço,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2018.
- [65] AIRNET, “Stainless steel piping for your compressed air, vacuum and inert gasses applications,” [Online]. Available: <https://www.airnet-system.com/en/air-piping-systems/stainless-steel-compressed-air-piping-system>.

- [66] A. C. Portugal, “GA VSD^s SERIES,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/air-compressor/rotary-screw-compressor/ga-vsds-series>.
- [67] A. Copco, “General Catalog for Compressed Air, Gas and Vacuum Solutions,” [Online]. Available: https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/brochures/CT%20Catalogue_Full.pdf.
- [68] A. Copco, “Compressores de parafuso lubrificado a óleo GA (VSD⁺),” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/compressors/products/air-compressor/rotary-screw-compressor/ga-series>.
- [69] A. Copco, “Secadores de ar por refrigeração industrial FX,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/products/air-dryers/refrigerant-air-dryers/fx-industrial>.
- [70] B. compressores, “Borbon compressores,” [Online]. Available: <https://www.compressoresborbon.com.br/produtos/separador-de-oleo-agua-osc-35-2400-atlas-copco/>.
- [71] “Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/monitoriza.dia/>.

ANEXOS

Anexo A – Determinar o Fator Consumo de Ar por cm de Curso [l/cm], q

Tabela de consumo de ar para cilindros pneumáticos												
Pressão de serviço em bar	Diâmetro do cilindro (mm)											
	6	12	16	25	35	40	50	70	100	140	200	250
Consumo de ar em l/cm de curso de cilindro												
1	0,0005	0,002	0,004	0,01	0,019	0,025	0,039	0,076	0,155	0,303	0,966	0,966
2	0,0008	0,003	0,006	0,014	0,028	0,037	0,058	0,113	0,213	0,452	0,923	1,441
3	0,0011	0,004	0,008	0,019	0,038	0,049	0,077	0,15	0,307	0,601	1,227	1,916
4	0,0014	0,006	0,01	0,024	0,047	0,061	0,096	0,187	0,383	0,75	1,531	2,392
5	0,0016	0,007	0,011	0,029	0,056	0,073	0,115	0,225	0,459	0,899	1,835	2,867
6	0,0019	0,008	0,014	0,033	0,066	0,085	0,134	0,262	0,535	1,048	2,139	3,342
7	0,0022	0,009	0,016	0,038	0,075	0,097	0,153	0,299	0,611	1,197	2,443	3,817
8	0,0025	0,01	0,018	0,043	0,084	0,11	0,172	0,335	0,687	1,346	2,747	4,292
9	0,0027	0,11	0,02	0,048	0,093	0,122	0,191	0,374	0,763	1,495	3,052	4,768
10	0,003	0,012	0,022	0,052	0,103	0,135	0,21	0,411	0,839	1,644	3,356	5,243
11	0,0033	0,013	0,024	0,057	0,112	0,146	0,229	0,448	0,915	1,793	3,66	5,718
12	0,0036	0,014	0,026	0,062	0,121	0,157	0,248	0,485	0,991	1,942	3,964	6,193
13	0,0038	0,015	0,028	0,067	0,131	0,171	0,267	0,523	1,067	2,091	4,268	6,668
14	0,0041	0,016	0,029	0,071	0,14	0,183	0,286	0,56	1,143	2,24	4,572	7,144
15	0,0044	0,018	0,032	0,076	0,149	0,195	0,305	0,597	1,219	2,398	4,876	7,619

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Anexo B – Comparação entre as Propriedades do Alumínio, PPR, Aço Preto, Aço Galvanizado e Aço Inox [54]

	ALUMÍNIO	PPR (PLÁSTICO)	PRETO (AÇO-CARBONO)	GALVANIZADO (AÇO-CARBONO)	AÇO INOX
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	Alto ●	Baixo ●	Baixo ●	Baixo ●	Alto ●
PERDA DE CARGA	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●	Baixo ●
VAZAMENTOS	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●	Baixo ●
RUGOSIDADE INTERNA	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●	Baixo ●
RESIST. À CORROSÃO	Alto ●	Alto ●	Baixo ●	Baixo ●	Alto ●
RESIST. AO CALOR	Alto ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●
RESIST. AO IMPACTO	Médio ●	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●
RESIST. RADIAÇÃO UV	Alto ●	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●
RESIST. AOS HIDROCARBONETOS	Alto ●	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●
RESIST. À PRESSÃO	Alto ●	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●
PINTURA EXTERNA	Eletrostática (azul) ●	Pigmento azul ●	Exige pintura ●	Exige pintura ●	N/A ●
REUTILIZÁVEL	Sim ●	Eventualmente ●	Eventualmente ●	Eventualmente ●	Eventualmente ●
TEMPO DE MONTAGEM	Baixo ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●	Alto ●
DISTÂNCIA ENTRE SUPORTES	3 a 4 metros ●	0,4 a 1,4 metro ●	3 a 4 metros ●	3 a 4 metros ●	3 a 4 metros ●

Anexo C – Dimensão Nominal (DN) das tubagens



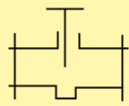

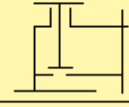
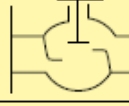
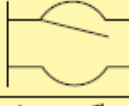


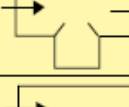
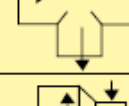
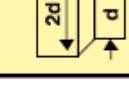
PIPES

20 (¾") - 25 (1") - 40 (1 ½") - 50 (2") - 63 (2 ½") - 80 (3") - 100 (4") - 158 (6") mm

Applications	Compressed Air and Vacuum	EN standard
Additional Gasses	Nitrogen, Helium, Argon, Neon, Xenon and Krypton	
Material	Extruded aluminum alloy EN AW-6060 T6 (similar to alloy 6063T5)	EN 755-2 (ASTM B241)
Safety factor	64bar - 4x MAWP for all diameters (burst pressure)	(according to ASME B31.1)
Working pressure	Max 16 bar(g) (Max 232 psig) (D158: max 13 bar (188 psig) acc. ASME B31.1)	
Working temperature	-20°C to 80°C (-4°F to 176°F)	
Vacuum level	13 mbar(a) (0.189 psia)	
Dewpoint	Lowest allowable pressure dewpoint is -40°C (-40°F)	
Outside treatment	Polyester powder paint (according to QUALICOAT Standards)	
Inside treatment	Chrome free conversion treatment	
Colors	Blue RAL 5012, Green RAL 6018 and Grey RAL 7001	

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Anexo D – Determinar o Comprimento Equivalente [m]

Equivalent length in meters												
Component		Inner pipe diameter in mm (d)										
		25	40	50	80	100	125	200	250	300	400	
Ball valve (full flow)		0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Diaphragm valve fully open		1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Angle valve fully open		4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Poppet valve		7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Flap check valve		2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Elbow R = 2d		0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Elbow R = d		0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
90° angle		1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Tee through-flow		0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Tee side-flow		1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reducing nipple		0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

Anexo E – Análise da Tubagem B -Passo a Passo

1. Determinar o diâmetro interno da tubagem B, considerando apenas o comprimento retilíneo da tubagem (L1):

- $Q = 75,96 \text{ m}^3/\text{h}$
- $\Delta P = 0,05 \text{ bar}$ (por ser tubagem de distribuição)
- $P = 6 \text{ bar}$
- $L1 = 22,65 \text{ m}$

$$d = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times Q^{1,85} \times L}{\Delta P \times P}}$$
$$\Leftrightarrow d = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 75,96^{1,85} \times 22,65}{0,05 \times 6}}$$
$$\Leftrightarrow d = 32,77 \text{ mm}$$

2. Considerando o diâmetro determinado no Ponto 1, calcula-se o comprimento equivalente (L2) da tubagem, através da tabela do Anexo D.

A tubagem B é uma tubagem de distribuição que se subdivide em tubagens de serviço C, D, E, F. Para determinar o comprimento equivalente da tubagem B, é necessário ter em conta os acessórios que dela fazem parte.

Assim, o ar sai da sala de compressores e passa por uma curva de 90°.

De seguida, o ar divide-se para sustentar os Filtros I3.4, I3.3, I2.2 e I1.2. A interligar as tubagens B e C existe 1 “tê”. Este acessório irá ser contabilizado no comprimento equivalente da tubagem C, e não, na tubagem B, porque a velocidade do ar em C é de 32,17 m/s, enquanto em B é de 25,02 m/s.

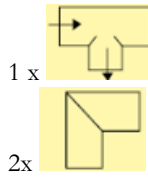
Posteriormente, a tubagem B interliga com a tubagem D e como a velocidade em D (26,09 m/s) é superior a B (25,02 m/s), então o “Tê” é contabilizado na tubagem D, e não, em C.

A terceira interligação ocorre entre as tubagens E e B, em que o “Tê” é contabilizado em B, porque a velocidade do ar é de 25,02 m/s, enquanto em E a velocidade é de 23,42 m/s.

A quarta interligação acontece com a tubagem B e F (23,42 m/s), em que a curva de 90° é contabilizada em B, por a velocidade ser superior.

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Deste modo, os acessórios que irão ser contabilizados na tubagem B são:



Analisando o Anexo C, o diâmetro imediatamente superior a 32,77mm é de 40 mm.

Deste modo, o comprimento equivalente é de:

$$L2 = 1 \times 2,4 + 2 \times 2,4 \Leftrightarrow L2 = 7,2 \text{ m}$$

3. Determinar o diâmetro final:

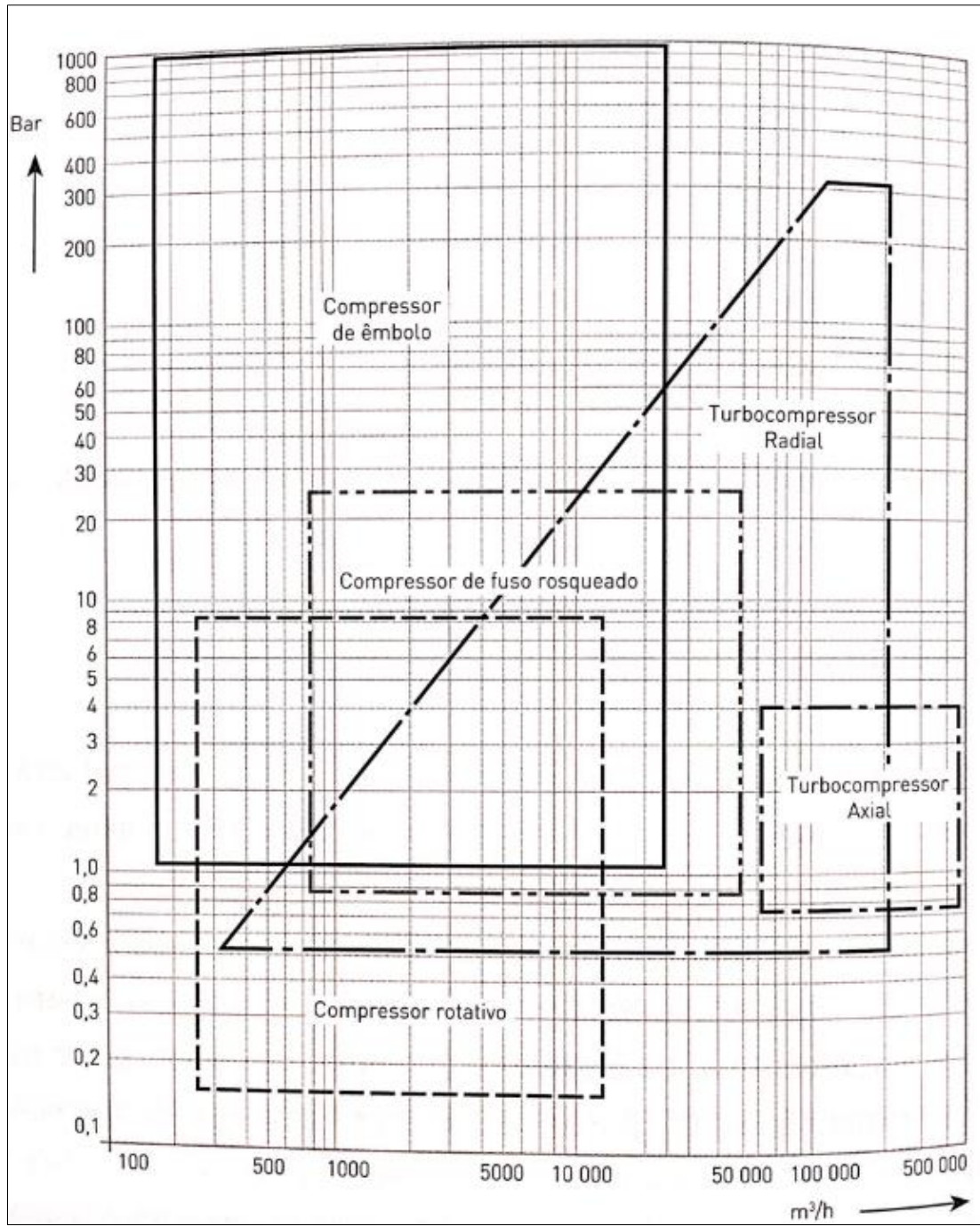
- $L = L1 + L2 \Leftrightarrow L = 22,65 + 7,2 \Leftrightarrow L = 29,85 \text{ m}$
- $Q = 75,96 \text{ m}^3/\text{h}$
- $\Delta P = 0,05 \text{ bar}$
- $P = 6 \text{ bar}$

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

$$\Leftrightarrow d = 10 \times \sqrt[5]{\frac{1,66 \times 10^{-3} \times 75,96^{1,85} \times 29,85}{0,05 \times 6}}$$

$$\Leftrightarrow d = 34,63 \text{ mm}$$

Anexo F – Seleção do compressor, relação caudal e pressão



Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

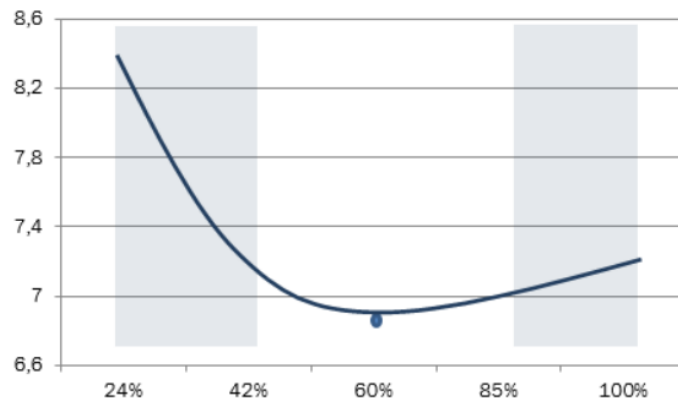
Anexo G – Tabela de Compressor Atlas Copco GA 22-37 VSD

Compressor type	Max. working pressure		Capacity FAD* min-max			Installed motor power		Noise level**	Weight (kg)	
	bar(e)	psig	l/s	m ³ /h	cfm	kW	hp		kg	kg
GA 22 VSD										
	4	58	13.25-75.08	47.7-270.3	28.1-159.1	22	30	68	387	516
	7	102	13.06-74.73	47-269	27.7-158.3	22	30	68	387	516
	9.5	138	12.91-63.37	46.5-228.1	27.4-134.3	22	30	68	387	516
	13	189	12.75-53.63	45.9-193.1	27-113.6	22	30	68	387	516
GA 26 VSD										
	4	58	13.25-77.89	47.7-280.4	28.1-165	26	35	71	392	533
	7	102	13.06-77.52	47-279.1	27.7-164.3	26	35	71	392	533
	9.5	138	12.91-71.63	46.5-257.9	27.4-151.8	26	35	71	392	533
	13	189	12.75-64.47	45.9-232.1	27-136.6	26	35	71	392	533
GA 30 VSD										
	4	58	13.25-97.83	47.7-352.2	28.1-207.3	30	40	71	405	545
	7	102	13.06-97.43	47-350.7	27.7-206.4	30	40	71	405	545
	9.5	138	12.91-85.62	46.5-308.2	27.4-181.4	30	40	71	405	545
	13	189	12.75-71.04	45.9-255.7	27-150.5	30	40	71	405	545
GA 37 VSD										
	4	58	13.25-115.8	47.7-416.9	28.1-245.4	37	50	71	409	550
	7	102	13.06-115.58	47-416.1	27.7-244.9	37	50	71	409	550
	9.5	138	12.91-102.84	46.5-370.2	27.4-217.9	37	50	71	409	550
	13	189	12.75-86.94	45.9-313	27-184.2	37	50	71	409	550

Anexo H – Tabela de Compressor Atlas Copco GA 18

Tipo de compressor	Pressão de trabalho máx.				Capacidade FAD*			Potência do motor instalado		Nível de ruído**	Peso (kg)***			
	WorkPlace		WorkPlace Full-Feature								FM	FM FF	TM	TM FF
	bar(e)	psig	bar(e)	psig	l/s	m³/h	cfm	kW	hp	dB(A)	kg	kg	kg	kg
VERSÃO DE 50 Hz														
GA 15														
7,5	7,5	108,8	7,3	105	46,9	168,8	99,4	15	20	67	455	529	645	718
8,5	8,5	123,3	8,3	120	43,5	156,6	92,2	15	20	67	455	529	645	718
10	10	145,0	9,8	141	39,3	141,5	83,3	15	20	67	455	529	645	718
13	13	188,5	12,8	185	33,3	119,9	70,6	15	20	67	455	529	645	718
GA 18														
7,5	7,5	108,8	7,3	105	59,6	214,6	126,3	18	25	68	464	559	654	749
8,5	8,5	123,3	8,3	120	57,0	205,2	120,8	18	25	68	464	559	654	749
10	10	145,0	9,8	141	49,5	178,5	105,0	18	25	68	464	559	654	749
13	13	188,5	12,8	185	40,0	144,0	84,8	18	25	68	464	559	654	749
GA 22														
7,5	7,5	108,8	7,3	105	65,6	236,2	139,0	22	30	69	480	575	670	765
8,5	8,5	123,3	8,3	120	63,3	227,9	134,1	22	30	69	480	575	670	765
10	10	145,0	9,8	141	55,3	199,1	117,2	22	30	69	480	575	670	765
13	13	188,5	12,8	185	49,3	177,5	104,5	22	30	69	480	575	670	765
GA 26														
7,5	7,5	108,8	7,3	105	72,5	260,9	153,6	26	35	70,2	490	585	680	775
8,5	8,5	123,3	8,3	120	66,6	239,7	141,1	26	35	70,2	490	585	680	775
10	10	145,0	9,8	141	64,3	231,4	136,2	26	35	70,2	490	585	680	775
13	13	188,5	12,8	185	56,6	203,9	120,0	26	35	70,2	490	585	680	775

Anexo I – Curva Ótima de Funcionamento dos Compressores



Anexo J – Tabela de Separadores de Condensados Atlas Copco [46]

Type	Capacity FAD ⁽¹⁾ [Cold climate]		Capacity FAD ⁽¹⁾ [Mild climate]		Capacity FAD ⁽¹⁾ [Hot climate]		Oil carry-over condensate mg/l	Approx. weight kg	Dimensions L x W x H mm
	l/s	m ³ /min	l/s	m ³ /min	l/s	m ³ /min			
OSC – Oil-water separator (Values for systems with compressors, air receivers and filters)									
OSC 35	105	6.3	45	2.7	20	1.2	< 20	4	470 x 165 x 600
OSC 95	280	16.8	118	7.1	50	3.0	< 20	13	680 x 255 x 750
OSC 145	415	24.9	175	10.5	75	4.5	< 20	15	680 x 255 x 750
OSC 355	1035	62.1	435	26.1	190	11.4	< 20	25	750 x 546 x 900
OSC 600	1800	108.0	760	46.8	330	19.8	< 20	26	750 x 546 x 1030
OSC 825	2410	144.6	1020	61.2	440	26.4	< 20	28	945 x 650 x 1100
OSC 1200	3450	207.0	1455	87.3	630	37.8	< 20	30	945 x 695 x 1100
OSC 2400	6895	413.7	2910	174.6	1260	75.6	< 20	60	945 x 1185 x 1100

Dimensionamento de uma Rede de Ar comprimido em ambiente industrial

Anexo L – Tabela de Filtros Atlas Copco [46]

Tamanho e dimensões DD+/PD+/UD+/DDp+/PDp+/QD+																			
Tamanho do filtro com ou sem inPASS™	Capacidade nominal		Pressão de referência		Pressão máxima		Ligações		Dimensões						Espaço requerido para substituição do cartucho		Peso		
	l/s	cfm	bar(e)	psig	bar(e)	psig	G	NPT	A		B		C		D		kg	lbs	
								mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch		
7+	7	15	7	102	16	232	G 1/2	NPT 1/2	106	4,17	90	3,54	362,6	14,3	90	3,54	1,18	2,60	
15+	15	32	7	102	16	232	G 1/2	NPT 1/2	106	4,17	90	3,54	362,6	14,3	90	3,54	1,24	2,73	
25+	25	53	7	102	16	232	G 1/2	NPT 1/2	106	4,17	90	3,54	415,1	16,3	90,5	3,56	1,45	3,20	
45+	45	95	7	102	16	232	G 3/4	NPT 3/4	135	5,31	110	4,33	442,6	17,4	110	4,33	2,35	5,18	
75+	75	159	7	102	16	232	G 1	NPT 1	135	5,31	110	4,33	527,6	20,8	110	4,33	2,8	6,17	
110+	110	233	7	102	16	232	G 1 1/2	NPT 1 1/2	175	6,89	143	5,63	559,1	22,0	130,5	5,14	5,4	11,91	
145+	145	307	7	102	16	232	G 1 1/2	NPT 1 1/2	175	6,89	143	5,63	629,1	24,8	130,5	5,14	5,93	13,08	
180+	180	381	7	102	16	232	G 1 1/2	NPT 1 1/2	175	6,89	143	5,63	699,1	27,5	130,5	5,14	6,45	14,22	
240+	240	509	7	102	16	232	G 2	NPT 2	222	8,74	171	6,73	729,6	28,7	175	6,89	9,54	21,04	
300+	300	636	7	102	16	232	G 2	NPT 2	222	8,74	171	6,73	822,6	32,4	175	6,89	10,71	23,62	
							G 2 1/2	NPT 2 1/2									10,43	23,00	

Variante sem inPASS™: a altura "C" diminui 51 mm (2") para os tamanhos 7-25 e 10 mm (0,4") para os tamanhos 45-300.

Anexo M – Determinar a velocidade do ar em cada tubagem

Tubagem	Caudal [m³/s]	Velocidade [m/s]	Área [m²]
B	0,0211	25,02	0,0008
P	0,079239	23,91	0,0033
C	0,006	32,17	0,0002
D	0,0065	26,09	0,0002
E	0,0043	23,42	0,0002
F	0,0043	23,42	0,0002
G	0,008858	36,54	0,0002
H	0,00705	38,30	0,0002
I	0,008858	36,54	0,0002
J	0,00705	38,30	0,0002
L	0,008858	36,54	0,0002
M	0,00705	38,30	0,0002
N	0,008858	36,54	0,0002
O	0,00705	38,30	0,0002
Q	0,0154	19,95	0,0008
R	0,0142	29,44	0,0005
S	0,0077	19,59	0,0004
T	0,0142	22,98	0,0006
U	0,0065	22,83	0,0003



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra