



## **Sistemas de Desodorização e Ventilação em Estações de Tratamento de Águas Residuais**

**BEATRIZ GUADALUPE COSTA DE OLIVEIRA**  
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientadores:

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques  
Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu e Silva

Vogais:

Doutor Luís Manuel Rodrigues Coelho  
Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

**Dezembro de 2024**



# **Sistemas de Desodorização e Ventilação em Estações de Tratamento de Águas Residuais**

**BEATRIZ GUADALUPE COSTA DE OLIVEIRA**  
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

**Orientadores:**

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques, ISEL/IPL  
Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca, ISEL/IPL

**Júri:**

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu e Silva, ISEL/IPL

**Vogais:**

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques, ISEL/IPL  
Doutor Luís Manuel Rodrigues Coelho, ESTS/IPS

**Dezembro de 2024**



# Agradecimentos

A realização deste trabalho final de mestrado só foi possível graças à colaboração e ao contributo de várias pessoas. A todos eles deixo aqui o meu sincero agradecimento.

Aos meus Professores orientadores Nuno Henriques e Cláudia Casaca. Muito obrigada pela dedicação e apoio ao longo do desenvolvimento do trabalho final de mestrado. Assim como pela articulação com os engenheiros da ETAR.

Ao Eng.º Paulo Inocêncio, por nos ter guiado na visita técnica à ETAR de Frielas e pela disponibilidade e ajuda na obtenção dos dados necessários à elaboração deste trabalho.

Um agradecimento também ao Eng.º Tiago Simões, pela orientação e ajuda essencial no trabalho de campo.

À minha família, aos meus pais, irmão e avós, pelo apoio e amor incondicional. Um agradecimento especial aos meus pais por me terem proporcionado estabilidade e aberto mais uma de muitas portas na minha vida, sem o apoio deles este trabalho não seria possível.

Ao meu namorado Alexandre, um agradecimento especial pelo amor, paciência e apoio em todos os momentos.

Aos amigos que criei durante o percurso académico pelo companheirismo.



## Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Beatriz Pereira

Lisboa, 22 de Dezembro de 2024



# **Sistemas de desodorização e ventilação em estações de tratamento de águas residuais**

## **Resumo**

Nas estações de tratamento de águas residuais (ETAR) a emissão de odores desagradáveis é um risco constante, e a proximidade com áreas povoadas torna-os um problema, visto que reduz a qualidade do ar e, conseqüentemente, a qualidade de vida da população. Como solução os espaços de tratamento são cobertos para conter os odores. No entanto, a cobertura por si só não é o suficiente, necessitando de um sistema de ventilação e desodorização para assegurar as concentrações de poluentes aceitáveis, tanto nos espaços confinados com ou sem presença humana, quanto no ar libertado para o exterior.

O presente trabalho teve como objetivo analisar e otimizar dois sistemas de ventilação e desodorização da ETAR de Frielas: a "linha da torre 1", que extrai ar da 1ª elevação inicial, gradagem e oficinas, e a "linha da torre 2", que extrai ar do canal de medição, edifício de desarenamento/desengorduramento, decantação primária e elevação secundária. Através das visitas técnicas foram identificadas deficiências e comparados os caudais e pressões medidos com os valores do projeto. Posteriormente, foi elaborada uma lista de melhorias e redimensionada a linha da torre 1, pois a linha da torre 2 estava inoperacional. Para a torre 1, foram propostas duas configurações, dimensionadas para três cenários, envolvendo o encerramento da linha das oficinas, o aumento das renovações horárias na gradagem (8/10/20 ren/h) e a extração de ar do 2º estágio de elevação (3/5/6 ren/h). Embora, a solução 1 seja mais simples de implementar por ser a extensão da configuração atual, a solução 2 apresenta uma ventilação mais eficiente, menores perdas de carga e custos energéticos (Cenário 1: -3,5%; Cenário 2: -6,1%; Cenário 3: -18,8%). No fim, foram propostos dois ventiladores com uma redução mínima de custos energéticos de 51%.

Palavras-chave: odor; ventilação; qualidade do ar; estação de tratamento de águas residuais



# Deodorization and Ventilation Systems in Wastewater Treatment Plants

## Abstract

The emission of unpleasant odors represents a constant risk in wastewater treatment plants (WWTPs). Proximity to populated areas serves to exacerbate this problem, as it reduces air quality and consequently impacts the quality of life of the population. As a solution, treatment spaces are covered to contain odors; however, this approach is insufficient in isolation. It is essential to implement a ventilation and deodorization system to ensure that pollutant concentrations within confined spaces, regardless of human presence, and in the released air are within acceptable limits.

The objective of this work was to analyze and optimize two ventilation and deodorization systems at Frielas WWTP: the "Tower 1 line," which extracts air from the 1st elevation, screening, and workshops, and the "Tower 2 line," which extracts air from the measurement channel, sand/grit removal building, primary sedimentation, and secondary elevation. During the technical visits, deficiencies were identified, and the measured flow rates and pressures were compared with the project values. Subsequently, a list of improvements was compiled, and the Tower 1 line was resized, as the Tower 2 line was inoperable. Two configurations were proposed for Tower 1, designed for three scenarios involving the shutdown of the workshop line, the increase in air changes in the screening area (8/10/20 air changes/h), and extraction in the 2nd elevation stage (3/5/6 air changes/h). Although Solution 1 is simpler to implement as it is an extension of the current configuration, Solution 2 offers more efficient ventilation, reduced pressure losses, and lower energy costs (Scenario 1: -3.5%; Scenario 2: -6.1%; Scenario 3: -18.8%). Finally, two fans were proposed with a minimum energy cost reduction of 51%.

Keywords: odour; ventilation; air quality; wastewater treatment plant.



# Índice Geral

Agradecimentos .....	i
Declaração de integridade.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Quadros.....	xiii
Lista de símbolos e de siglas.....	xv
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivo e motivação .....	2
1.3. Estrutura .....	2
2. Fundamento teórico.....	3
2.1. Estação de tratamento de águas residuais .....	3
2.1.1. Tratamento da fase líquida.....	3
2.1.2. Tratamento da fase sólida .....	4
2.1.3. Tratamento da fase gasosa.....	5
2.2. Odor.....	6
2.2.1. Caracterização e medição.....	6
2.2.2. Origem e natureza dos odores .....	9
2.2.3. Controlo de odor .....	12
2.3. Sistemas de desodorização e ventilação .....	14
2.3.1. Cobertura .....	15
2.3.2. Ventilação .....	15
2.3.3. Desodorização .....	20
2.4. Boas práticas .....	27
2.4.1. Boas práticas na conceção .....	27
2.4.2. Boas práticas na exploração .....	27
3. Caso de estudo .....	29

3.1.	Introdução.....	29
3.2.	Descrição detalhada .....	31
3.3.	Metodologia de Trabalho .....	34
3.4.	Inspeção de campo.....	35
4.	Proposta de Melhorias.....	43
4.1.	Projeto .....	43
4.2.	Melhorias recomendadas.....	44
4.3.	Dimensionamento.....	47
5.	Conclusão e trabalhos futuros .....	55
	Bibliografia .....	59
	APÊNDICES .....	63
	ANEXOS .....	105

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Tratamento de águas residuais.....	3
Figura 2.2 – Gráfico comparativo para seleção de tecnologias de desodorização utilizadas desde os anos 90 .....	20
Figura 2.3 – Desenho esquemático de uma torre de lavagem química. ....	22
Figura 2.4 – Desenho esquemático de um sistema de carvão ativado. ....	22
Figura 2.5 – Desenho esquemático da biofiltração. ....	23
Figura 2.6 – Desenho esquemático de um biofiltro humidificado. ....	23
Figura 2.7 – Desenho esquemático da biofiltração por biomassa em suspensão.....	24
Figura 2.8 – Desenho esquemático da difusão em reatores de lamas ativadas. ....	24
Figura 3.1 – Esquema geral de funcionamento da ETAR de Frielas.....	30
Figura 3.2 – ETAR de Frielas. Adaptado de Google Earth .....	30
Figura 3.3 – Envolvência da ETAR de Frielas .....	31
Figura 3.4 – Esquema simplificado dos sistemas de ventilação e desodorização em estudo .....	32
Figura 3.5 – Localização dos ventiladores e equipamentos de desodorização (à esquerda) e torres de lavagem química (à direita) .....	32
Figura 3.6 – Placa de especificações do ventilador da torre 1 (esquerda) e da torre 2 (direita) .....	33
Figura 3.7 – Anemómetro de fio quente usado na medição das pressões/velocidades.....	34
Figura 3.9 – Medição do fluxo de ar em condutas .....	35
Figura 3.10 – Locais de amostragem na linha da Torre 1 (esquerda) e na linha da Torre 2 (direita) ..	36
Figura 3.11 – Ventilação da elevação inicial com conduta estalada e com condensados à saída .....	37
Figura 3.12 – Edifício de gradagem: portões abertos, escorrência de lixiviados, grelhas obstruídas e desvio com perda de carga acentuada. ....	38
Figura 3.13 – Edifício de gradagem: contentor sem cobertura e porta partida, grades e tamisador....	39
Figura 3.14 – Ventilação das oficinas .....	39
Figura 3.15 – Ventilação do Canal de Parshall .....	39
Figura 3.16 – Edifício do desarenamento/desengorduramento corroído.....	40
Figura 3.17 – Ventilação do edifício do desarenamento/desengorduramento: espaço com falta de pontos de extração, grelhas obstruídas sem regulação, contentorização sem cobertura.....	40
Figura 3.18 – Picagens do canal de descarga .....	41
Figura 3.19 – Decantadores primários com coberturas levantadas e condutas partidas .....	41
Figura 3.20 – Ventilação da elevação intermédia .....	42
Figura 3.21 – Entrada de condutas no edifício de desodorização e a conduta deformada.....	42
Figura 4.1 – Resultados da medição dos caudais totais de ar extraídos da linha da Torre 1 .....	44
Figura 4.2 – Tipo de portão inox deslizante a instalar e ponto de extração do tamisador .....	46
Figura 4.3 – Solução 1 para a linha da torre 1 .....	48
Figura 4.4 – Solução 2 para a linha da torre 1 .....	48
Figura 4.5 – Comparação gráfica da potência absorvida dos ventiladores para os Cenários 1, 2 e 3 na Solução 1 e 2.....	54



## Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Operações e processos de tratamento da fase líquida .....	4
Quadro 2.2 – Operações e processos de tratamento da fase sólida .....	5
Quadro 2.3 – Concentrações de odores típicas para as várias etapas de tratamento .....	11
Quadro 2.4 – Odor no tratamento da fase líquida: causas e soluções .....	13
Quadro 2.5 – Odor no tratamento da fase sólida: causas e soluções .....	14
Quadro 2.6 – Renovações horárias recomendadas .....	17
Quadro 2.7 – Vantagens e desvantagens das tecnologias de desodorização .....	25
Quadro 3.1 – Resultados da medição de velocidades e pressões .....	36
Quadro 4.1 – Resultados do cálculo da perda de carga teórica das redes de projeto .....	43
Quadro 4.2 – Linha da Torre 1: Deficiências e melhorias .....	44
Quadro 4.3 – Linha da Torre 2: Deficiências e melhorias .....	46
Quadro 4.4 – Caudais de ar pretendidos para o cenário 1, 2 e 3 .....	49
Quadro 4.5 – Resultados do dimensionamento da Solução 1 e 2 para o Cenário 1, 2 e 3 .....	50
Quadro 4.6 – Potência absorvida, rendimento e custos energéticos para cada ventilador .....	53



# Lista de símbolos e de siglas

## Alfabeto romano

$A$	área [m <sup>2</sup> ]
$a, b$	dimensões da conduta retangular [m]
$C_o$	concentração de poluentes no ar introduzido [mg/m <sup>3</sup> ]
$C_a$	concentração máxima aceitável de poluentes [mg/m <sup>3</sup> ]
$C_f$	coeficiente de forma da descarga do ar
$D$	diâmetro [m]
$D_{eq}$	diâmetro equivalente [m]
$D_h$	diâmetro hidráulico [m]
$f$	fator de atrito
$H$	constante de solubilidade de Henry [mol/(m <sup>3</sup> ·Pa)]
$k$	coeficiente de perda de carga
$K$	coeficiente de segurança
$L$	comprimento [m]
$n$	número de renovações por hora [h <sup>-1</sup> ]
$p_p$	pressão parcial da substância [Pa]
$Q$	caudal [m <sup>3</sup> /h]
$S$	taxa de emissão horária de poluentes [m <sup>3</sup> /h]
$V$	volume do espaço [m <sup>3</sup> ]
$v$	velocidade [m/s]
$P_w$	perímetro molhado [m]
$P$	potência absorvida [kW]
$\Delta P_c$	pressão diferencial [Pa]
$\Delta P_s$	pressão estática [Pa]
$\Delta P_t$	pressão total [Pa]

## Alfabeto grego

$\rho$	massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	rendimento do ventilador

## Siglas

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
COV	Compostos Orgânicos Voláteis

ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FRP	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
H <sub>2</sub> S	Sulfureto de Hidrogénio
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
ou	Unidade de Odor
O	Oxigénio
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
pH	Potencial Hidrogeniónico
PP	Polipropileno
VLE	Valores Limite de Exposição
TLV	Threshold Limit Value

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

As estações de tratamento de águas residuais (ETAR) desempenham um papel essencial no combate da poluição ambiental e na conservação da água. Porém, no processo de tratamento das águas residuais são libertados odores fortes e desagradáveis que causam incómodo à população mais próxima [1]. Normalmente, para evitar este efeito, as instalações de tratamento são contruídas longe das áreas habitadas, mas devido ao aumento da urbanização em muitas regiões do mundo, a proximidade em torno duma ETAR é um cenário recorrente. Esta proximidade, combinada com a exigência pública por um ambiente mais limpo e saudável, tem resultado num aumento do número e da frequência de reclamações. De facto mais de 50%, das reclamações recebidas, por agências reguladoras ambientais em todo mundo, correspondem a maus odores [2].

Diante deste cenário, prevê-se a contenção de áreas com potencial odorífico, por meio de coberturas e/ou edifícios. Porém, esta contenção envolve lidar com problemas de corrosão, causados pela natureza agressiva de alguns gases odoríficos, e qualidade do ar sob a cobertura. Por esta razão, existem neste tipo de instalações sistemas de ventilação para controlar a corrosão de peças e estruturas, e principalmente para salvaguardar a saúde dos trabalhadores em ambientes confinados, onde as concentrações podem atingir níveis letais (acima de 300 ppm de sulfeto de hidrogénio) [2]. A carga odorífica do ar extraído pode ter de ser removida por meio de um sistema de desodorização, seja por via física, química ou biológica, antes de ser libertado na atmosfera, para garantir o cumprimento dos limites de concentrações de poluentes à saída. Assim, a implementação de sistemas de ventilação e desodorização permite o cumprimento das normas de saúde e segurança no trabalho, a diminuição das intervenções de manutenção das infraestruturas e a integração ambiental e social. Em Portugal, o tratamento de odores é uma prática relativamente recente. A ETAR da Guia foi a primeira ETAR a ser desodorizada em Portugal, em 1989, seguida pela ETAR de Cosena em 1995 [3].

## **1.2. Objetivo e motivação**

O presente trabalho tem como objetivo resolver o problema da ineficiência do sistema de ventilação e desodorização da ETAR de Frielas, que atualmente afeta a sua integração na malha urbana por emitir odores que prejudicam a qualidade de vida da população próxima. A resolução deste problema envolve a análise da informação recolhida em campo do sistema de modo a identificar as causas da sua ineficiência. Com base nesta análise, serão propostas soluções para otimizar o funcionamento do sistema, quer a nível ambiental, quer a nível de eficiência energética, e proceder ao redimensionamento de um sistema de ventilação e desodorização apropriado.

A oportunidade de abordar um problema real e aplicar os conhecimentos teóricos na prática e que estes contribuam para o desenvolvimento socioeconómico do local constitui por si só uma motivação para o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, o gosto pessoal na área da ventilação e nos processos de tratamento para a proteção do ambiente fundamentou a escolha deste tema para o trabalho final de mestrado.

## **1.3. Estrutura**

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos.

O capítulo 1 faz uma breve contextualização do tema, apresentando os objetivos, a motivação e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é descrito o fundamento teórico, subdividido em 4 subcapítulos. O primeiro caracteriza os principais tratamentos realizados numa ETAR. O segundo foca-se nos odores: como são medidos e é avaliado o seu impacto ambiental, a natureza e origem dos compostos odoríferos, e as medidas usadas no controlo de odores, resumindo as causas e possíveis soluções para os odores no tratamento da fase líquida e sólida. O terceiro aborda o controlo das emissões por contenção, ventilação e desodorização. O quarto apresenta medidas para melhorar os sistemas de ventilação e desodorização na conceção e na operação.

No capítulo 3 descreve-se o objeto de estudo deste trabalho, a ETAR de Frielas. Começa com uma breve caracterização geral da planta de tratamento e segue com uma descrição do sistema de desodorização e ventilação, depois expõe-se a metodologia utilizada nesta dissertação para alcançar os objetivos propostos. Por fim, apresentam-se os dados recolhidos durante a fase de medições e as deficiências levantadas do sistema. O capítulo 4 consiste na análise dos dados recolhidos em campo e na proposta de melhorias para otimizar o sistema, no final é feito o seu redimensionamento. O capítulo 5 sintetizam-se as principais conclusões do caso de estudo e apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuro.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. Estação de tratamento de águas residuais

A estação de tratamento de águas residuais (ETAR) recebe e trata águas residuais domésticas, indústrias e/ou pluviais, através da combinação de processos físicos, químicos e biológicos. As águas residuais brutas afluentes a uma ETAR apresentam normalmente um teor de oxigénio dissolvido muito baixo, matéria orgânica, gorduras, contaminantes patogénicos, nutrientes e sólidos [4]. Quando esta é depurada nas fileiras de tratamento, ocorre a separação de resíduos sólidos (gradados, areias e lamas) e gasosos (gás sulfídrico, dióxido de carbono, metano e outros gases em menor volume). Estes resíduos são ambientalmente nocivos e requerem tratamento adequado [5].

Na Figura 2.1, encontra-se apresentado o esquema do tratamento que as águas residuais podem ser sujeitas, abrangendo as fases líquida, sólida (lamas) e gasosa (odores e biogás), e ilustra as relações entre elas e os produtos resultantes.

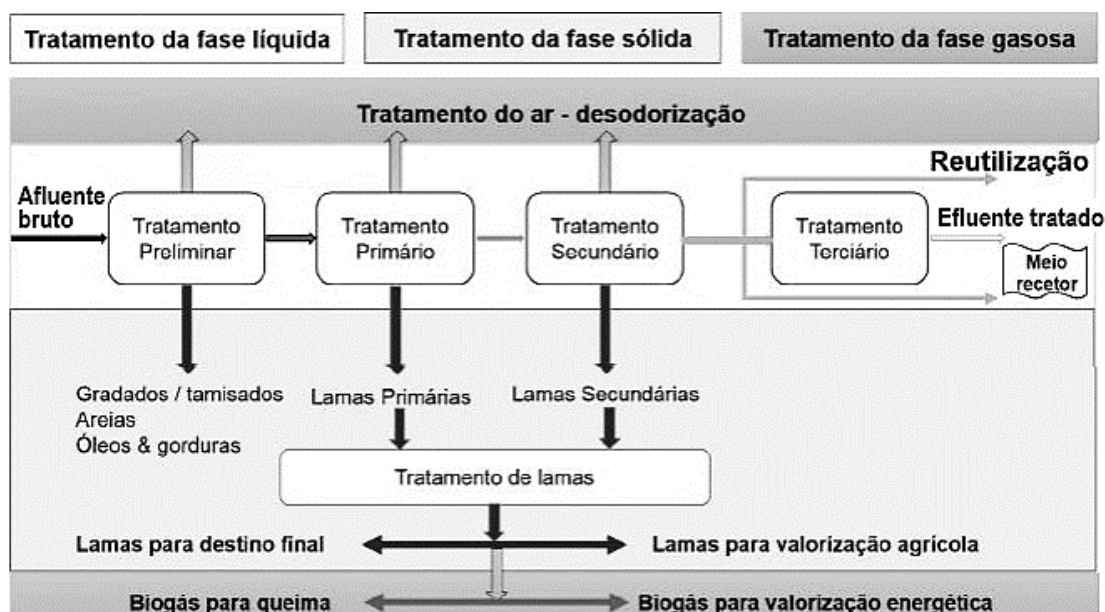


Figura 2.1 – Tratamento de águas residuais. Adaptado de [4].

#### 2.1.1. Tratamento da fase líquida

De um modo geral, os tipos de tratamentos que o efluente líquido é sujeito são cinco: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário, tratamento terciário e

tratamento avançado. A função e o conjunto de operações e processos que podem ser realizados em cada tipo de tratamento encontra-se apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Operações e processos de tratamento da fase líquida [4].

<b>Tratamento</b>	<b>Função</b>	<b>Operações e Processos</b>
<b>Preliminar</b> (processos físicos- -químicos)	Remove sólidos grosseiros, areias, óleos e gorduras, protegendo os órgãos e tubagem a montante de danos e entupimentos. Por vezes, equaliza-se a carga poluente e caudais.	- Gradagem/tamissagem - Desarenação e a remoção de óleos e gorduras (desengorduramento) - Homogeneização
<b>Primário</b> (processos físicos- -químicos)	Reduz, no mínimo, 20% da matéria poluente e 50% das partículas sólidas em suspensão. O que não é removido como sólido chama-se lama.	- Decantação/sedimentação ou, mais raramente flotação, com a possível assistência da coagulação química (adicionando sulfatos e sais de ferro)
<b>Secundário</b> (processos biológicos seguidos de físicos- -químicos)	Remove a matéria orgânica e nutrientes em reatores biológicos ou, em caso de climas frígidos, reatores químicos.  A carga de microrganismos pode ser removida numa segunda decantação.	- Digestão anaeróbia, ou menos comum digestão aeróbia e estabilização química. - Decantação/sedimentação ou flotação
<b>Terciário</b> (processos físicos- -químicos)	Remove nutrientes (fósforo e/ou azoto), sólidos suspensos e microrganismos patogénicos.	- Filtração - Desinfeção

O nível de tratamento necessário depende da sensibilidade do meio recetor e/ou se a água tratada vai ser reutilizada. Se o meio recetor for pouco sensível o tratamento primário pode ser o suficiente, no entanto para a reutilização, pode ser preciso tratamento terciário. Em Portugal, nos Decretos-Lei n.º 236/98 [6], n.º 152/97 [7], e n.º 149/2004 [8] é estabelecida a qualidade final exigida para as águas tratadas, tanto para a descarga no meio recetor (numa linha de água, num estuário ou no mar) quanto para a reutilização [5].

### 2.1.2. Tratamento da fase sólida

Quanto ao destino dos sólidos removidos: os gradados e tamisados, são compactados e expeditos para incineradores ou aterros sanitários; as areias são lavadas e podem enviadas para aterros ou valorizadas como material de construção; as gorduras são enviadas para um

tratamento dedicado por serem difíceis de biodegradar [4]. As lamas, por sua vez, são encaminhadas para uma fileira de tratamento que consiste no espessamento, digestão e desidratação, para reduzir o volume das lamas, estabilizar os compostos orgânicos e reduzir a presença de microrganismos patogênicos e metais pesados, tornando a sua utilização fácil e segura [5]. A água decantada no tratamento (escorrência) é bombeada para a obra de entrada ou para uma unidade de pré-tratamento.

No Quadro 2.2 apresenta-se a função de cada tratamento, e as operações e processos que podem estar envolvidos. Dependendo da composição das lamas, é possível valorizá-las na agricultura, como fertilizante agrícola ou corretor de solos, atendendo os requisitos do Decreto-Lei n.º 276/2009 [9]. Caso contrário, são incineradas ou conduzidas a aterro.

Quadro 2.2 – Operações e processos de tratamento da fase sólida [4] [5].

<b>Tratamento</b>	<b>Função</b>	<b>Operações e Processos</b>
<b>Espessamento</b>	Reduz o teor de água das lamas e o volume.	- Espessamento de forma gravítica, mecânica ou por flotação (tipicamente usado em lamas biológicas).
<b>Estabilização</b>	Fase crucial para aproveitamento das lamas, e permitir a sua valorização. Reduz o potencial de putrefação, patogênicos e odores.	- Estabilização química (por adição de cal), digestão anaeróbia ou digestão aeróbia.
<b>Desidratação</b>	Reduz o teor de água, facilitando o manuseio e transporte para descarga final.	- Desidratação mecânica ou em leitos de secagem (usados em pequenas instalações).

### 2.1.3. Tratamento da fase gasosa

Em ambas as fases (líquida e sólida) são produzidos e libertados odores, cujo tratamento se assume uma prioridade quando a ETAR se encontra próxima de aglomerados populacionais, devido aos efeitos adversos na saúde e vida da população [2]. Além da envolvimento, considera-se também a dimensão, configuração e tipos de tratamento ao decidir se o tratamento da fase gasosa é necessário. Para que seja possível realizar o tratamento do ar, é necessário cobrir os órgãos de tratamento ou inseri-los num edifício para encaminhar o ar, por condutas, a uma unidade de tratamento antes de ser libertado no exterior. As principais tecnologias de desodorização usadas são os biofiltros, sistemas de adsorção, geralmente de carvão ativado, e sistemas de lavagem química (*scrubbers*) [5].

O tratamento da fase gasosa, por vezes, também pode consistir na valorização energética do biogás produzido no tratamento biológico anaeróbio, que deve ser limpo de impurezas, como o sulfeto de hidrogénio ( $H_2S$ ), para ser utilizado [4].

## **2.2. Odor**

O odor, ou “cheiro”, é sentido quando uma ou mais substâncias químicas voláteis estão presentes no ar, em concentrações tão baixas como  $0,14 \mu g/m^3$  (0,1 ppb), são percebidas pelo olfato humano [10]. A percepção de odor começa nas células sensoriais localizadas no topo do nariz, e acaba com a transmissão do estímulo pelo nervo olfativo para o cérebro, onde pode evocar respostas psicológicas e fisiológicas. A resposta sensorial varia muito entre a população, dependendo de experiências anteriores, local de exposição e estratégias individuais adotadas. A exposição prolongada a odores pode causar efeitos negativos na saúde física e mental, como náuseas, irritação, dores de cabeça, stress e depressão. Além de prejudicar o bem-estar social, reduzir atividades ao ar livre e desvalorizar imóveis [11].

O odor libertado nas ETAR não só afeta a qualidade de vida da população próxima, resultando em reclamações, como também apresenta riscos à segurança e saúde dos trabalhadores em espaços confinados devido à toxicidade de certos compostos odoríficos, como o sulfureto de hidrogénio ( $H_2S$ ) e o amoníaco ( $NH_3$ ). Além disso, compostos como o  $H_2S$  provocam a corrosão de componentes elétricos, superfícies metálicas e betão, danificando os equipamentos [2].

### **2.2.1. Caraterização e medição**

Como as emissões de odor variam em função de cada ETAR, para se ter uma noção da dimensão e natureza do problema, é necessário recolher amostras das fontes emissoras e fazer a sua medição.

A coleta de amostras é muito importante se queremos obter valores significativos. Para isso existem métodos científicos padronizados, como os descritos na norma europeia EN 13725 [12] e alemã VDI 3880 [13]. A escolha do método depende do tipo de fonte a ser avaliada e os dados desejados [14]. Na amostragem de fontes pontuais, como saídas de chaminés e ventiladores, as amostras podem ser coletadas diretamente sobre a superfície emissora. A taxa de emissão é calculada multiplicando a concentração de odores pela taxa de fluxo de ar, obtida através da medição da velocidade do ar e da área transversal da conduta ou abertura. Já em fontes de área/volume, como tanques e fugas, a amostragem é feita indiretamente, podendo incluir a recolha de amostras de vários pontos na área da fonte emissora e o uso de modelos de dispersão atmosférica para estimar a taxa de emissão. Este último processo é

mais complexo, e por isso simplifica-se a amostragem sempre que possível, por exemplo, usando coberturas com uma única saída [3].

O odor pode ser medido através de dois métodos:

- a) medição analítica (análise física e química), que identifica e quantifica os compostos odoríficos na amostra e pode ser usada para selecionar a tecnologia de tratamento;
- b) medição sensorial, que caracteriza e quantifica o odor com base na percepção do olfativa do ser humano. Permite identificar as principais fontes de odor, avaliar a eficiência do tratamento de odores e, em conjunto com modelos de dispersão atmosférica, e pode avaliar o impacto olfativo.

#### **2.2.1.1. Medição analítica**

Compostos como sulfeto de hidrogénio, cloro, oxigénio e dióxido de enxofre podem ser analisados em tempo real, de forma pontual ou contínua, no campo [15]. Enquanto outros compostos odoríficos precisam de ser coletados e transportados para serem analisados em laboratório, usando equipamentos e técnicas como a cromatografia gasosa-espectrometria de massa (CG-EM) para identificar molecularmente os compostos odoríficos ou cromatografia gasosa-olfatometria (CG-O) para identificar os compostos responsáveis por um odor específico numa amostra [14].

Mesmo conhecendo a composição e a quantidade de cada componente de uma amostra, tal não é suficiente para prever o seu efeito odorífico. A maioria dos odores resulta de uma mistura complexa de substâncias que alteram o odor característico dos seus constituintes [16]. Além disso, existem cheiros que são detetáveis pelo nariz humano em concentrações tão baixas que os melhores instrumentos de análise não têm capacidade de detetá-los [15].

#### **2.2.1.2. Medição sensorial**

A medição sensorial ou olfatometria quantifica a percepção olfativa através de parâmetros característicos do odor que normalmente incluem: a concentração de odor (limite de deteção), o grau da intensidade do odor, o tom hedónico (grau da sensação de agradabilidade ou desagradabilidade) e a qualidade (descritores gerais) [10].

A concentração de odor só pode se medida em laboratório, enquanto os restantes parâmetros podem ser medidos em campo. As técnicas de medição mais usadas são [14]:

- a) olfatometria dinâmica, que mede a concentração de odor de uma amostra, expressa em unidades de odor por metro cúbico ( $\text{ou}/\text{m}^3$ ), feita em laboratório por um painel de 6 a 8 avaliadores acreditados e consiste na diluição (estática ou dinâmica) da amostra de odor, através de instrumentos chamados de olfatómetros, com gás inodoro até que

50% do painel deixe de detetar o odor. A concentração de odor é então o número de diluições da amostra precisas para atingir a concentração limite de deteção de odor, e é usada para quantificar a magnitude ou a distância do impacto de uma fonte;

- b) olfatométrica de campo (ou teste “Sniff”) é conduzida por especialistas com um dispositivo respiratório que dilui o ar exterior com ar neutro. Obtém-se, com baixa precisão, o número de vezes que o ar precisa ser diluído até não detetar odor;
- c) inspeções de campo são feitas por especialistas e avaliam na área afetada: a extensão da mancha de odor pelo método da pluma, e a frequência da exposição em termos de percentagem de “horas de odores” pelo método da rede;
- d) “ciência cidadã” permite conhecer o desconforto do cidadão em tempo real através da sua participação na avaliação da intensidade, qualidade e tom hedónico dos odores. Esta metodologia é utilizada no projeto europeu “D-Noses” promovido pela Comissão Europeia. A colaboração da população ajuda a mapear e quantificar o problema, além de apoiar os investigadores na identificação de soluções.

### **2.2.1.3. Impacto dos odores**

A existência de problemas de odores na envolvente da instalação pode ser determinada pela quantidade e a frequência de reclamações recebidas da população próxima que reconhece os odores como incómodo. Este é traduzido pelos efeitos combinados das características do odor percebidas pelo recetor, resumidas no acrónimo “FIDOL”: frequência de exposição (contínua, intermitente, diária, rara), intensidade (muito fraco a muito forte), duração da exposição (segundo, minutos, horas), carácter ofensivo (muito agradável a muito desagradável) e localização (residencial, comercial, áreas de lazer) [11].

O impacto do odor no ambiente é regulamentado internacionalmente, estabelecendo-se limites tanto na fonte quanto na qualidade do ar no ambiente [17] [18]:

- a) Na fonte: os limites são definidos como taxa ou concentração de odores. Por exemplo, na França a altura de descarga define os valores limites de emissão;
- b) No ambiente: os limites são expressos por percentis fora dos limites da instalação. Por exemplo, na França o limite é de 5 ou<sub>E</sub>/m<sup>3</sup> no percentil 98 para atividades de reciclagem e compostagem. Na Holanda, os valores são mais restritos, com um limite de 0,5 ou<sub>E</sub>/m<sup>3</sup> entre os percentis 98 e 99,5. A Alemanha expressa os limites em termos de percentagem de tempo de “horas de odores”: em zonas residenciais e mistas o limite é 876 horas num ano, em zonas industriais o limite é 1314 horas num ano.

O método mais comum para avaliar o impacto dos odores na vizinhança envolve o uso das concentrações de odor medidas pela olfatométrica dinâmica num modelo de dispersão do ar, e as informações meteorológicas e geográficas [14]. Este modelo computacional permite

definir as concentrações de odor a jusante e as zonas mais afetadas, e ajudam a prever o impacto de futuras fontes de odores. Contudo, este método tem altos níveis de incerteza, não refletindo o desconforto dos cidadãos em tempo real.

Também podem ser usados dispositivos como os narizes eletrônicos ("e-noses"), que replicam a detecção de odores humanos usando sensores químicos e inteligência artificial. Estes detetam odores específicos e estimam as suas concentrações (através de um treino baseado em medições olfatométricas) em tempo real e de forma contínua. A informação pode ser usada num modelo de dispersão de odores [14]. Existem sistemas de narizes eletrônicos (como o OdoWatch, da empresa Odotech), que, em conjunto com uma estação meteorológica, estimam a extensão da pluma de odor em tempo real sobre a região afetada.

Também podem ser utilizadas técnicas de inspeção de campo (métodos de grelha e pluma). No entanto, são avaliações lentas e caras, e desconhece-se o desconforto em tempo real dos cidadãos [14].

Mesmo que o odor não seja classificado como considerável e os limites de exposição não estejam legalmente excedidos, os residentes podem ficar incomodados. A informação sobre o desconforto dos cidadãos em tempo real pode ser obtida em tempo real e a baixos custos através da "ciência cidadã" [14].

### **2.2.2. Origem e natureza dos odores**

Em todas as etapas ou processos de recolha, transporte ou tratamento de águas residuais tem o potencial de gerar e libertar odores [15].

As águas residuais quando são descarregadas na rede de drenagem, apresentam normalmente altos valores de potencial redox (>50 mV) e elevadas concentrações de oxigénio dissolvido. Contudo, durante o transporte, o oxigénio é consumido na oxidação da matéria orgânica biodegradável, produzindo dióxido de carbono e substâncias parcialmente oxidadas. A insuficiência de aeração natural para repor o oxigénio consumido resulta em condições anaeróbias ou sépticas. Nestas condições, a matéria orgânica é decomposta por microrganismos anaeróbios, produzindo dióxido de carbono e sulfureto de hidrogénio, entre outros subprodutos. Fatores que contribuem para estas condições incluem redes extensas com baixa atividade (longos tempos de residência), manutenção insuficiente, descarga de efluentes com alta carga orgânica e temperatura elevada (efluentes industriais) [15].

Quando as águas residuais chegam à estação de tratamento em condições sépticas, apresentam elevados níveis de sulfuretos e dióxido de carbono, baixo potencial de redox e teor de oxigénio. O que indica que haverá a libertação de sulfureto de hidrogénio quando as águas residuais entrarem na estação de tratamento.

### 2.2.2.1. Emissão de odores

A emissão de odor ocorre quando existe: compostos odoríficos presentes na água ou lama residual; área da superfície da água/lama exposta; e condições que promovam a transferência de compostos para a fase gasosa [15]. A transferência de compostos da água/lama para o ar ou vice versa depende da solubilidade da substância odorífica, que é influenciada pela sua natureza química, temperatura e pressão. A lei de Henry na equação (2.1) descreve esta relação [19].

$$c_a = p_p H \quad (2.1)$$

onde,

$c_a$  - concentração da substância na fase líquida [ $\text{mol dm}^{-3}$ ];

$p_p$  - pressão parcial da substância na fase gasosa em condições de equilíbrio à pressão atmosférica [Pa];

$H$  - constante de solubilidade de Henry [ $\text{mol m}^{-3}\text{Pa}^{-1}$ ].

O valor constante  $H$  encontra-se tabelado, e expressa a quantidade máxima de gás que pode ser dissolvida no solvente e varia com a temperatura, o tipo de gás e solvente.

A maioria dos compostos odoríficos ofensivos são produzidos em condições anaeróbias e depende da concentração da matéria orgânica e nutrientes, temperatura (quanto maior for maior é atividade biológica, sobretudo acima de 16 °C), e do tempo de retenção/residência. Enquanto a taxa de libertação depende do grau de turbulência e da exposição da superfície, da temperatura (quanto maior for menor a solubilidade do composto) e do pH da água residual. Por exemplo, um pH de 8, mais de 90% do  $\text{H}_2\text{S}$  fica retido na água, enquanto a um pH de 6, menos de 10% do  $\text{H}_2\text{S}$  fica retido na água. Em comparação, o amoníaco apresenta um comportamento contrário, isto é, ambientes básicos intensificam o seu odor [15].

### 2.2.2.2. Fontes de odores

A emissão de odores na ETAR depende das propriedades do efluente, da etapa de tratamento e das condições de biodegradação [2]. As operações de manuseamento e tratamento de lamas, devido à elevada turbulência, ajustes de pH, são as principais fontes de emissão de odores. Além disso, as unidades que recebem efluente bruto, como as obras de entrada, pré-tratamento e sedimentação primária, também contribuem significativamente para a emissão, devido à turbulência nos canais, na base das grades, na remoção de gorduras (arejamento) e à grande área de exposição nos tanques, agravada pela recepção de elevadas cargas orgânicas, provenientes de escorrências geradas no tratamento das lamas e/ou de unidades industriais. Em contraste os tratamentos biológicos e a decantação secundária apresentam

baixas emissões de odor [15]. Estima-se que cerca de 52% das emissões são produzidas por águas residuais brutas e no espessamento de lamas, enquanto 40% são gerados na estabilização de lamas [2].

### 2.2.2.3. Compostos odoríficos libertados

Os odores libertados têm, geralmente, por base níveis de concentração relativamente baixos para os quais se detetam (limites de deteção). Nas redes drenagem, o composto predominante é o sulfureto de hidrogénio, devido ao estabelecimento de condições anaeróbias. No tratamento de águas residuais são libertados compostos orgânicos e inorgânicos, entre os quais se destacam: o sulfureto de hidrogénio, os compostos orgânicos sulfurados (mercaptanos, sulfureto de dimetilo), o amoníaco e compostos azotados (aminas) e outros compostos odoríficos, nomeadamente ácidos gordos voláteis, aldeídos e cetonas. Sendo os compostos sulfurados e, em menor grau, os compostos azotados, os principais contribuidores pelos odores fortes [15].

O Quadro 2.3 apresenta as concentrações de odores típicas para diferentes locais de tratamento numa ETAR.

Quadro 2.3 – Concentrações de odores típicas para as várias etapas de tratamento [14].

Local ou órgão	Concentração no ar [mg/m <sup>3</sup> ]		
	Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	Sulfureto de hidrogénio (H <sub>2</sub> S)	Mercaptanos (CH <sub>3</sub> SH)
Obra de entrada	1 a 3	1 a 3	0,5 a 1
Decantação primária	1 a 3	0,5 a 1	0,2 a 0,5
Poço de lamas primárias	-	10 a 500	2 a 250
Tanque de arejamento	-	< 1	< 0,5
Decantação secundária	-	< 1	< 0,5
Espessamento de lama	2 a 10	5 a 30	2 a 10
Desidratação de lama	5 a 25	10 a 50	2 a 15

O composto que mais contribui para problemas de odores é o sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S), o qual além de ser tóxico e letal em concentrações de 300 ppm no ar, é um ácido com cheiro forte a ovos podres e muito corrosivo. Devido à sua densidade, tende a acumular-se junto ao chão. Além disso, a sua concentração no ar é facilmente medida por sensores [15]. O sulfureto de hidrogénio é responsável pela derrocada de estruturas de betão e fibrocimento, devido à oxidação do ácido sulfídrico em ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), que ataca o carbonato de cálcio presente nesses materiais. Esta transformação é traduzida pela equação química (2.2) [4].



### 2.2.3. Controlo de odor

As estratégias de controlo geralmente envolvem uma ou uma combinação das quatro medidas seguintes [20] [10]:

1. **Controlo na origem** (na água/lama): evita o estabelecimento de condições anaeróbicas adicionando produtos químicos, como sais de ferro, nos locais onde estas condições são mais prováveis de surgir (redes de drenagem, estações elevatórias). E/ou adotando boas práticas na operação e no projeto: limpeza, controlo de descargas industriais, redução de tempos de retenção, monitorização das condições (pH, oxigénio, temperatura), manter níveis de arejamento adequado, optar por entradas submersas invés de quedas hidráulicas. Este tipo de controlo considera as redes de drenagem e as estações de tratamento como um todo;
2. **Controlo da dispersão de emissões**: separando a fonte de odor da vizinhança através de cortinas arbóreas, cercas altas ou chaminés, cuja eficiência depende das condições meteorológicas, ou cobrir/encerrar a fonte, método mais eficaz. As chaminés devem ser 1,5 a 2 vezes mais altas que as estruturas adjacentes para garantir a diluição adequada e evitar interferências [21];
3. **Disfarce**: pulverização de mascarantes no exterior da instalação para neutralizar odores. É uma solução fácil, barata e segura, mas não remove os constituintes do odor nem os seus efeitos prejudiciais à saúde. Pode ser usada para ganhar tempo para colocar em ação uma solução adequada, ou para identificar fontes de odor;
4. **Tratamento do ar**: tecnologias de desodorização como lavadores químicos e biofiltros. Embora exijam poucas alterações na linha de tratamento, mas podem ser onerosos de adquirir, operar e manter, além de poderem gerar efluentes poluentes.

As soluções preventivas devem ser as primeiras a serem adotadas, mas caso não forem possíveis ou suficientes para eliminar as reclamações, deve se recorrer a soluções curativas. A principal estratégia curativa envolve “capturar e o tratar”, através das seguintes ações:

- i. Cobertura/encerramento de órgãos ou áreas propensas a gerar odores indesejáveis;
- ii. Ventilação dos espaços cobertos;
- iii. Encaminhamento dos gases ventilados para tratamento adequado;
- iv. Dispersar o ar tratado na atmosfera para diluição.

Além das medidas mencionadas, sensibilizar e dar a conhecer o funcionamento e a importância da ETAR ao público, pode reduzir o número de reclamações [10].

É importante notar, que ao definir limites para uma fonte de odores, deve-se ponderar o custo das estratégias de controlo, assegurando se traduzam numa redução perceptível do incómodo

na comunidade. Pois, devido à natureza logarítmica do olfato, diminuir a concentração pela metade resulta numa percepção da redução muito menor do que a redução física sugere [5].

No Quadro 2.4 apresenta-se uma lista de causas para a existência de odor no tratamento da fase líquidas e soluções para reduzir as emissões.

Quadro 2.4 – Odor no tratamento da fase líquida: causas e soluções [3] [10].

<b>Tratamento</b>	<b>Origem dos odores emitidos</b>	<b>Solução</b>
<b>Obra-de-entrada</b>	Descargas de grandes caudais de águas sépticas e/ou com temperaturas elevadas.	Não exceder os 10% de carga de sólidos voláteis.
		Monitorizar pH ou taxa de consumo de oxigénio CBO <sub>5</sub> . Adição de químicos para elevar o pH ou para oxidar e/ou precipitar o sulfeto. Cobrir e ventilar o ar para o tratar.
<b>Preliminar</b>	Elevada turbulência para evitar a deposição. Remoção de resíduos com elevada carga orgânica	Usar desareadores tipo vórtice ou de escoamento horizontal.
		Adição de químicos a montante. Limpeza regular e lavagem de areias. Cobrir e ventilar o ar para o tratar.
<b>Primário:</b> decantação primária	Afluências sobrestimadas (elevados tempos de residência).	Redução do tempo de retenção e retirar do serviço tanques em excesso.
	Ampla interface ar-água, condições atmosféricas (vento).	Limpeza diária. Cobrir e ventilar o ar para tratamento.
<b>Secundário</b>		
Biomassa suspensa	Arejamento ou mistura insuficiente. Entupimento dos injetores. Falta de turbulência na entrada das lamas ativadas recirculadas.	Introdução de ar em bolhas finas em vez de bolhas grossas. Usar oxigénio puro.
		Reduzir o arejamento no topo do sistema. Limpeza regular das paredes e injetores.
Biomassa fixa	Arejamento ou distribuição da água residual insuficiente. Efluentes com elevada carga orgânica	Limitar a carga afluyente. Adicionar sais de ferro a montante. Fornecer ventilação forçada.
Decantador secundário	Causas semelhantes à decantação primária. Formação de condições anaeróbias a montante.	Soluções semelhantes à decantação primária.
<b>Terciário</b>	Adição excessiva de um agente desinfetante, como cloro ou ozono.	Sistema de dosagem automática para ajustar o cloro ao efluente. Usar tratamento por ultravioleta.

No Quadro 2.5 lista-se as causas para a existência de odor no tratamento das lamas e soluções possíveis para reduzir as emissões.

Quadro 2.5 – Odor no tratamento da fase sólida: causas e soluções [3] [10].

Tratamento	Origem dos odores emitidos	Solução
<b>Espessamento</b>	Condições sépticas que surgem devido ao tempo de retenção necessário ao processo e ao baixo potencial redox da lama.	Processar as lamas logo após a sua geração, sobretudo lamas primárias.
	Exposição das lamas à atmosfera. Co-espessamento de lamas primárias e secundárias, pois favorece o crescimento de microrganismos anaeróbios.	Realizar o espessamento as lamas primárias e secundárias separadamente. Pré-tratamento químico antes do espessamento (e.g. com cloro). Cobrir e ventilar o ar para tratamento.
<b>Estabilização</b>		
Estabilização química com cal	Processo com elevado pH resulta na libertação de amoníaco e outros compostos azotados	Ventilar o amoníaco para o exterior, exceto se as concentrações forem altas ou a área for sensível.
Compostagem	Compostagem a altas temperaturas.	Evitar usar lamas muito húmidas. Arejar. Cobrir e ventilar o ar para tratamento.
Digestores aeróbicos	Sobrecarga do sistema ou oxigénio dissolvido insuficiente.	Limitar a carga. Arejamento e mistura adequado.
Digestores anaeróbios	Odores podem escapar se o sistema tiver mal isolado.	Manter temperaturas e pH adequados. Adição de sais de ferro.
<b>Desidratação</b>	Turbulência criada no processo.	Adição de químicos.
	Adição de polímeros para melhorar o desempenho do processo.	Selecionar o polímero pelo custo-efetividade e potencial odorífico. Cobrir e ventilar o ar para tratamento.

### 2.3. Sistemas de desodorização e ventilação

Para capturar e tratar os gases de forte odor, o local deve ser coberto, impedindo a difusão de emissões para o exterior. A cobertura do local deve ser feita de acordo com as condicionantes estruturais e operacionais, e o sistema de ventilação e desodorização deve assegurar concentrações de poluentes aceitáveis com ou sem presença humana, bem como à saída do tratamento. A cobertura e o sistema de ventilação ditam o tamanho da unidade de tratamento e previnem a fuga de emissões para o exterior.

### **2.3.1. Cobertura**

As coberturas podem ser classificadas em três tipos [15] [20]:

- a) coberturas de baixo perfil (planas ou em arco): cobrem a área ao nível do plano da água, reduzem o volume de ar a tratar e a capacidade exigida pelos equipamentos de tratamento e ventilação. Não são visitáveis e têm acesso limitado, o que permite a aplicação de menores taxas de renovação de ar;
- b) coberturas de alto perfil (edifício ou cúpula): são construídas acima dos órgãos de tratamento e permitem tarefas como a amostragem e manutenção, mas a quantidade de ar a tratar é muito maior. Pois dá o acesso a zonas que podem pôr em causa a saúde e segurança do trabalhador;
- c) coberturas duplas: combinam as duas configurações anteriores para conseguir maior proteção em áreas sensíveis.

De uma maneira geral quando existem órgãos que libertam odores, mas pela sua natureza não sejam ou não possam ser fechados deveram ser envolvidos por edifícios.

A conceção da cobertura, de acordo com a norma europeia EN12255-9:2002 [22], deve levar em consideração a pressão sob a cobertura para evitar que haja fuga de gases, condicionantes estruturais e operacionais, cargas a serem suportadas (ventos, neve e acessos pedonais), resistência à corrosão e exposição solar, acessos fáceis de abrir e fechar e pontos para recolha de gases. Após a conceção da cobertura é importante realizar verificações periódicas, limpeza e manutenção sempre que necessário.

A escolha da cobertura adequada envolve o equilíbrio entre os custos, materiais e a eficiência. Os materiais mais usados incluem o betão, alumínio, aço inoxidável, fibra de vidro e PVC [20].

### **2.3.2. Ventilação**

Segundo a norma EN12255-9:2002 [22], para reduzir a corrosão e, acima de tudo, proporcionar um ambiente seguro aos trabalhadores em espaços confinados, é necessário garantir os caudais mínimos de extração para remover e coletar os gases contaminados. A cobertura sem sistema de aspiração é normalmente feita apenas em pequenas partes não visitáveis da instalação. Nas outras partes a ventilação pode ser feita de duas formas: extração mecânica com entrada natural de ar, extração e insuflação mecânica [23].

No primeiro tipo ventilação, o espaço encontra-se sob pressão negativa relativamente ao exterior para garantir a contenção, extraíndo mais rapidamente que a entrada de ar. O ar é extraído através de condutas que distribuem a extração de ar sobre a área de superfície do espaço. Enquanto, que a entrada de ar se dá através de aberturas projetadas para esse

propósito (grelhas) ou sob a forma de infiltrações, se suficientes. Normalmente, uma pressão negativa de 0,7 mm.c.a é o suficiente para que não haja fuga para o exterior de contaminantes. No entanto, este tipo de ventilação apresenta geralmente zonas mortas, onde a concentração de poluição pode ser de duas a cinco vezes superior à concentração média do ar extraído [23].

Em casos especiais ou sensíveis, como espaços ocupados por trabalhadores, são necessários sistemas com insuflação e extração mecânica para assegurar uma contenção eficaz do espaço e a homogeneidade da qualidade do ar, evitando zonas mortas e diluindo os contaminantes libertados [23].

Existem dois métodos para extrair o ar: aspiração local, assegurada pelo confinamento da fonte de emissão e/ou aspiração geral ambiente, assegurada por um sistema de tubagens com grelhas de aspiração que renovam o ar do edifício.

A aspiração geral requer maiores caudais de ar para conseguir o mesmo efeito que a localizada, por isso quando possível dá-se preferência à captura direta de ar. A localização dos pontos de extração deve levar em consideração a densidade e a temperatura das emissões, uma vez que certos gases, como o NH<sub>3</sub>, podem acumular-se junto ao teto, enquanto compostos sulfurados, como H<sub>2</sub>S, acumulam-se junto ao chão.

### 2.3.2.1. Caudal de ventilação

A qualidade do ar no interior de espaços é garantida pela limitação da concentração de contaminantes através da ventilação mecânica, de modo a reduzi-la para níveis abaixo dos considerados prejudiciais. Os índices de referência mais conhecidos são os da ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*), designados como *Threshold Limit Value* (TLV). A nível nacional, a norma portuguesa NP 1796 define os valores limite de exposição (VLE) [24].

As concentrações de poluentes no ar interior dependem da relação entre as suas taxas de emissão e remoção. Para limitar a concentração de um poluente num local onde é emitido a uma determinada taxa, utiliza-se a equação (2.3) para determinar o caudal de ar necessário.

$$Q = K \frac{S}{C_a - C_0} \quad (2.3)$$

onde:

Q - caudal de ventilação [m<sup>3</sup>/h];

S - taxa de emissão horária de poluentes [mg/h];

$C_a$  - concentração máxima aceitável de poluentes [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ];

$C_0$  - concentração de poluentes no ar introduzido [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ];

$K$  - coeficiente de segurança, que toma valores de acordo com o tipo de ventilação: extração  $K=3$ ; extração e insuflação  $K=1,5$  a  $2$  [24].

Uma concentração aceitável, geralmente, utiliza o valor de concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  como referência, uma vez que é o composto mais predominante e causa problemas de saúde em baixas concentrações. Por isso, é comum estabelecer um limite de concentração inferior a  $14 \text{ mg}/\text{m}^3$ , equivalente a uma concentração média de  $10 \text{ ppm}$  [24]. Se os níveis de poluentes no ar excederem 25% da concentração aceitável, os trabalhadores têm de usar proteção respiratória [3].

Quando não é possível determinar a taxa de difusão do poluente na área, o caudal de ar a extrair pode ser estabelecido em função do volume das zonas a desodorizar e do número de renovações por hora recomendadas (Quadro 2.6) através da equação (2.4) [25].

$$Q = n V \quad (2.4)$$

onde,

$n$  - número de renovações por hora;

$V$  - o volume do espaço [ $\text{m}^3$ ].

Quadro 2.6 – Renovações horárias recomendadas.

	Renovações horárias (ren/h)	Referência
Zonas onde operam trabalhadores	8-10	[24]
Restantes zonas	2-5	
Espaços não visitáveis	4-6	[10]
Espaços visitáveis	12	

### 2.3.2.2. Redes de captação

As condutas são fabricadas com materiais resistentes à corrosão, inclinadas para facilitar o transporte de condensados e equipadas nos pontos mais baixos da rede com dispositivos para a purga de condensados. Além disso, é necessário instalar portas de visita para facilitar a limpeza do interior da conduta, seguindo a norma EN 12097 [26], garantindo que haja pelo menos uma porta de visita sempre que houver uma alteração dimensional, mudança de direção de mais de  $45^\circ$ , ou conduta com mais de  $7,5 \text{ m}$ . Adicionalmente, é recomendável instalar registos por cada ponto de captação e nas ramificações da rede para regular caudal.

O ventilador deve ter a capacidade de fornecer os caudais projetados e uma pressão estática disponível superior às perdas de carga na instalação. A perda total da rede é constituída pela soma das: perdas de carga ao longo dos circuitos lineares ( $\Delta P_L$ ), por atrito, determinada pela equação de Darcy-Weisbach (2.5) ou consultando a sua tradução num ábaco; perdas de carga em acessórios ( $\Delta P_a$ ), como cotovelos, transições e tês, calcula com a equação (2.6); e das perdas de carga nos equipamentos da instalação (filtros, registos, grelhas), dada normalmente pelos fabricantes dos mesmos [25].

$$\Delta P_L = f \frac{\rho V^2 L}{2 D} \quad (2.5)$$

$$\Delta P_a = k \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.6)$$

onde,

$\Delta P_L$  - perdas de carga distribuídas [Pa];

$\Delta P_a$  - perdas de carga localizadas [Pa];

$L$  e  $D$  - comprimento e o diâmetro da tubagem [m];

$f$  - fator de atrito;

$v$  - velocidade [m/s];

$\rho$  – massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>];

$k$  - coeficiente de perda de carga do acessório (tabelado em manuais como ASHRAE Handbook [25]).

A perda de carga do sistema corresponde ao percurso da rede com a maior variação de pressão, normalmente o mais distante, sendo designado como percurso crítico. Com o caudal para essa perda de carga, é possível traçar a curva da instalação, usando a equação (2.7). O ponto de interseção desta curva com a curva característica do ventilador determina o ponto de funcionamento do ventilador [25].

$$\Delta P_s = CQ^2 \quad (2.7)$$

onde,

$\Delta P_s$  - perda de pressão estática [Pa];

$Q$  - caudal [m<sup>3</sup>/s].

Se a secção da conduta não for circular, o diâmetro usado na equação de Darcy deve ser substituído pelo diâmetro hidráulico, expresso pela equação (2.8) [27]. Para secções retangulares, determina-se o diâmetro equivalente para obter o mesmo caudal de ar que seria

transportado por uma conduta circular, conforme a equação (2.9), e para obter a mesma velocidade do ar que atravessaria uma conduta circular, conforme a equação (2.10).

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (2.8)$$

$$D_{eq.} = \frac{1,3(ab)^{0,625}}{(a+b)^{0,25}} \quad (2.9)$$

$$D_{eq.} = \frac{2ab}{a+b} = D_h \quad (2.10)$$

onde,

$A$  – área transversal [m<sup>2</sup>];

$P_w$  – perímetro molhado [m];

$D_{eq.}$  - diâmetro equivalente [m];

$D_h$  - diâmetro hidráulico [m];

$a$  e  $b$  - dimensões da conduta retangular [m].

No dimensionamento de redes de extração recorre-se normalmente ao método da perda de carga constante, porque simplifica o cálculo da perda de carga total da rede. Neste método, inicialmente é considerada uma perda de carga por metro linear, e reduz-se o diâmetro das condutas para manter a perda de carga até ao ponto final. Isto significa que independentemente do caudal, a perda de carga em dois troços com o mesmo comprimento equivalente, será igual. O valor de perda de carga unitária que se costuma optar é a do troço inicial, por ter o maior caudal e a velocidade diminuir ao longo da rede, e por isso ser o troço mais crítico (com maior perda de carga). No dimensionamento, considera-se a limitação das velocidades, que para instalações indústrias recomenda-se: conduta principal 8-12 m/s, condutas intermédias 5-8 m/s e condutas terminais 3-5 m/s [28]. Quanto menor a velocidade adotada menor o consumo energético, mas maior secção de conduta e por isso maior o investimento inicial. No final do dimensionamento, deve-se garantir que a diferencial de pressão nos terminais esteja próxima à do caminho crítico, para obter os caudais pretendidos. O reequilíbrio do sistema é feito pela redução da secção da conduta e instalação de registos. O caudal necessário garantir para uma determinada pressão diferencial no interior do espaço é obtido pela equação (2.11) [25].

$$Q = \sqrt{\frac{2\Delta P_c}{\rho}} AC_f \quad (2.11)$$

Onde,

$Q$  - caudal diferencial no espaço interior [ $\text{m}^3/\text{h}$ ];

$\Delta P_c$  - pressão diferencial [Pa];

$\rho$  - massa específica do ar (geralmente  $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$A$  - área de fuga do caudal de ar entre espaços (p. ex. frestas de portas) [ $\text{m}^2$ ];

$C_f$  - coeficiente de forma da descarga do ar, em portas semifechadas ronda valores de 0,72 a 0,75.

### 2.3.3. Desodorização

Existem várias tecnologias de desodorização disponíveis no mercado. No entanto, a escolha adequada para que seja eliminado o odor de forma eficaz e eficiente, envolve a consideração dos seguintes pontos [24] [29]:

- i. Caracterização do ar a tratar (caudal, temperatura, composição, humidade relativa e poeira);
- ii. Definição da qualidade exigida no tratamento;
- iii. Avaliação da envolvente da instalação;
- iv. Seleção das tecnologias, tendo em conta o custo do capital inicial e custo de operação e manutenção (O&M), e os impactos ambientais, como a geração de poluição secundária, substituição de meio filtrante, consumo de energia e de produtos químicos. Deve seleccionar-se sempre que possível a tecnologia mais ambientalmente sustentável.

Na Figura 2.2 apresenta-se um gráfico para seleção das tecnologias em função do caudal e a concentração de odores com base em aplicações anteriores na indústria [29].

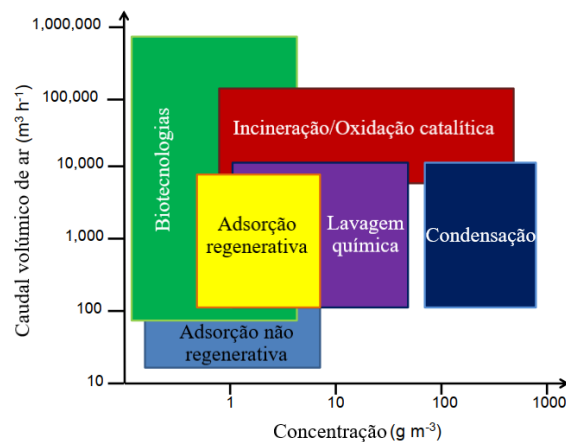


Figura 2.2 – Gráfico comparativo para seleção de tecnologias de desodorização utilizadas desde os anos 90 [29].

O processo de desodorização baseia-se na remoção por transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida (absorção) ou para a fase sólida (adsorção), seguida normalmente por uma oxidação química ou biológica dos contaminantes. Ainda existem os tratamentos térmicos, que removem contaminantes na fase gasosa a alta temperatura, entre 800 °C e 1100 °C. Embora atinjam 99% de eficácia, são pouco utilizados devido ao alto custo de operação, ultrapassando 350 € por m<sup>3</sup>/h para a oxidação catalítica e 120 € por m<sup>3</sup>/h para a oxidação térmica [29].

As tecnologias de desodorização dividem-se em dois grupos principais: físico-químicas e biológicas. As tecnologias físico-químicas mais usadas são as torres de lavagem química e os sistemas de adsorção em carvão ativado, devido à sua alta eficiência e rápido tempo de operação e arranque. Já as tecnologias biológicas, que utilizam microrganismos para decompor poluentes, são cada vez mais preferidas e consideradas, por se apresentarem como uma escolha de reduzido impacto ambiental, segura, livre de poluentes secundários e económica a longo prazo. Entre as tecnologias biológicas mais conhecidas estão os biofiltros convencionais, biofiltros humidificados, biofiltros por biomassa em suspensão e difusão em reatores de lamas ativadas [29] [30]. A seguir, aborda-se as mais utilizadas de cada grupo.

**a) Lavagem química** – Os compostos odoríficos são removidos do ar contaminado ao entrarem em contato com um líquido de lavagem, com reagentes químicos (quando utilizados), como o ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio, dependendo do composto alvo, para convertê-los em sais inodoros em reações ácido-base ou de oxidação-redução. O processo de tratamento geralmente envolve a utilização de torres de lavagens com enchimento [31], ilustrado na Figura 2.4, onde os gases odoríficos são forçados pela base em contracorrente com o líquido de lavagem, que é pulverizado no topo. As correntes percolam pelo enchimento de material inerte (plástico, cerâmica), que permite aumentar a área de contacto entre o soluto e solvente, e aumentar a capacidade de remoção. Após a passagem, o líquido de lavagem é descartado ou/e recirculado enquanto o ar limpo sai pelo topo [14].

O consumo de reagentes químicos pode ser estimado estequiometricamente, com base nas concentrações de poluentes gasosos à entrada e saída. A reposição de reagentes pode ser controlada com base no pH, nas medições do oxidante ou no potencial redox. Além disso, é necessário repor a água, que em alguns casos deve ser macia [14].

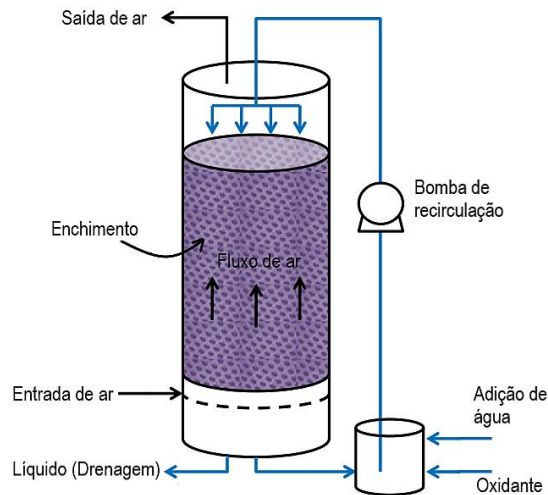


Figura 2.3 – Desenho esquemático de uma torre de lavagem química. Adaptado de [29].

**b) Sistemas de adsorção** – Capturam os contaminantes gasosos através de um meio microporoso com elevada área superficial (geralmente carvão ativado granulado). O processo geralmente envolve a utilização de dois leitos, como ilustrado na Figura 2.4 que alternam o funcionamento para manter a operação contínua enquanto um adsorve, o outro é regenerado no local ou substituído quando atinge a saturação. O tempo de saturação depende do tipo de meio, da temperatura e humidade, das concentrações e composição do ar contaminado [29]. A seleção do tipo de meio depende do tipo de contaminante a tratar e da eficiência desejada [2].

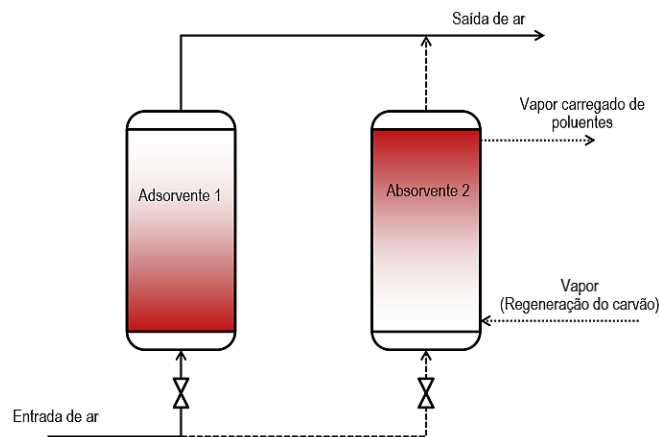


Figura 2.4 – Desenho esquemático de um sistema de carvão ativado. Adaptado de [29].

**c) Biofiltro** – O processo ilustrado na Figura 2.5, envolve forçar o ar contaminado atravessar uniformemente, por meio de um sistema de distribuição de ar, toda a área do enchimento de material orgânico (turfa, casca de pinheiro) ou inerte. Neste leito encontram-se fixos microrganismos que formam o biofilme responsável pela degradação dos contaminantes [14]. Para que a biodegradação ocorra, os odores devem primeiro difundir no biofilme. O bom funcionamento do biofiltro requer um

ambiente propício para o crescimento dos microrganismos, o qual é afetado pela temperatura, humidade, pH e outros fatores ambientais [2].

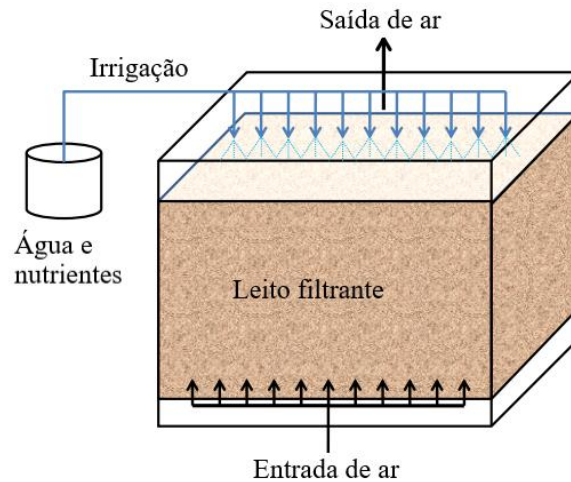


Figura 2.5 – Desenho esquemático da biofiltração. Adaptado de [29].

**d) Biofiltros humidificados (“biotrickling filters”)** – O processo de tratamento combina a lavagem com a degradação biológica numa torre, ilustrado na Figura 2.6. Onde o ar contaminado é forçado a passar pelo enchimento, normalmente de material inerte, onde ocorre primeiro a absorção dos contaminantes na solução de nutrientes e depois degradados no biofilme [14]. A sua principal vantagem em relação aos biofiltros convencionais é a capacidade de controlar a humidade, pH, temperatura, nutrientes e remover os produtos da reação biológica [29]; através da pulverização de um líquido rico em nutrientes, que percola pelo leito para manter as condições ótimas [2].

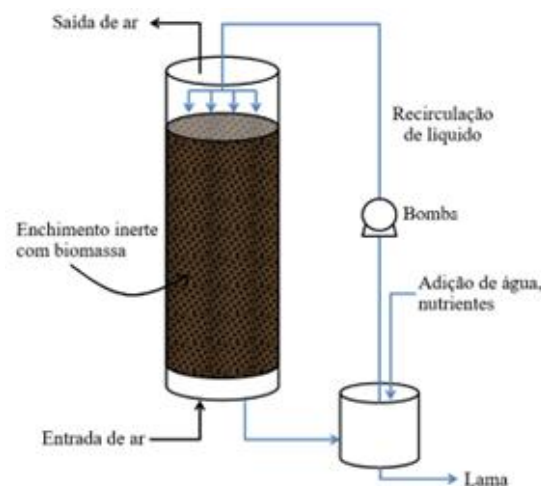


Figura 2.6 – Desenho esquemático de um biofiltro humidificado. Adaptado de [29].

**e) Biofiltro por biomassa em suspensão (“bioscrubber”)** – O processo de lavagem e a degradação biológica é separado em duas unidades interligadas: lavador e reator biológico. Onde primeiro, ocorre a transferência dos contaminantes gasosos para o

líquido de lavagem com biomassa suspensa. Depois, os poluentes absorvidos são biodegradados no reator. Parte deste líquido é recirculado para o lavador e/ou descartado. O lavador possui um enchimento inerte para otimizar o contato ar/líquido [14]. A Figura 2.7 ilustra este processo de tratamento.

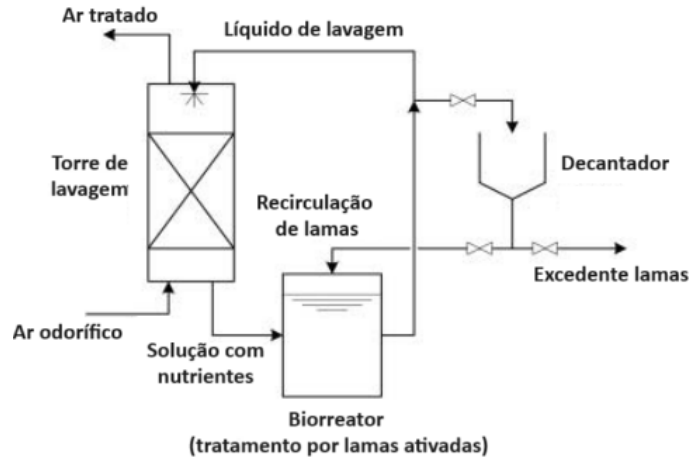


Figura 2.7 – Desenho esquemático da biofiltração por biomassa em suspensão.  
Adaptado de [2].

- f) **Difusão em reatores de lamas ativadas** – A corrente odorífica é diretamente injetada no tanque de arejamento, juntamente com o oxigênio necessário para a oxigenação das águas residuais a tratar, como ilustrado na Figura 2.8. Os microrganismos presentes nas lamas decompõem os compostos odoríferos.

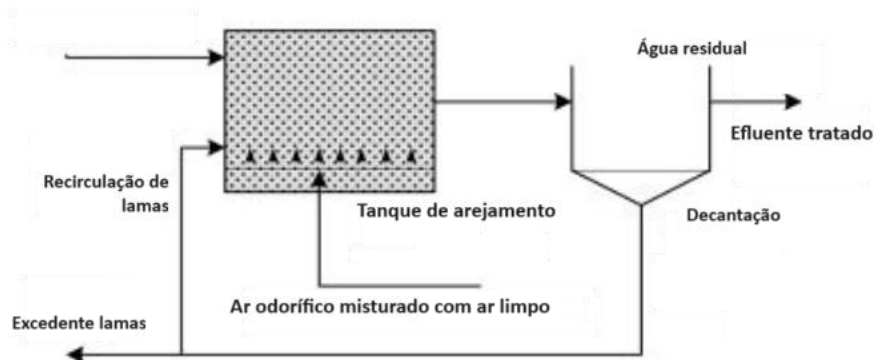


Figura 2.8 – Desenho esquemático da difusão em reatores de lamas ativadas.  
Adaptado de [2].

As tecnologias baseadas na transferência gás/líquido apresentam remoção limitada de compostos pouco solúveis (com constante de Henry elevada). Por isso, é comum usar sistemas de adsorção como etapa de afinação. A combinação de várias tecnologias é recomendada para reduzir custos e/ou alcançar maiores eficiências.

No Quadro 2.7 resumem-se as principais vantagens e desvantagens associadas às tecnologias de desodorização abordadas.

Quadro 2.7 – Vantagens e desvantagens das tecnologias de desodorização [2] [30].

Tecnologia	Custos	Vantagens	Desvantagens
<b>Lavagem química</b> (eficiência de remoção: $H_2S > 98\%$ , mercaptanos $> 90\%$ )	INV: baixos ( $12$ a $55\text{€ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ ) O&M: altos ( $20$ a $94\text{€ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ ) devido ao consumo de reagentes químicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiável e eficaz para elevados caudais e altas ou variáveis concentrações</li> <li>- Baixos tempos de residência (<math>1-2,5s</math>), e por isso baixos requisitos espaciais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usa químicos perigosos</li> <li>- Gera resíduos secundários</li> <li>- Requer manuseamento especializado</li> <li>- Remoção limitada de compostos pouco solúveis (hidrofóbicos)</li> </ul>
<b>Sistemas de adsorção</b> (eficiência de remoção: COV hidrofóbicos $90-99\%$ )	INV: altos ( $15$ a $120\text{€ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ ) O&M: moderados ( $10$ a $35\text{€ m}^{-3} \text{h}^{-1}$ ) pelo alto custo da substituição do filtro, que diminui se for regenerado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mecanismo simples</li> <li>- Alta eficiência de remoção de baixas concentrações de odores, em especial de compostos hidrofóbicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tempo de vida curta (6 meses)</li> <li>- Requer pré-tratamento para remoção de humidade e poeiras</li> <li>- Performance limitada com <math>NH_3</math></li> </ul>
<b>Difusão em reatores de lamas ativadas</b> (eficiência de remoção: $H_2S > 90\%$ )	INV: baixos (se se puderem utilizar os compressores e difusores de ar existentes)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo simples e eficiente</li> <li>- Capacidade para gerir altos caudais</li> <li>- Ideal para plantas com tratamento de lamas ativas e pouco espaço</li> <li>- Não se controla o pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possível corrosão dos equipamentos</li> <li>- Falta de dados sobre o tratamento de compostos além do <math>H_2S</math></li> </ul>

Quadro 2.7 (continuação) – Vantagens e desvantagens das tecnologias de desodorização [2] [30].

<b>Biofiltros</b> (eficiência de remoção: H <sub>2</sub> S 90-100%)	INV: baixos a moderados (5 a 68 m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) O&M: baixos	- Simples operar e fazer a manutenção - Alta eficiência de remoção para grandes caudais com baixas concentrações de odor	- Dependendo do tipo de enchimento (2 a 5 anos) - Tecnologia que requer mais espaço (tempos de residência e perdas de carga elevados) - Inapropriado para concentrações altas ou variáveis - Difícil controlar parâmetros biológicos (humidade, pH) - Compactação e obstrução do filtro devido acumulação de biomassa - Sensível a fatores externos
<b>Biofiltros humidificados</b> (eficiência de remoção: H <sub>2</sub> S até 100%)	INV: baixos (5 a 20€ m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) O&M: baixos, mas mais altos que o biofiltros	- Simples de controlar a operação e fazer a manutenção - Capaz de tratar maiores caudais que os biofiltros - Tempos de residência comparáveis às tecnologias físico-químicas	- Risco de o filtro obstruir quando trata altas concentrações de odores
<b>Biomassa em suspensão</b> (eficiência de remoção: H <sub>2</sub> S até 99%)	INV: altos (23 a 92€ m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> ) O&M: baixos, mas mais altos que os biofiltros húmidos	- Estabilidade operacional - Capaz de tratar caudais com altas concentrações de odor - Baixa perda de carga	- Manutenção e operação relativamente complexa - Remoção limitada de compostos pouco solúveis (hidrofóbicos)

## **2.4. Boas práticas**

Nos últimos anos, têm sido publicados diversos artigos detalhados sobre a otimização de sistemas de desodorização e ventilação de ETAR [3] [32] [33]. Os autores nestes artigos apresentam casos de estudo específicos, abordando e solucionando problemas de odor ao propor mudanças nesses sistemas. Estes documentos, juntamente com outros, constituem fontes relevantes de informação. Embora cada ETAR e problema de odor sejam únicos, é comum encontrar semelhanças na abordagem de resolução desses problemas. Nesta seção, serão apresentadas boas práticas na concepção e exploração para estes sistemas.

### **2.4.1. Boas práticas na concepção**

Para evitar a corrosão e garantir o ambiente adequado para os trabalhadores é necessário captar os odores, para isso temos de aproximar a boca da aspiração da fonte emissora, pois ao contrário da insuflação a zona de extração é muito limitada. Por isso sempre que possível deve-se dar a preferência à captura direta. A energia necessária para operação diminui com a redução de caudais, por isso deve-se enclausurar a fonte de emissão, minimizar volume dos edifícios e cobrir órgãos ao nível do plano de água. Quando não é possível enclausurar os órgãos que libertam odores devem ser envolvidos por edifícios. Nestes espaços deve-se preconizar a insuflação no lado oposto ao local onde se faz a aspiração de ar viciado, para promover um varrimento adequado no sentido da extração de ar, diminuir zonas mortas e permitir a ventilação mínima em eventuais paragens do sistema.

### **2.4.2. Boas práticas na exploração**

A eficácia e eficiência dos sistemas de ventilação e desodorização ajuda a ser garantida através das seguintes medidas:

- i. verificar se os componentes estão a funcionar e com a manutenção adequada;
- ii. instalar sensores fixos à entrada e saída da tecnologia de desodorização para medir a concentração de odores ou de um componente odorífero específico, de forma a ajustar o funcionamento da tecnologia;
- iii. ter duplicações de acessórios e de tubagens para evitar a interrupção do sistema em caso de avaria;
- iv. instalar registos e grelhas reguláveis para regular e seccionar caudais de ar;
- v. instalar portas de visita nas condutas para remover as sujidades;
- vi. prever purgas de condensados para proteger o ventilador, especialmente em troços enterrados por serem de difícil acesso;

- vii. substituir o enchimento das tecnologias de desodorização por um material com menor perda de carga e garantir a sua limpeza;
- viii. automatizar as torres químicas, incluindo a renovação automática das soluções, a adição de reagentes de acordo com as concentrações de odor à saída e o controlo do caudal da solução de lavagem para alertar a colmatção dos aspersores.

## 3. CASO DE ESTUDO

### 3.1. Introdução

A ETAR de Frielas, sob a exploração da SIMTEJO, localizada em Loures, trata águas residuais domésticas e industriais provenientes de uma rede de coletores que abrange parte dos concelhos de Amadora, Lisboa, Loures, Odivelas, Sintra e Vila Franca de Xira e descarrega o efluente tratado na Ribeira da Póvoa, um afluente do Rio Trancão. A ETAR tem capacidade para 700.000 habitantes equivalentes (cerca de 70.000 m<sup>3</sup>/dia).

Na Figura 3.1 apresenta-se o diagrama simplificado do funcionamento da ETAR de Frielas, que preconiza a seguinte sequência de operações e processos para cada fase de tratamento:

- Tratamento da fase líquida: elevação com parafusos Arquimedes em dois estágios, gradagem (grossa, média e fina), desarenação/ desengorduramento, decantação primária lamelar com tratamento físico-químico, elevação intermédia com parafusos Arquimedes, equalização, sistema de lamas ativadas em média carga com arejamento, decantação secundária, biofiltração e desinfecção por radiação ultravioleta. No final, a água tratada é libertada na Ribeira da Póvoa.
- Tratamento da fase sólida: espessamento gravítico das lamas primárias e flotação das lamas biológicas, mistura das lamas espessadas e flotadas, estabilização biológica e desidratação em centrífugas (com floculante). No final do processo as lamas são armazenadas em silos, que descarregam em camiões para serem utilizadas, geralmente, na valorização da agricultura, ou para compostagem ou incineração. As escorrências do tratamento são encaminhadas para a obra de entrada da ETAR.
- Tratamento da fase gasosa
  - Consiste na valorização do biogás gerado na estabilização das lamas para aquecer os digestores de lamas, e gerar energia elétrica. O biogás excedente é queimado. A regularização da alimentação é feita por gasómetros.
  - Tratamento de odores é feito na fase líquida desde a elevação inicial até à equalização e toda a zona de processamento da fase sólida. Este tratamento é feito por cinco sistemas de extração e desodorização química, de um ou dois estágios, os locais e órgãos pertencentes a cada um dos sistemas estão circulados em linha tracejada no esquema apresentado na Figura 3.1.

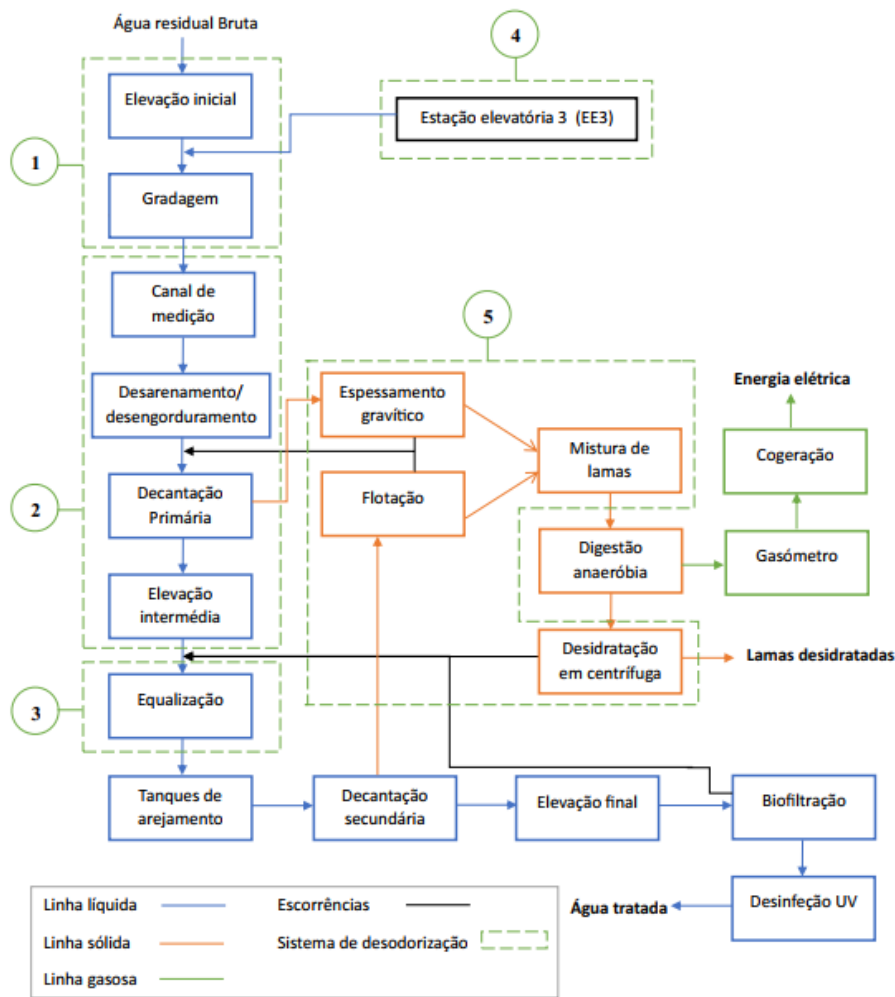


Figura 3.1 – Esquema geral de funcionamento da ETAR de Frielas.

Na Figura 3.2 identifica-se a localização de cada uma das áreas/órgãos de tratamento da ETAR de Frielas.



Figura 3.2 – ETAR de Frielas. Adaptado de Google Earth [34].

### 3.2. Descrição detalhada

A estação de tratamento de águas residuais de Frielas encontra-se inserida na malha urbana, próxima de áreas residenciais e comerciais, como o Ikea de Loures, e exigindo, por isso, um controlo de odores eficaz para evitar que surjam incómodos na comunidade (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Envolveria da ETAR de Frielas.

Durante as visitas à ETAR, foi identificado um problema grave de odores em áreas onde o ar é supostamente tratado, como na área de manuseamento de lamas, pré-tratamento e decantação primária. Como detetaram-se problemas mais graves nas últimas duas zonas este trabalho focou a análise no sistema de ventilação e desodorização da zona do tratamento da fase líquida desde a elevação inicial até à elevação intermédia (sistema 1 e 2 circulado a tracejado na Figura 3.1), para propor melhorias que aumentem a eficiência do sistema.

Na Figura 3.4, apresenta-se a configuração das linhas de ventilação da zona de estudo, incluindo os valores dos caudais de extração de ar preconizados e o tipo de ventilação (localizada ou geral) em cada área/órgão de tratamento. Cada linha é equipada com uma torre de lavagem química e um ventilador centrífugo, com um débito de 20.000 m<sup>3</sup>/h. O ar é transportado por um sistema de condutas em polipropileno (PP), com pontos de purga de condensados nos pontos mais baixos da rede. A tubagem é enterrada sempre que passa por áreas relvadas e pela estrada.

A extração localizada é executada pela extração direta de ar das coberturas dos órgãos/áreas de tratamento, por meio de tubagens equipadas com registo. Enquanto a extração geral é feita através de grelhas com laminas verticais, não reguláveis, junto ao teto do espaço, a insuflação é realizada de forma natural por meio de grelhas exteriores, normalmente localizadas junto ao chão e janelas.

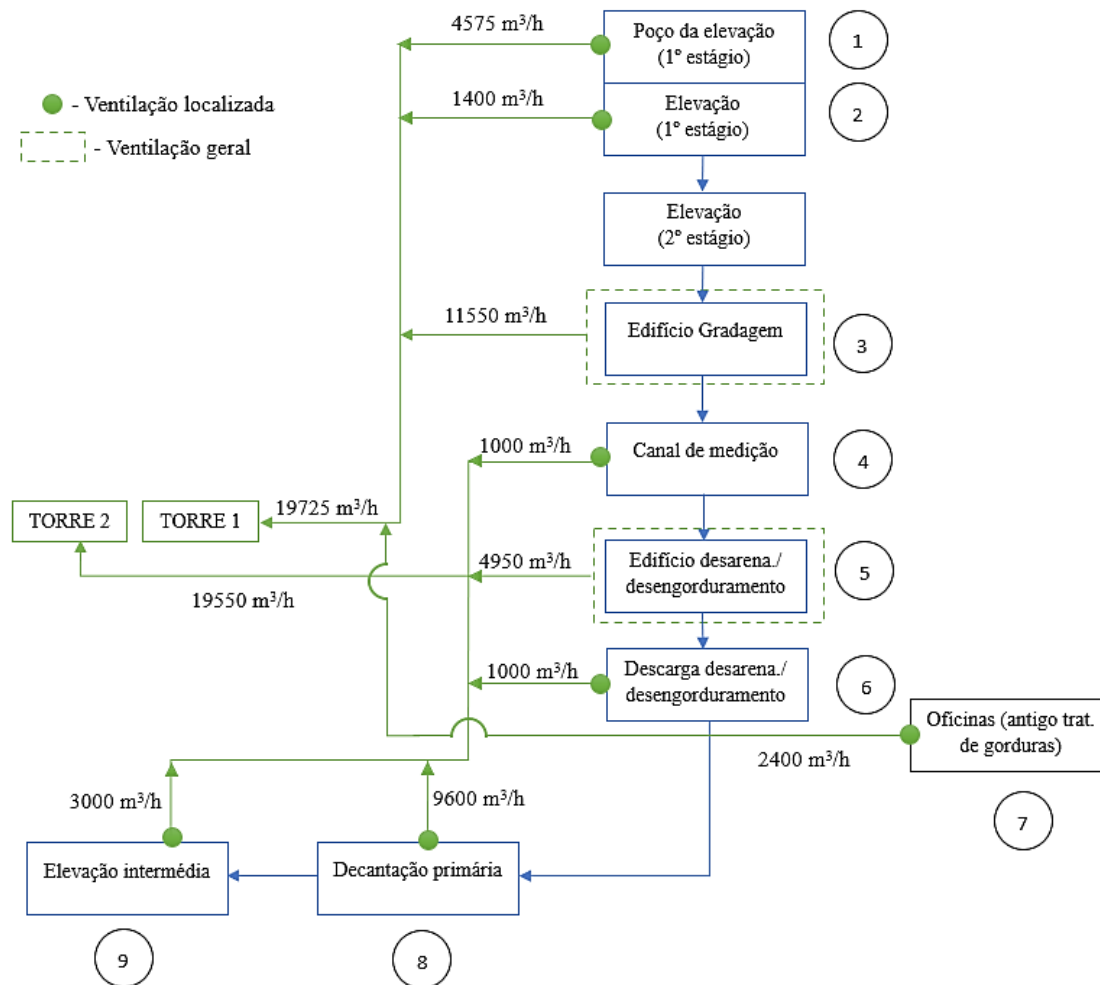


Figura 3.4 – Esquema simplificado dos sistemas de ventilação e desodorização em estudo.

As torres de lavagem, as cubas de armazenamento de reagentes, os ventiladores e bombas, bem como o automatismo que controla todo o funcionamento da desodorização, encontram-se todos situados num edifício, cuja localização, assim como a imagem das torres de lavagem, é apresentada na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Localização dos ventiladores e equipamentos de desodorização (à esquerda) e torres de lavagem química (à direita).

Em Fevereiro de 2008, foi elaborado o projeto de execução da remodelação da etapa de gradagem da ETAR de Frielas. Antes dessa data, cerca de 20.000 m<sup>3</sup>/h de ar da elevação inicial, do edifício de gradagem e do tratamento de gorduras (atuais oficinas) eram tratados em duas torres de lavagem em série. Com a remodelação, novos locais foram incluídos – canal de medição, edifício de desarenamento, decantador primário e elevação intermédia, o que levou à atribuição de uma torre para tratar o ar das áreas iniciais (com o ventilador inicial) e a outra, das novas áreas (com um novo ventilador), mantendo-se o tratamento de 20.000 m<sup>3</sup>/h em cada torre. De acordo com as placas de especificações dos ventiladores apresentadas na Figura 3.6, o ventilador centrífugo da torre 1 apresenta uma potência de 30 kW, pressão total de 298 mm H<sub>2</sub>O (1 mm H<sub>2</sub>O equivalente a 9,8 Pa), resultando numa pressão total de 2.920 Pa, e débito de 20.000 m<sup>3</sup>/h, enquanto a Torre 2 possui um ventilador centrífugo com potência de 22 kW, pressão estática de 2.000 Pa e débito de 20.000 m<sup>3</sup>/h. O que resulta numa potência específica de 5,40 kW/(m<sup>3</sup>/s) para ventilador da torre 1 e de 3,96 kW/(m<sup>3</sup>/s) para o ventilador da torre 2.

A curva de funcionamento do ventilador da Torre 1 encontra-se no Anexo A, enquanto a curva do ventilador da Torre 2 apresenta-se no Anexo B

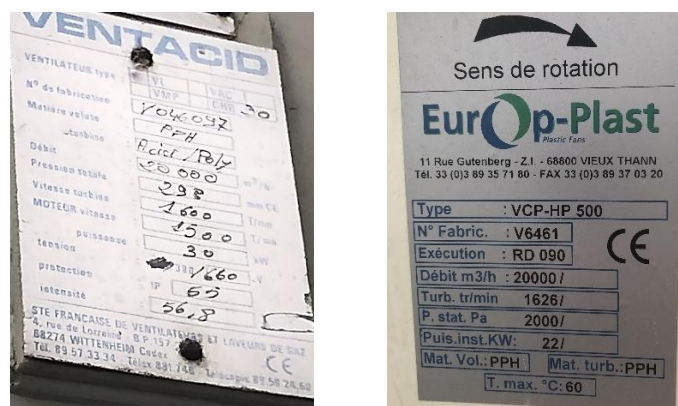


Figura 3.6 – Placa de especificações do ventilador da torre 1 (esquerda) e da torre 2 (direita).

A Torre 1 e 2 podem funcionar com bypass e realizam a lavagem oxidante com soda cáustica (NaOH, 30%), para absorção dos sulfuretos e dos mercaptanos, em simultâneo com a lavagem básica, hipoclorito de sódio (NaOCl, 14%), para a absorção dos produtos de oxidação e ácidos orgânicos. A recirculação da solução de lavagem é assegurada por um grupo eletrobomba de eixo horizontal e a reposição de reagentes nos depósitos da base das torres é feita por bombas doseadoras, com funcionamento automático, em função do valor do pH na lavagem básica e do potencial redox na torre de lavagem oxidante. As cubas de armazenamento possuem indicadores de nível baixo que desligam as bombas doseadoras. No sistema de supervisão apenas se consegue visualizar o estado dos equipamentos (parado/ funcionamento) e os valores de pH e do potencial redox.

### 3.3. Metodologia de Trabalho

O presente trabalho abrangeu as seguintes etapas para resolver o problema da ineficiência do sistema de ventilação e desodorização da ETAR de Frielas:

#### 1ª Etapa: Caracterização do estado atual do sistema de desodorização e ventilação

1. Recolha e análise de documentos revelantes para o estudo, que incluíram: Manual de Funcionamento da ETAR de Frielas, plantas da arquitetura, esquemas de funcionamento, configuração do sistema de desodorização e ventilação;
2. Inspeção visual das condições de funcionamento da rede, identificando as deficiências do sistema. Isto incluiu avaliar o estado de limpeza e manutenção do edifício e dos componentes do sistema (se muito ou pouco degradado), identificar fontes de odor e verificar se as entradas e saídas de ar estão corretamente situadas.
3. Medição de velocidades e pressão manométrica no interior das condutas para comparação com os valores que foram projetados, utilizando um anemómetro de fio quente equipado com um tubo de Pitot (modelo TA400 da marca TROTEC). Este equipamento, ilustrado na Figura 3.7, é projetado para medir velocidades do ar na faixa de 1 a 80 m/s, com uma precisão de  $\pm 2,5\%$  a 10 m/s e uma resolução de 0,01 m/s. A pressão é medida numa escala de 0 a 5.000 Pa, com uma precisão de  $\pm 0,3\%$  a  $+25\text{ }^\circ\text{C}$  e uma resolução de 1 Pa.



Figura 3.7 – Anemómetro de fio quente usado na medição das pressões/velocidades.

A precisão da sonda depende da uniformidade da velocidade do ar no interior da conduta, pelo que deve ser colocada em troços retos, afastada dos acessórios da rede (curvas, desvios, etc.), para minimizar o efeito da turbulência no escoamento do fluido. Este afastamento deve ser de 10 vezes o diâmetro da conduta, conforme esquematizado na Figura 3.8, imediatamente a seguir aos acessórios (no sentido do escoamento), ou de 4

vezes o diâmetro antes dos acessórios [35]. Os pontos de medição foram feitos, quando necessários, com um berbequim.

Para medir a velocidade inseriu-se o tubo de Pitot no interior das tubagens e deslocou-se transversalmente ao longo do diâmetro devido à não uniformidade do escoamento. Leu-se as velocidades após alguns segundos, pois as medições tendem a oscilar devido à turbulência, e foram registados os valores médios. Multiplicando a velocidade média do ar pela secção transversal da conduta determinou-se o caudal de ar em cada ponto de amostragem. Em relação à pressão diferencial, esta foi medida inserindo-se um dos tubos dentro do escoamento do ar pelo orifício da conduta, e o segundo tubo fora da conduta.

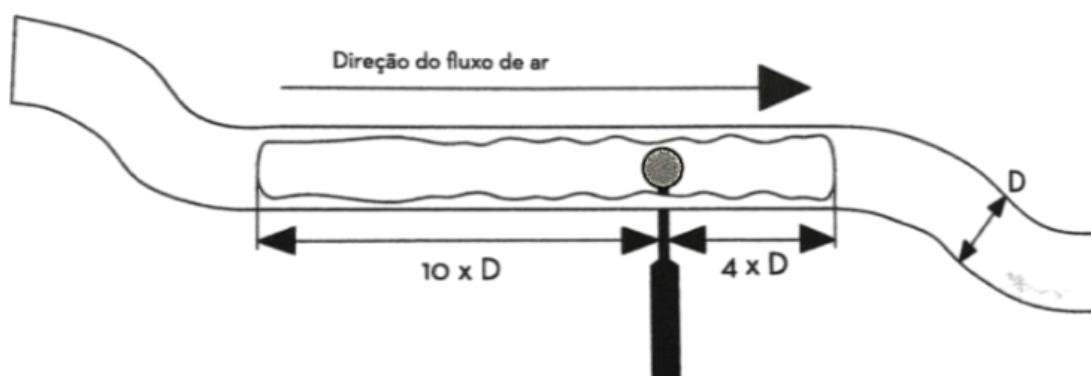


Figura 3.8 – Medição do fluxo de ar em condutas [35].

Nas visitas, por questões de segurança, foram realizadas com um aparelho de medição de H<sub>2</sub>S para monitorar em tempo real os níveis deste gás.

## 2ª Etapa: Projeto das recomendações para otimizar o desempenho do sistema

1. Comparar os valores medidos com os valores projetados para perceber se o sistema está a funcionar como pretendido. Caso contrário, identificar as causas para da ineficiência e relacioná-las às deficiências identificadas no sistema;
2. Identificadas as áreas com necessidades de melhoria ou alterações, procede-se à elaboração de recomendações para otimizar o desempenho do sistema.

## 3.4. Inspeção de campo

Na inspeção de campo realizada na ETAR de Frielas em setembro de 2023, foram medidos os valores da velocidade e pressão manométrica, e calculado o caudal de ar em cada local de amostragem ilustrado na Figura 3.9 para a linha da torre 1 e 2. Contudo, como o ventilador da linha da torre 2 encontra-se inoperacional, não foi possível obter valores para este sistema. Os resultados das medições encontram-se no Quadro 3.1.

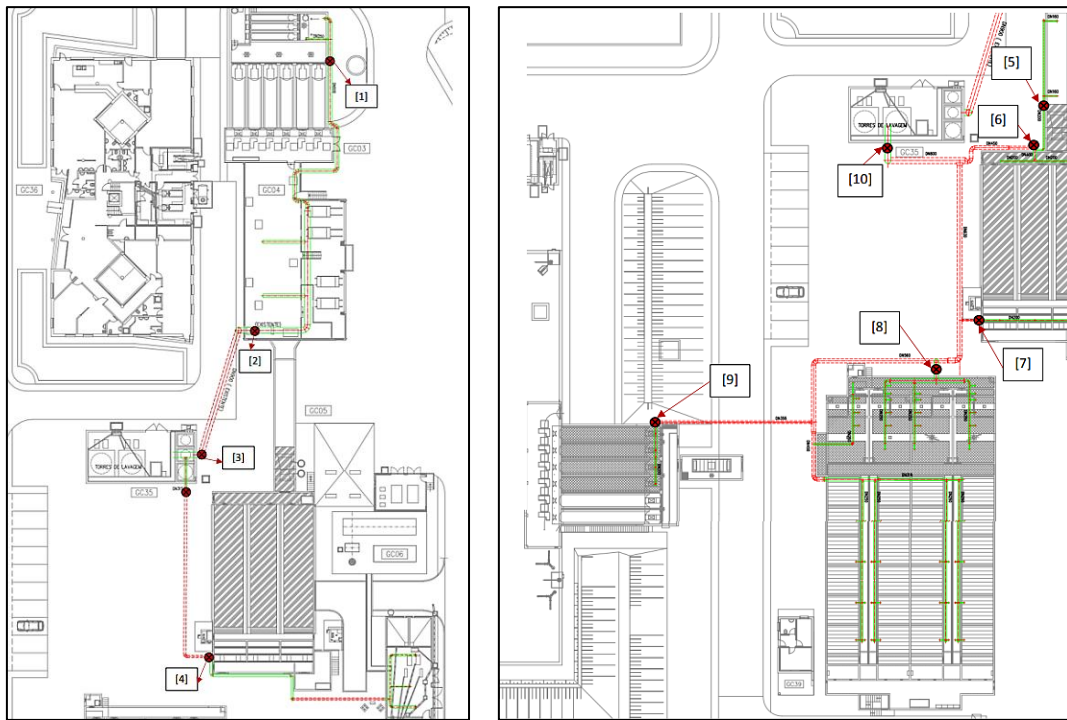


Figura 3.9 – Locais de amostragem na linha da Torre 1 (esquerda) e na linha da Torre 2 (direita).

Quadro 3.1 – Resultados da medição de velocidades e pressões.

Verificações	Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	Velocidade (m/s)	Pressão relativa [Pa]	Caudal calculado [m <sup>3</sup> /h]
<b>Torre 1</b>					
(1) Elevação inicial	500	490	18,73	-224	12.220
(2) Gradagem	900	880	8,23	-1.180	18.000 (5.780 na gradagem)
(3) Entrada no edifício de desodorização	900	880	*	-1.274	18.000
(4) oficinas	315	307	11	-880	2.931
Total (3) + (4)	900	880	-	-	20.931
<b>Torre 2</b>					
(5) Canal Parshall	200	194	0		
(6) Desarenador/ desengordurador	400	390	0		
(7) Canal de descarga do desarenador/desengordurador	250	244	0		
(8) Decantador primário	560	540	0		
(9) Elevação intermédia	355	345	0		
(10) Total	800	736	0		

Nota: \* não é revelante medir velocidade devido à proximidade ao ventilador.

Durante a inspeção, foram identificadas diversas deficiências nos sistemas de extração de ar das torres 1 e 2. De forma geral, as condutas exteriores, inclusive as picagens, encontram-se todas bastante degradadas estruturalmente. O material em plástico PP (polipropileno) está ressequido pelo sol e com falhas, para além de existirem suportes corroídos e partidos.

A tubagem que atravessa o relvado ou a estrada é enterrada, indicado pelas linhas vermelhas na Figura 3.9. Embora essa instalação seja esteticamente agradável, dificulta o controlo de condensados e o acesso para manutenção. Também se notou que as tubagens que ligam o edifício de gradagem ao edifício de desodorização (entre os pontos de amostragem 2-3, mostrados na Figura 3.9) e os decantadores primários ao edifício de desodorização (entre os pontos de amostragem 8-10) não tem caixas de drenagem.

Especificamente, as principais deficiências observadas em cada local de extração de ar foram:

### **1. Elevação inicial**

A elevação inicial tem três zonas: poço do primeiro estágio, 1º estágio e 2º estágio de parafusos de Arquimedes. Todas as zonas cobertas, mas apenas nas duas primeiras é extraído ar para tratamento, faltando preconizar a extração no 2º estágio. Além disso as condutas apresentam danos e desgaste físico com a existência de condensados à saída, como se pode visualizar na Figura 3.10. Durante a visita não se teve acesso ao interior desses espaços, não tendo sido detetados odores no exterior.



Figura 3.10 – Ventilação da elevação inicial com conduta estalada e com condensados à saída.

### **2. Edifício da gradagem**

Este edifício possui um poço de sólidos grossos, após o qual a água é direcionada para quatro canais cobertos, cada um passa por uma grade e um tamisador. A remoção dos gradados é feita por uma garra que os coloca num contentor. No caso dos tamisadores, os resíduos são transportados por tapetes rolantes aos contentores. O poço de grossos foi construído após a implementação do sistema de ventilação, tornando-se numa fonte adicional de odores não

controlada. É limpo com uma garra que transporta os resíduos para um contentor exterior, sendo necessário manter o portão semiaberto (cerca de 4 m<sup>2</sup>) para a sua passagem, o que causa fugas para o exterior. Além deste portão, os dois portões principais do edifício encontram-se permanente abertos para permitir a entrada de ar e assegurar uma atmosfera segura. Adicionalmente, a porta metálica junto ao portão do poço está partida na parte de baixo. A ventilação do edifício é feita por 20 grelhas distribuídas em dois ramais paralelos. Estas grelhas estão obstruídas com gordura, impossibilitando a adequada extração de ar.

As deficiências identificadas estão apresentadas na Figura 3.11 e Figura 3.12. Além das deficiências mencionadas anteriormente, identificaram-se ainda as seguintes deficiências:

- Falta de pontos de extração em pontos de origem de gás sulfídrico: sobre os contentores de gradados situados no lado oposto aos portões; no piso gradeado que cobre os canais; na zona dos tamisadores;
- As grelhas não são reguláveis, impossibilitando a secção de caudais.
- Ponto na conduta com perda de carga significativa para fazer o desvio da calha;
- O contentor do poço dos grossos encontra-se no exterior sem cobertura;
- O escoamento de lixiviados dos contentores não é devidamente drenado e limpo, tornando-se uma fonte crítica de odores.



Figura 3.11 – Edifício de gradagem: portões abertos, escorrência de lixiviados, grelhas obstruídas e desvio com perda de carga acentuada.



Figura 3.12 – Edifício de gradagem: contentor sem cobertura e porta partida, grades e tamisador.

### 3. Oficinas

As oficinas (Figura 3.13), antigo tratamento de gorduras, não tem ar contaminado para extrair, pelo que será considerado o encerramento da sua conduta de extração.

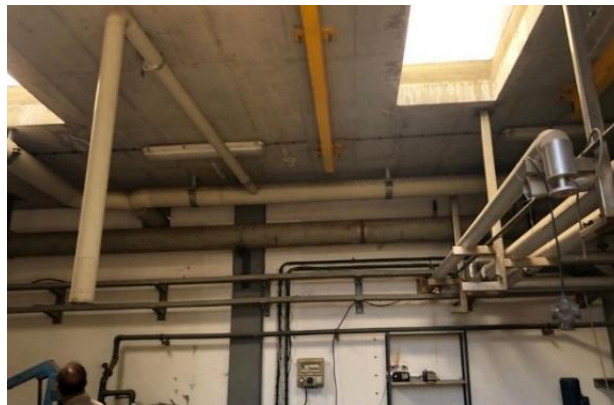


Figura 3.13 – Ventilação das oficinas.

### 4. Canal de medição

As condutas de ventilação do canal de Parshall (Figura 3.14) apresentam desgastes físicos podendo levar ao escape de odores. A ventilação encontra-se inoperacional.



Figura 3.14 – Ventilação do Canal de Parshall.

## 5. Edifício do desarenamento/desengorduramento

Os três tanques de desarenamento/desengorduramento são envolvidos por coberturas em “Sandwich” sobre sistema autoportante. A cobertura encontra-se severamente corroída devido à acumulação de gás sulfídrico e possui várias aberturas por onde há fugas de odor (Figura 3.15). Além disso a sua ventilação encontra-se inoperacional. As condutas têm as grelhas não reguláveis obstruídas com gordura e não existem pontos de extração adequados à extensão do edifício, como se mostra na Figura 3.16 resultando em zonas mortas.

A contentorização de resíduos dos dois classificadores/lavadores de areias e do concentrador de gorduras é feita a céu aberto (Figura 3.16), gerando odores não controlados.



Figura 3.15 – Edifício do desarenamento/desengorduramento corroído.



Figura 3.16 – Ventilação do edifício do desarenamento/desengorduramento: espaço com falta de pontos de extração, grelhas obstruídas sem regulação, contentorização sem cobertura.

## 6. Canal de descarga

À frente do edifício do desarenamento/ desengorduramento, encontra-se o seu canal de descarga (Figura 3.17) com 3 condutas dedicadas muito degradadas estruturalmente pelo sol. A ventilação encontra-se inoperacional.



Figura 3.17 – Picagens do canal de descarga.

## 7. Decantação primária

Os decantadores primários encontram-se com as coberturas levantadas e as condutas dedicadas partidas, como se constata na Figura 3.18, devido ao aumento inesperado do nível de água e à falta de manutenção. A ventilação encontra-se inoperacional.



Figura 3.18 – Decantadores primários com coberturas levantadas e condutas partidas.

## 8. Elevação intermédia

Na elevação intermédia (Figura 3.19) existem 4 extrações locais, uma por parafuso, todas em avançado estado de degradação. A ventilação encontra-se inoperacional.



Figura 3.19 – Ventilação da elevação intermédia.

## 9. Edifício de desodorização

Existem três entradas de condutas no edifício de desodorização como se mostra na Figura 3.20, nas quais estão identificados os pontos de amostragem correspondentes. A conduta junto ao ventilador, que transporta a ar da elevação inicial e da gradagem, e onde fez a verificação número (3), encontra-se succionada e com fissuras reparadas com material tipo PEAD (polietileno de alta densidade) extrudido.

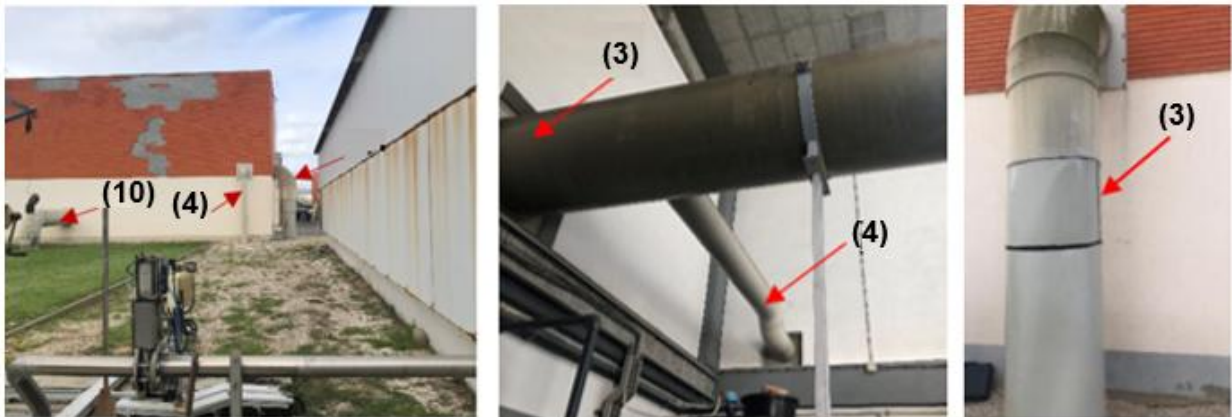


Figura 3.20 – Entrada de condutas no edifício de desodorização e a conduta deformada.

O ventilador da torre 2 está desligado devido a danos na rede de condutas. Além disso as Torres 1 e 2, também não estão em funcionamento, porque o sistema de recirculação e os reagentes estão fora de serviço. Assim, o ar extraído pela Torre 1 é descarregado diretamente pelo bypass, sem passar pelo tratamento de odores.

## 4. PROPOSTA DE MELHORIAS

Neste capítulo procura-se compreender as razões que possam justificar diferenças entre os valores obtidos e os projetados, e propor soluções para a resolução das deficiências identificadas.

### 4.1. Projeto

Primeiro, verificou-se se o caudal previsto no projeto está a ser extraído através das medições em campo, cujos resultados estão apresentados no Quadro 3.1.

Através da configuração do projeto determinou-se a perda de carga total da rede, que corresponde ao percurso com maior perda de carga e é o valor que o ventilador terá de superar, juntamente com as perdas a jusante (circuito ventilador-torre-exaustão). Os resultados do cálculo encontram-se no Quadro 4.1, enquanto a divisão do sistema em troços e o processo do cálculo estão no Apêndice A.

Quadro 4.1 – Resultados do cálculo da perda de carga teórica das redes de projeto.

Troço	Perda de carga da linha da torre 1 [Pa]	Perda de carga da linha da torre 2 [Pa]
Conduitas	558	1.039
Do ventilador à torre	80	79
Torre	350	350
Chaminé de exaustão (mais transição)	99	97
Total (com fator de segurança 20% <sup>a</sup> )	1.305	1.761

<sup>a</sup> fator de segurança contabiliza a acumulação de sujidade e eventuais alterações na instalação de condutas

Na Figura 4.1 apresenta-se um gráfico comparativo dos valores dos caudais preconizados e reais em cada espaço, bem como o total extraído pelo ventilador. Esta comparação só foi feita para a rede da Torre 1 porque o ventilador da rede da Torre 2 encontra-se inoperacional.

De acordo com o gráfico, o caudal extraído na gradagem é cerca de 53% inferior ao valor de projeto, devido à acumulação visível de gorduras nas grelhas e à sujidade no interior das condutas. O aumento na resistência dos ramais da gradagem e a perda de carga provocada pelo desvio do percurso da conduta para contornar a calha da garra, resultou numa pressão estática a montante do ventilador de 1.274 Pa, mais do que o dobro do valor calculado para as perdas de carga da rede projetada, que ainda considera perdas do circuito ventilador-torre-

exaustão Além disso, levou ao desequilíbrio de caudais no sistema: na elevação inicial, a extração é 104% maior e nas oficinas é 22% superior.

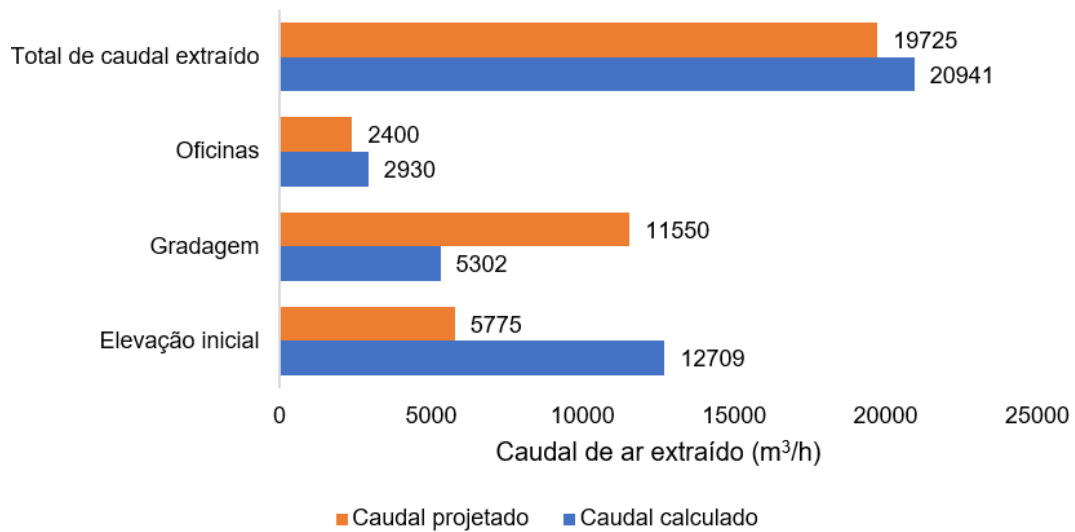


Figura 4.1 – Resultados da medição dos caudais totais de ar extraídos da linha da Torre 1.

## 4.2. Melhorias recomendadas

De modo geral, as fugas excessivas de odor são resolvidas garantindo que as coberturas, incluindo portas e portões, sejam mantidas fechadas para assegurar a contenção e que não existam quaisquer fontes predominantes de odor não controladas.

Atualmente, a linha da torre 1 extrai ar da elevação inicial (poço do 1ºestágio e 1ºestágio), do edifício da gradagem e das oficinas. Face às deficiências identificadas, propõem-se as melhorias apresentadas na Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Linha da Torre 1: Deficiências e melhorias.

Etapa	Deficiências	Melhorias
	<b>Ventilação</b>	
<b>Elevação inicial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Segundo estágio de elevação encontra-se coberto, mas sem extração de odores;</li> <li>- Condensados à saída;</li> <li>- Não existem dispositivos para ajustar o caudal nos pontos de extração.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Preconizar a extração do segundo estágio de elevação (espaço não visitável);</li> <li>- Prever ponto para purga de condensados;</li> <li>- Adicionar um registo após cada ponto de extração de ar.</li> </ul>

Quadro 4.2 (continuação) – Linha da Torre 1: Deficiências e melhorias.

<b>Contenção</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os 2 portões principais estão permanentemente abertos para os diluir odores;</li> <li>- 1 portão precisar de estar semiaberto (abertura com cerca de 4 m<sup>3</sup>) para a passagem da garra com detritos para o contentor no exterior;</li> <li>- Porta metálica partida;</li> <li>- Zonas com piso gradeado sobre os canais.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantê-los fechados e substituí-los por portões de inox deslizantes com grelhas junto ao chão para facilitar a captação de ar pelo efeito de varrimento;</li> <li>- Cobrir o espaço onde se encontra o contentor, integrando-o com o edifício; e/ou separar o espaço do poço através de uma divisória;</li> <li>- Substituir/arranjar porta;</li> <li>- Substituir os pisos gradeados por pisos fechados.</li> </ul>
<b>Ventilação</b>	
<b>Gradagem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adição do poço dos grossos, após a implementação do sistema de ventilação;</li> <li>- Falta de repartição de pontos de extração pelas fontes de odor;</li> <li>- Os lixiviados escorrem dos contentores dentro do edifício são uma fonte de odores;</li> <li>- Obstrução das grelhas com gorduras e poeira;</li> <li>- Falta de dispositivos de regulação de caudal.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar as renovações horárias;</li> <li>- Instalar pontos de extração sobre os canais (na área do piso gradeado), contentores, tamisadores e tapetes;</li> <li>- Implementar uma rede de pulverizadores alimentados por água tratada pela ETAR para limpar e escoar os lixiviados, em vez de depender da limpeza manual com mangueiras;</li> <li>- Colocar novas grelhas, ter uma rotina de limpeza e instalar caixas de visita;</li> <li>- Usar grelhas reguláveis e registos por cada extração localizada.</li> </ul>
<b>Oficinas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O tratamento de gorduras foi substituído pelas oficinas, deixou de haver produção de odores.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamponar a conduta de extração. Se necessário, instalar um ventilador de parede para a extração térmica.</li> </ul>
<b>Geral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A conduta que atravessa a estrada não tem purga de condensados;</li> <li>- Torre inoperacional, com sistema de recirculação e reagentes fora de serviço.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adicionar caixa de drenagem;</li> <li>- Inspeccionar torre e seguir o plano de manutenção/limpeza. Substituir os controladores de pH/potencial de redox, e arranjar o sistema de recirculação.</li> </ul>

Em relação às melhorias na gradagem propostas na tabela anterior, que incluem a instalação de pontos de extração nos tamisadores e a substituição dos portões, a Figura 4.2 ilustra o

modelo do portão de inox deslizante a ser instalado a ser equipado apenas com grelhas junto ao chão, e o ponto de extração sugerido a ser utilizado do tamisador.



Figura 4.2 – Tipo de portão inox deslizante a instalar e ponto de extração do tamisador

Em relação à linha da Torre 2, que atualmente não se encontra em funcionamento, propõem-se as melhorias apresentadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Linha da Torre 2: Deficiências e melhorias.

<b>Desarenamento/ desengorduramento</b>	<b>Contenção</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cobertura está em estado crítico, com zonas corroídas e aberturas, com risco de desabar;</li> <li>- Contentores de areias e de flutuantes não se encontram cobertos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Substituição da cobertura atual por uma nova em material resistente à corrosão, como alumínio ou aço pré-lacado;</li> <li>- Cobrir espaço dos contentores.</li> </ul>
	<b>Ventilação</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de pontos de extração adequados à dimensão do espaço;</li> <li>- Espaço dos contentores das areias e flutuantes sem extração de odores;</li> <li>- Obstrução das grelhas com gorduras e poeira, e falta de regulação de caudal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalar as três condutas inicialmente projetadas sobre os tanques e o mais próximo possível destes, sem interferir com a operação das pontes raspadoras;</li> <li>- Prever a extração e tratamento de ar do espaço dos contentores;</li> <li>- Colocar novas grelhas reguláveis e instalar caixas de visita.</li> </ul>
<b>Decantação primária</b>	<b>Contenção</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tanques tem as coberturas levantadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encerrar tanques, recolocando a cobertura amovível.</li> </ul>

Quadro 4.3 (continuação) – Linha da Torre 2: Deficiências e melhorias

	<b>Ventilação</b>	
<b>Decantação primária</b>	- Conduatas degradadas pelo sol e partidas devido aumento inesperado do nível de água.	- Refazer/substituir todo o circuito de extração, incluindo registos; - Considerar o uso de conduatas flexíveis para a extração através das coberturas.
<b>Geral</b>	- Ventilador inoperacional devido a danos na rede - Conduatas exteriores estão desgastadas pelo sol; - Conduatas enterradas na relva complica o controlo e manutenção; - Torre com sistema de recirculação e reagentes fora de serviço.	- Refazer as conduatas com material mais resistente à exposição solar; - Elevar conduatas enterradas sob pórticos; - Novos controladores de pH/potencial de redox, arranjar o sistema de recirculação. - Inspeccionar torre e seguir o plano de manutenção/limpeza.

Além das melhorias propostas, destaca-se que a manutenção eficaz poderia ter evitado diversas deficiências apontadas. Manutenção esta que deve incluir [11]:

- i. Inspeções visuais completas: avaliar o estado de limpeza, desgaste, e integridade das coberturas, grelhas e componentes do sistema.
- ii. Reposição de consumíveis: troca de reagentes químicos e enchimentos das torres.
- iii. Planos de limpeza de grelhas e conduatas através da instalação de portas de visita.
- iv. Equipamentos de regulação de caudal (registos e grelhas reguláveis).
- v. Testes operacionais: verificar o funcionamento dos equipamentos (bombas, sensores), e monitorizar odores e gases corrosivos ( $H_2S$ ) nas áreas cobertas para verificar a necessidade de aumentar taxa de extração de ar.

### 4.3. Dimensionamento

Neste capítulo é feito o dimensionamento da melhoria no sistema de ventilação da torre 1, uma vez que, o ventilador da linha da torre 2 não está a funcionar. O dimensionamento foi realizado nas seguintes etapas.

#### 1. Proposta do sistema de ventilação

Considerando as restrições operacionais e estruturais, e o encerramento da linha de extração da oficina porque não existem odores para extrair, propõem-se expandir a configuração da rede atual, como se mostra na Figura 4.3. Esta primeira solução permite extrair os odores das

fontes mais próximas, como no segundo estágio de elevação, nos canais de distribuição junto às grades na zona do piso gradeado, e na zona do poço dos sólidos grossos.

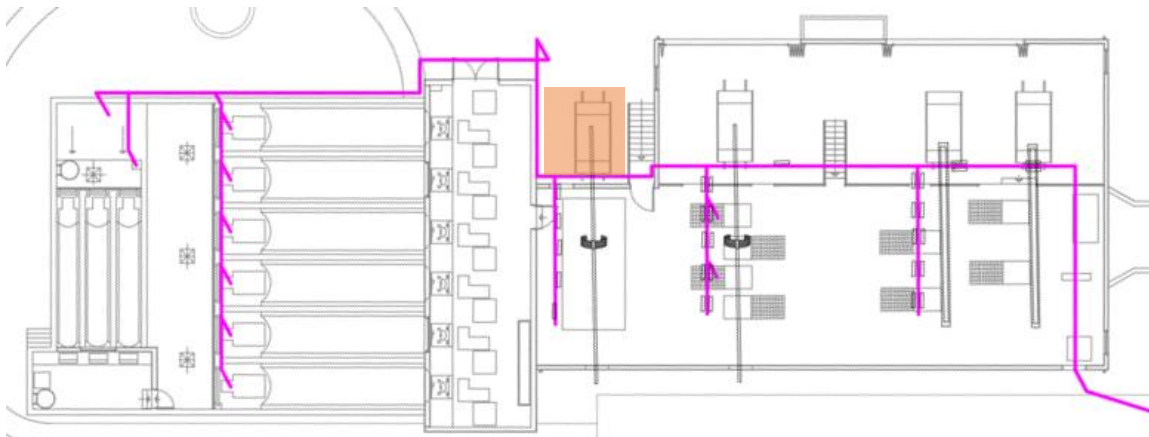


Figura 4.3 – Solução 1 para a linha da torre 1

Propõe-se ainda uma configuração alternativa ilustrada na Figura 4.4., que envolve a alteração da disposição das condutas para repartir o número de pontos de extração de odores pelo espaço do edifício da gradagem, passando a extrair pelas bocas de extração dos tamisadores e por mais zonas dos canais da distribuição.

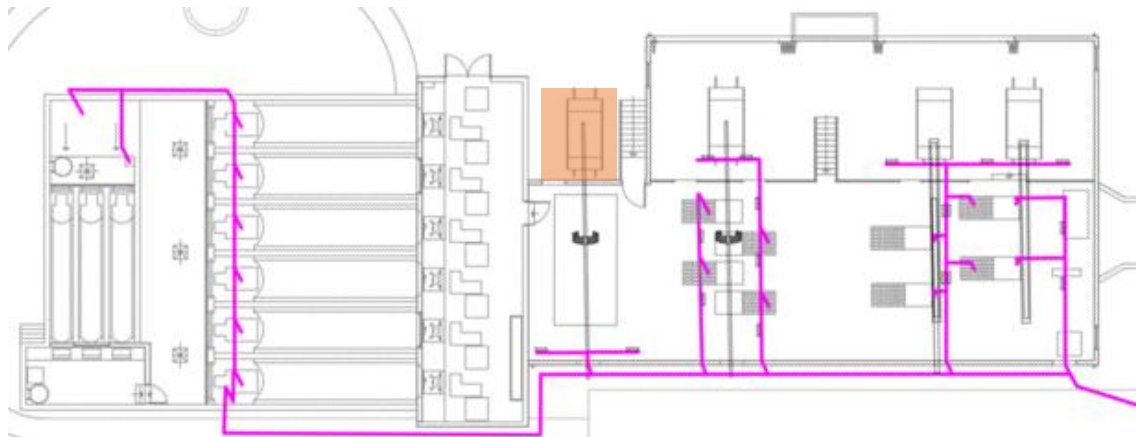


Figura 4.4 – Solução 2 para a linha da torre 1

## 2. Considerações iniciais

A gradagem precisa de aumentar as taxas de renovação de ar porque os portões do edifício têm de permanecer abertos para garantir a entrada de ar e manter uma atmosfera segura. Uma das contribuições para essa situação é a presença de uma fonte adicional de odores: o poço de sólidos grossos. Além da abertura necessária dos portões, que compromete a contenção do edifício, um dos portões deve permanecer semiaberto para permitir a passagem da garra de limpeza, que transporta os resíduos para um contentor exterior. Neste sentido, prevê-se a cobertura do contentor exterior, que vai ter as dimensões 3,5 x 4 x 5 m (C x L x A).

Este espaço adicional já se encontrava contabilizado no volume do edifício da gradagem no projeto inicial, por isso o volume do espaço utilizado no cálculo não alterou. Em relação à elevação inicial, as taxas de renovação definidas no projeto no 1º estágio serão mantidas, enquanto no 2º estágio vai ser implementada a extração de ar sob as coberturas de cada um

Com base nas renovações horárias recomendadas no Quadro 2.6, projetaram-se as duas soluções propostas para três cenários, conforme apresentado no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Caudais de ar pretendidos para o cenário 1, 2 e 3.

Etapa	Volume (m <sup>3</sup> )	Taxa de renovação [h <sup>-1</sup> ]			Caudal de ar a tratar [m <sup>3</sup> /h]			
		Cenário	Cenário	Cenário	Cenário	Cenário	Cenário	
		1	2	3	1	2	3	
1º estágio de elevação	200		7			1.400		
Poço do 1º estágio de elevação	625		7			4.375		
2º estágio de elevação	625	3	5	6	1.875	3.125	3.750	
Gradagem	1.650	8	10	20	13.200	16.500	33.000	
<b>Total</b>						20.850	25.400	42.525

Na Solução 1 foram previstas 30 grelhas e 2 extrações locais nos canais, enquanto na Solução 2 foram previstas 18 grelhas, 6 extrações locais nos canais e 4 extrações nos tamisadores. Para simplificação, foi definido que o caudal extraído em cada extração local será igual, independentemente da sua localização. Este valor foi baseado no caudal necessário para extrair de um canal de distribuição com volume de 20 m<sup>3</sup> (o maior volume considerado), e um diâmetro mínimo de 110 mm, que é o adotado para as bocas de extração dos tamisadores. Considerou-se uma velocidade mínima de 3 m/s, recomendada para condutas terminais [28]. Foi definido-se um caudal de 100 m<sup>3</sup>/h para os Cenários 1 e 2, e de 120 m<sup>3</sup>/h para o Cenário 3. Como o caudal total extraído no edifício foi calculado com base no volume total, incluindo canais e poço, será subtraído desse valor o caudal necessário para as extrações locais.

O dimensionamento foi feito pelo método da perda de carga unitária constante. Como se trata de uma instalação industrial considerou-se uma velocidade inicial máxima de 12 m/s. Embora no transporte de gases sem partículas em suspensão fosse possível adotar uma velocidade mais baixa, optou-se por uma velocidade mais elevada para garantir uma margem de segurança adicional caso as condições de operação mudem, além de ajudar a evitar o acúmulo de condensados. O valor da perda de carga unitária vai ser definido pelo troço inicial,

por ter o maior caudal e aumentar o consumo de energia. Por exemplo, para a solução 1 e cenário 1 o início da rede corresponde ao troço 8 (detalhado no Apêndice B), e temos um caudal de 20.850 m<sup>3</sup>/h, o que para uma conduta circular de diâmetro 800 mm, resulta numa velocidade de 11,5 m/s e um  $\Delta p/m$  de  $\pm 1,58$  Pa/m. Os restantes troços da rede, de acordo com o método, vão rondar os 1,58 Pa/m. Os diâmetros nominais usados são normalizados.

Foram selecionados acessórios, como curvas a 90°, ligações de ramais a 90°, cruzetas a 90° e entradas simples de forma dimensionar para a pior situação de perda de carga. No entanto, para a implementação do sistema, recomenda-se o uso de curvas de 45° ou 30°, ligações de ramais na ordem dos 30° e entradas suaves (com cone), pois têm coeficientes de perda de carga menores, o que reduz consumo energético [25].

As grelhas terminais, usadas no edifício da gradagem, foram escolhidas do fabricante FINCO do modelo GLS com registo. Os dados técnicos das grelhas de extração encontram-se no Anexo C.

### 3. Análise dos resultados do dimensionamento

A divisão da rede em troços e o processo do cálculo das perdas de cargas total da rede da Solução 1 e 2 para cada um dos três cenários encontram-se detalhados no Apêndice B. Os resultados do dimensionamento são apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Resultados do dimensionamento da Solução 1 e 2 para o Cenário 1, 2 e 3.

Dados da rede	Solução 1			Solução 2		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	20.850	25.400	42.525	20.850	25.400	42.525
Perda de carga unitária (Pa/m)	1,58	1,27	0,8	1,58	1,27	0,8
Perda de carga total da rede (Pa)	1.704	1.843	1.682	1.647	1.730	1.365

O Cenário 3 apresenta uma perda de carga significativamente menor em comparação com os outros cenários, porque para transportar um caudal de 42.525 m<sup>3</sup>/h a uma velocidade máxima de 12 m/s, foi selecionado um diâmetro normalizado de conduta de 1.200 mm, resultando numa perda de carga unitária de 0,8 Pa/m e velocidade de 10,4 m/s. Velocidades mais baixas significam maior investimento inicial, mas menor consumo de energia elétrica.

A solução 2 requer um maior investimento inicial devido à utilização de mais material devido à sua extensão adicional. Além disso, grande parte da rede encontra-se no exterior, aumentando o custo da conduta por ser necessário o uso de materiais mais resistentes que

o PP à exposição solar, como plástico reforçado com fibra de vidro (FRP), ou o uso de revestimentos protetores. Apesar do custo inicial mais elevado, a solução 2 apresenta vantagens significativas: proporciona uma ventilação mais eficiente, pois possui mais pontos de extração distribuídos pelo edifício da gradagem; apresenta menores perdas de carga, e logo menor consumo de energia: Cenário 1 (-3,5%), Cenário 2 (-6,1%) e Cenário 3 (-18,8%). Em contraste, a solução 1 baseia-se na disposição atual, sendo, por isso, mais fácil de implementar. No entanto, a solução 1 apresenta maiores perdas de carga devido à restrição geométrica da conduta secundária, que precisa desviar da calha da garra das grades. Para passar por cima da calha, a conduta deve ter no máximo 550 mm de altura. Na solução 2, o desvio é feito pela conduta terminal, resultando em menores perdas de carga, uma vez que o caudal transportado é menor.

#### **4. Cálculo do caudal de fuga e de ar novo**

Para manter o espaço da gradagem em depressão e evitar a migração de odores para o exterior foi necessário calcular o caudal de fuga pelas fissuras das portas. O espaço possui três portas metálicas (2 x 1) m, dois portões metálicos (6 x 3,5) m e um portão metálico (3 x 2,7) m. Considerou-se que todas as portas e portões estão fechados, com frestas de 2 mm em cima e nos lados, e de 4 mm na parte de baixo. E um coeficiente de descarga igual a 0,85 para as portas. Utilizando a equação (2.11), o caudal de fuga para uma pressão negativa de 7 Pa (valor recomendado na literatura [23]) é igual a 535 l/s (1.926 m<sup>3</sup>/h). Multiplicando este valor por um fator de segurança de 2 para compensar as fugas adicionais em torno de janelas e outras fendas, obteve-se um caudal total de 3.852 m<sup>3</sup>/h.

Para promover o varrimento do ar no sentido da extração, evitando zonas mortas e garantindo a ventilação mínima em eventuais paragens do sistema, considerou-se que o caudal de ar novo corresponde a 30% do ar extraído. No Cenário 1, este caudal foi obtido apenas por transferências a partir de fugas. No Cenário 2, a insuflação é realizada através de fugas e grelhas. Usando novamente a equação (2.11) e considerando um coeficiente de descarga igual a 0,75 para as grelhas, a área efetiva necessária para entrar 1.098 m<sup>3</sup>/h é 0,119 m<sup>2</sup>, que resulta em 2 grelhas do modelo TAC do fabricante FINCO, com dimensões de 600 x 100 mm. Usando o mesmo raciocínio para o Cenário 3, mas para entrar 6.048 m<sup>3</sup>/h através de grelhas, a área efetiva necessária é igual a 0,656 m<sup>2</sup>, que pode ser garantida por 4 grelhas de 600 x 300 mm. As grelhas selecionadas são para ser montadas na parte inferior dos novos portões deslizantes, junto ao chão, para facilitar a captação de ar pelo efeito de varrimento. O espaço da gradagem possui 3 grelhas venezianas de 1.000 x 1.000 mm que precisam ser fechadas em todos os cenários, a fim de manter uma pressão diferencial de 7 Pa.

Os dados técnicos da grelha de tomada de ar externo encontram-se no Anexo D.

## 5. Seleção e comparação de ventiladores

O ventilador a ser selecionado será do tipo centrífugo por possuir maior energia de pressão disponível que os outros tipos de ventiladores. Como possíveis opções, foram escolhidos os modelos CMRS-X900 e CMRS-X800 do fabricante Sodeca, que possuem pás curvas inclinadas para trás e são equipados com um motor trifásico. Estes ventiladores podem ser depois equipados com um variador de velocidade por variação de frequência de alimentação, eliminando a necessidade de polias para ajuste do caudal.

Os dados técnicos e as curvas de funcionamento dos ventiladores selecionados encontram-se no Anexo E.

Utilizando os diagramas dos ventiladores e o ponto de funcionamento correspondente a cada cenário, apresentados no Quadro 4.6, foi possível determinar o rendimento e a potência elétrica absorvida à rede. No caso do ventilador atual, estes parâmetros são obtidos com a potência absorvida no veio (informada no diagrama) e com o rendimento do sistema motriz, porque como os ventiladores da série CHR podem ser acoplados diretamente ou indiretamente a curva não inclui na potência as perdas mecânicas do sistema de transmissão. Este rendimento é igual a 70% e foi determinado pela relação entre a potência obtida na curva característica no ponto de operação atual ( $Q = 20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $P_t = 2.920 \text{ Pa}$ ,  $\eta = 77,2\%$ ,  $N = 1600 \text{ rpm}$ ), que é 21 kW, e a potência absorvida à rede indicada na placa de especificações (Figura 3.6), que é 30 kW. Para os ventiladores selecionados, o fabricante disponibiliza a potência global absorvida pelo conjunto no diagrama.

O valor do rendimento ou da potência expresso no diagrama do ventilador pode ser confirmado pela equação (4.1).

$$P = \frac{Q\Delta P_t}{\eta} \quad (4.1)$$

onde,

$P$  - potência absorvida [kW];

$Q$  - caudal de ar [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$P_t$  - pressão total [Pa];

$\eta$  - rendimento do ventilador.

Com base na potência absorvida pelo ventilador para vencer as perdas de carga em cada cenário das Soluções 1 e 2, é possível comparar a potência específica e estimar os custos

energéticos anuais para cada ventilador, considerando o kWh a 0,19 € e uma operação contínua de 8.640 horas/ano, cujos resultados são mostrados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Potência absorvida, rendimento e custos energéticos para cada ventilador.

Dados do ventilador	Solução 1			Solução 2		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<b>Ventilador atual</b>						
Rendimento* (%)	57,6	56,9	40,3	58,1	57,0	37,6
Potência absorvida (kW)	17,1	22,9	49,3	16,4	21,4	42,9
Custos energéticos (€)	28.071,4	37.592,6	80.930,9	26.922,2	35.130,2	70.424,6
Potência específica (kW m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	2,95	3,25	4,17	2,83	3,03	3,63
<b>Ventilador x900</b>						
Rendimento (%)	74,3	76,8	79,0	74,7	77,5	77,0
Potência absorvida (kW)	13,3	16,9	25,2	12,8	15,7	20,9
Custos energéticos (€)	21.833,3	27.743,0	41.368,3	21.012,5	25.773,1	34.309,4
Potência específica (kW m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	2,30	2,40	2,13	2,21	2,23	1,77
<b>Ventilador x800</b>						
Rendimento (%)	78,0	79,7	74,4	78,3	80,1	72,2
Potência absorvida (kW)	12,7	16,3	26,7	12,2	15,2	22,3
Custos energéticos (€)	20.848,3	26.758,1	43.830,7	20.027,5	24.952,3	36.607,7
Potência específica (kW m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )	2,19	2,31	2,26	2,11	2,15	1,89

Nota: \*Valores obtidos com o rendimento mecânico igual a 70%

A comparação da potência absorvida de cada ventilador — CMRS-X900, CMRS-X800 e o ventilador atual — foi representada graficamente na Figura 4.5.

Com base nos resultados apresentados no Quadro 4.6., ambas as alternativas X900 e X800 demonstram melhorias significativas em termos de eficiência energética e redução de custos, revelando-se tecnicamente mais adequadas para substituir o ventilador atual. Os custos energéticos anuais dependem da potência específica de cada cenário, quanto menor a potência específica, menor o consumo energético. O ventilador atual apresenta os custos mais elevados, atingindo os 80.930,9 € nas condições mais exigentes. Em contrapartida, o ventilador X900 apresenta uma economia de até 48,9% e o X800 de até 45,8%, quando

comparados com o ventilador atual. Nos Cenários 1 e 2, o ventilador X800 destaca-se com a menor potência específica e custos, enquanto o X900 é mais eficiente no Cenário 3. A decisão final parte em saber em que condições o ventilador vai funcionar.

A análise gráfica da Figura 4.5 reforça que ambos os ventiladores, X900 e X800, apresentam consumos energéticos significativamente inferiores. O ventilador X800 apresenta reduções de aproximadamente 26,1%/28,7%/45,8% para a Solução 1 e 25,8%/28,9%/47,9% para a Solução 2. Enquanto, o ventilador x900 apresenta reduções de 22,4%/26,0%/49,0% para a Solução 1 e 22,3%/26,5%/51,1% para a Solução 2.

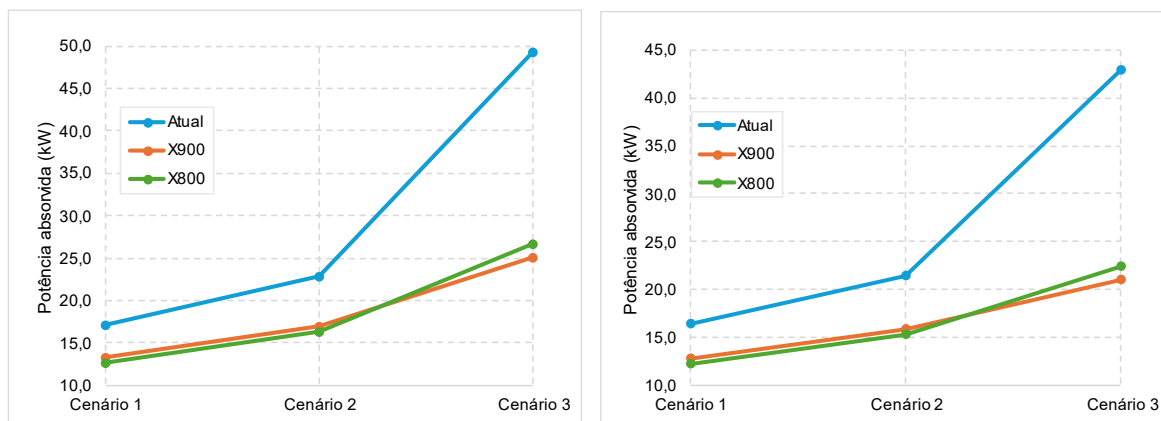


Figura 4.5 – Comparação gráfica da potência absorvida dos ventiladores para os Cenários 1, 2 e 3 na Solução 1 e 2.

## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A ETAR de Frielas apresenta um grave problema de odores em zonas que têm implementados sistemas de ventilação e desodorização, como na área de manuseamento de lamas, pré-tratamento e decantação primária. O presente trabalho teve como principal objetivo analisar e otimizar dois desses sistemas: a "linha da torre 1", que extrai ar do 1<sup>a</sup> estágio de elevação, poço do 1<sup>o</sup> estágio, gradagem e oficinas; e a "linha da torre 2", que extrai ar do canal de medição, edifício de desarenamento/desengorduramento, decantação primária e elevação secundária. A metodologia aplicada incluiu visitas técnicas para a identificação de deficiências no sistema e aferição dos valores dos caudais projetados e da perda de carga calculada a partir das redes do projeto.

Na linha da torre 1, o caudal extraído na gradagem é 53% inferior ao previsto devido à acumulação de gorduras nas grelhas e à sujidade nas condutas. Este aumento na resistência desequilibró os caudais e resultou numa extração excessiva na elevação inicial (104%) e nas oficinas (22%). A pressão estática a montante do ventilador atingiu 1.274 Pa, mais do que o dobro das perdas de carga calculadas da rede de projeto, em parte devido à não consideração do desvio da conduta principal para contornar a calha da garra. Em relação à linha da torre 2, como o ventilador está desligado não foi possível comparar valores com os do projeto.

As principais deficiências identificadas foram as seguintes: condutas e pontos de extração deteriorados pela exposição solar e com dano físicos que resultam na perda de volume de ar e na fuga de odores; obstrução das grelhas por gordura e sujidade levando à redução do caudal e ao desequilíbrio do sistema. Também foram notadas falhas na contenção: placas da cobertura do edifício de desarenamento/desengorduramento severamente degradadas pela corrosão e com aberturas, coberturas levantadas na decantação primária, portões permanentemente abertos no edifício da gradagem. Além disso, falta dispositivos de regulação de caudal, como grelhas reguláveis e registos, e pontos de purga de condensados nas zonas mais baixas da rede.

Para melhorar o sistema, propõe-se a utilização de materiais mais resistentes à exposição solar nas condutas exteriores, como plástico reforçado com fibra de vidro (FRP) ou o uso de revestimentos protetores. Na elevação inicial sugere-se a extração de odores no 2<sup>o</sup> estágio de elevação, com a instalação de registos em cada ponto de extração. Na gradagem recomenda-se a substituição dos portões atuais por modelos deslizantes em inox, a cobertura

do espaço do contentor exterior e o uso de pisos fechados. Também se propõe o aumentar as renovações horárias de 7 ren/h para os valores recomendados na literatura: 8ren/h, 10 ren/h e 20 ren/h, considerando três cenários diferentes. Além disso, recomenda-se a introdução de pulverizadores automáticos para limpeza dos lixiviados. Nas oficinas, sugere-se tamponar a conduta de extração, por não haver produção de odores. Recomenda-se ainda a adição de purgas de condensados na zona mais baixa da rede, que corresponde a troço de conduta que atravessa a estrada.

Na linha da torre 2, propõe-se substituir toda a cobertura do edifício de desarenamento/desengorduramento por materiais resistentes à corrosão e instalar condutas equipadas com grelhas sobre os tanques, sem interferir com a operação das pontes raspadoras. Além disso, recomenda-se cobrir os classificadores/lavadores de areias e o concentrador de gorduras, juntamente com os respetivos contentores. Na decantação primária, sugere-se a recolocação da cobertura amovível e o uso de condutas flexíveis para evitar que se quebrem novamente pela subida do nível de água. E elevar as condutas enterradas em pórticos para facilitar a manutenção.

Na parte final do trabalho, dimensionaram-se as melhorias do sistema de ventilação para a linha da torre 1, propondo duas configurações. A solução 1 propõe expandir a configuração atual para extrair das fontes de odor mais próximos, como o 2º estágio de elevação, os canais de distribuição e a zona do poço dos grossos. A solução 2 propõe a redistribuição das condutas posicionando-as mais próximas das fontes de odor e reduzir desvios da rede. As soluções foram dimensionadas para três cenários: no cenário 1, 3 ren/h no 2º estágio e 8 ren/h na gradagem; no cenário 2, 5 ren/h no 2º estágio e 10 ren/h na gradagem; e no cenário 3, 6 ren/h no 2º estágio e 20 ren/h na gradagem. As renovações do 1º estágio foram mantidas e foi encerrada a linha de extração das oficinas.

A configuração da rede, em comparação com a solução 1, a solução 2 exige um investimento inicial maior, pois envolve mais conduta no exterior, o que requer materiais mais resistentes e, conseqüentemente, mais caros. No entanto, possui mais pontos de extração distribuídos pela gradagem, resultando numa ventilação mais eficiente, além de apresentar uma menor perda de carga e custo energético (Cenário 1: -3,5%; Cenário 2: -6,1%; Cenário 3: -18,8%). Após o dimensionamento, selecionou-se dois ventiladores centrífugos, CMRS-X900 e CMRS-X800, que apresentam maior eficiência e menores custos energético. O ventilador X800 destaca-se nos Cenários 1 e 2, com uma redução de custos de até 45,8%, enquanto o X900 destaca-se no Cenário 3, chegando a economias de até 48,9%. Assim, ambos os ventiladores são tecnicamente viáveis, e a escolha partirá das condições funcionamento optadas.

A falta de manutenção é a principal causa das deficiências no sistema o que leva a custos muitos mais elevados do que os seriam necessário para a realizar uma manutenção regular. Independentemente da eficiência do sistema de ventilação e desodorização, se não for realizada a manutenção adequada dos seus componentes, incluindo a garantia da integridade das coberturas e dos edifícios, a sua eficácia será comprometida. Assim, a manutenção preventiva e regular deve ser vista não como um custo, mas como um investimento essencial para a sustentabilidade operacional a longo prazo, assegurando um ambiente de trabalho seguro e saudável, enquanto se evitam gastos excessivos e contratemplos.

Em termos de futuro este trabalho pode servir como ponto de partida para a melhoria da operação dos sistemas de desodorização e ventilação na ETAR. O levantamento efetuado, que inclui a identificação de deficiências e a comparação entre os dados medidos e projetados, sugere possíveis caminhos para a implementação de melhorias nestes sistemas.

Além do que foi feito é necessário realizar também um estudo custo-benefício das melhorias propostas para evitar o sobredimensionamento desnecessário do sistema. Além disso, existem outras áreas na ETAR, como a zona de manuseamento de lamas que também precisam de ser abordadas. Outra sugestão a estudar é a viabilidade de unir as duas torres de ventilação, realizando o tratamento do ar em dois estágios. Além disso, recomenda-se a instalação de sensores fixos nas entradas e saídas das torres, para medir a concentração de gases odoríficos e controlar a abertura dos registos de bypass da torre. Ajustando o funcionamento conforme a necessidade e diminuindo os gastos energéticos.



## Bibliografia

- [1] E. Glushchenko e A. Kadyseva, "Wastewater deodorization: problems and solutions," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 937, nº 4, pp. 42-64, 2021.
- [2] R. Lebrero, L. Bouchy, R. Stuetz e R. Muñoz, "Odor Assessment and Management in Wastewater Treatment Plants: A Review," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 41, nº 10, pp. 915-950, 2011.
- [3] R. M. V. Antunes, "Contribuição para o Estudo de Odores em Estações de Tratamento de Águas Residuais Urbanas," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Ambiente, Dissertação de Mestrado, Lisboa, 2006.
- [4] H. M. d. Monte, A. M. Barreiros, M. T. Santos e A. Albuquerque, Operações e processos de tratamento físico e químico, Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa; Universidade da Beira Interior, 2016.
- [5] C. Simões, I. Rosmaninho e A. G. Henriques, Guia para a Avaliação de Impacte Ambiental de Estações de Tratamento de Águas Residuais, Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente, 2008.
- [6] Ministério do Ambiente, "Decreto-Lei n.º 236/98," *Diário da República*, Vols. %1 de %2Série I-A, nº 176, 1998.
- [7] Ministério do Ambiente, "Decreto-Lei n.º 152/97," *Diário da República*, Vols. %1 de %2Série I-A, nº 139, 1997.
- [8] Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, "Decreto-Lei n.º 149/2004," *Diário da República*, Vols. %1 de %2Série I-A, nº 145, 2004.
- [9] Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, "Decreto-Lei n.º 276/2009," *Diário da República*, vol. 1.ª série, nº 192, 2009.
- [10] Water Environment Federation (WEF), Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Virgínia: WEF Press, 2008.
- [11] Environmental Protection Agency, Odour Emissions Guidance Note (Air Guidance Note AG9), Wexford, 2019.
- [12] E. C. f. Standardization, EN 13725:2003, Air quality. Determination of odour concentration by dynamic olfactometry, Brussels, 2003.
- [13] VDI (Verein Deutscher Ingenieure), VDI 3880, Olfaktometrie – Statische Probenahme (Olfactometry; Static sampling), Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [14] C. L., B. C., D. C., I. C., A. R. e S. S. N., "Review on odour pollution, odour measurement, abatement techniques," D-NOSES, H2020-SwafS-23-2017-789315, 2019.
- [15] W. E. Federation, Control of Odors and Emissions from Wastewater Treatment Plants manual of practice 25., Alexandria, 2004.

- [16] F. B. Frechen, "Odour Emissions and Odour Control at Wastewater Treatment Plants in West Germany," *Water Science & Technology*, p. 261–266, 1 Abril 1988.
- [17] Degrémont, "Odour control and ventilation regulations," Degrémont, [Online]. Disponível: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/degasification-odour-control-evaporation/measuring-odours-and-odour-control/regulations>. [Acedido em 10 Março 2023].
- [18] I. C., D. C., A. A., K. R., C. L., A. R., S. S. N., B. J. e F. L., "Analysis of existing regulations in odour pollution, odour impact criteria 2," D-NOSES, H2020-SwafS-23-2017-789315, 2021.
- [19] R. Sander, "Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 115, nº 8, p. 4399–4981, 2015.
- [20] V. Belgiorno, V. Naddeo e T. Zarral, *Odour Impact Assessment Handbook*, Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [21] A. N. Mabbett, "Industrial ventilation and air pollution control," *Metal Finishing*, vol. 105, nº 10, pp. 678-698, 2007.
- [22] E. 12255-9:2002, *European Standard on Wastewater treatment plants – Part 9: Odour control and ventilation*, Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
- [23] Degrémont, "Ventilation," Degrémont, [Online]. Disponível: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/degasification-odour-control-evaporation/measuring-odours-and-odour-control/ventilation>. [Acedido em 10 Março 2023].
- [24] R. Antunes e A. Mano, "Odores em Estações de tratamento de águas residuais," em *7º Congresso da Água*, Lisboa, 2004.
- [25] ASHRAE , *Handbook: Fundamentals*, 2009.
- [26] British Standards Institution, "EN 12097:2006," *Ventilation for buildings. Requirements for ductwork components to facilitate maintenance of ductwork systems*.
- [27] T. E. ToolBox, "Fluid Flow - Hydraulic Diameter," 2003. [Online]. Disponível: [https://www.engineeringtoolbox.com/hydraulic-equivalent-diameter-d\\_458.html](https://www.engineeringtoolbox.com/hydraulic-equivalent-diameter-d_458.html). [Acedido em 2024 12 17].
- [28] The Engineering ToolBox , "Ducts Sizing - the Velocity Reduction Method," [Online]. Disponível: [https://www.engineeringtoolbox.com/sizing-ducts-d\\_207.html](https://www.engineeringtoolbox.com/sizing-ducts-d_207.html). [Acedido em 10 Junho 2024].
- [29] J. M. E. Pérez, *Biotechnologies for air pollution control: overcoming design and operational limitations*, Universidad de Valladolid, Tesis doctorales, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, 2014.
- [30] B. Ren, Y. Zhao, N. Lyczko e A. Nzihou., "Current Status and Outlook of Odor Removal Technologies in Wastewater Treatment Plant," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, nº 6, pp. 1443-1458, 2019.
- [31] V. Senatore, T. Zarra, M. Galang, G. Oliva, A. Buonerba, C.-W. Li, V. Belgiorno e V. Naddeo, "Full-Scale Odor Abatement Technologies in Wastewater Treatment Plants (WWTPs): A Review," *Water*, vol. 13, nº 24, p. 3503, 2021.
- [32] C. S. S. L. Casaca, N. P. F. Henriques, E. A. V. Nunes e T. A. P. S. Simões, "Ventilation and deodorization system optimization of a wastewater treatment plant," *CLIMATIZACIÓN*, pp. 187-193, 2022.

- [33] F. d. M. Freire, "Otimização do Sistema de Ventilação e Desodorização da Fábrica de Água de Chelas," Universidade Nova de Lisboa, Mestrado Integrado em Engenharia Química e Bioquímica, 2021.
- [34] Google LLC, "Vista da ETAR de Frielas no Google Earth," Google Earth, [Online]. Disponível: <https://earth.google.com/web/search/E.t.a.r.+de+Frielas,+Frielas/@38.82028574,-9.1497114,18.11884603a,438.30541625d,35y,-55.63782213h,0.25181618t,0.00000001r/>. [Acedido em 25 Junho 2023].
- [35] A. J. d. A. Santos, AVAC, Um Manual de Apoio: Fundamentos, Porto: ENGEBOOK, 2019.
- [36] The Engineering ToolBox , "Air Ducts - Major Friction Head Loss, Online Calculator," 2003. [Online]. Disponível: [https://www.engineeringtoolbox.com/duct-friction-pressure-loss-d\\_444.html](https://www.engineeringtoolbox.com/duct-friction-pressure-loss-d_444.html). [Acedido em 13 Fevereiro 2024].



## **Apêndices**

- Apêndice A. Cálculo das perdas de carga nas redes projetadas
- Apêndice B. Dimensionamento das melhorias



Quadro A. 1 – Cálculos de perda de carga da rede de condutas projetada da torre 1.

Troço <sup>a</sup>	Q (m <sup>3</sup> /h)	L (m)	ø (mm)	V (m/s)	ΔP linha <sup>b</sup> (Pa/m)	ΔP acessórios <sup>c</sup> (Pa)	ΔP componentes (Pa)	ΔP total (Pa)
1	4375	5	400	9,7	2,63	124	-	130
2	5775	41	500	8,2	1,45	150	-	204
3	11550	8	900	5	0,28	6	-	9
4	17325	1,5	900	8,5	0,61	78	-	107
5	19725	5	900	10,2	0,79	72	-	77
6	1400	4	250	8,3	3,20	57	-	67
7	5775	5,85	500	8,2	1,45	128	20 <sup>d</sup>	157
8	5775	5,85	500	8,2	1,45	53	20 <sup>d</sup>	82
9	2400	71,5	315	9,0	2,79	240	-	449
10	1200	9,7	315	4,5	0,75	24	-	32
Saída do ventilador	19725	1	800	10,9	1,42	79	-	80
Torre	19725	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>	350
Saída da Torre	19725	2,7	800	10,9	1,42	95	-	99

<sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento

<sup>a</sup> ver Figura A. 1 turbulento de [36]

<sup>c</sup> ver Quadro A. 1 <sup>d</sup> secção tem 10 grelhas de retorno com 45°, e considerou-se a perda de carga unitária de 20 Pa

<sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga através de enchimento limpo, comumente aplicado na indústria é de 350 Pa.

Quadro A. 2 – Coeficientes de perda de carga por troço da rede projetada da Torre 1.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Tabela <sup>a</sup>	Parâmetros	Coeficiente (k)
1	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,8; θ=34°	0,11
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,4; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,24	0,31
2	7	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,3, θ=36°	0,48
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,3, Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,5	0,53
3	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,3, Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,33	0,40

Quadro A. 2 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede projetada da Torre 1.

4	5	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,12$ , $Q_b/Q_c=0,12$	0,18
5	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	90°, 4 gomos, r/D=1, L/D=0	1,20
6	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c=0,24$	0,16
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
7	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,3$ , $Q_b/Q_c=0,5$	3,2
8	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,3$ , $Q_b/Q_c=0,33$	1,33
9	11	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,12$ , $Q_b/Q_c=0,12$	0,83
10	3	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Entrada simples	-	-	0,93
Saída do ventilador	1	Saída súbita	2-2	-	0,88
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
Torre	-	-	-	-	-
Saída Torre	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=2,75$ $\theta=150^\circ$	0,33
	1	Chaminé	2-12	$De/D=1$	1,0

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

Quadro A. 3 – Perda de carga por percurso da rede de condutas projetada da Torre 1.

Percursos	$\Delta P$ tubagem (Pa)	$\Delta P$ total (Pa)	Desequilíbrio
Elevação inicial poço do 1ºestágio 1-2-3-4-5	527	1087	-31 (-5,6%)
Elevação inicial 1ºestágio 6-2-3-4-5	464	879	-95 (-17,0%)
Ramal 1 Gradagem 7-3-4-5	350	795	-208 (-37,3%)
Rama 2 Gradagem 8-4-5	366	1056	-292 (-52,3%)
Oficinas 10-9-5	558	992	Caminho crítico

## Linha da torre 2

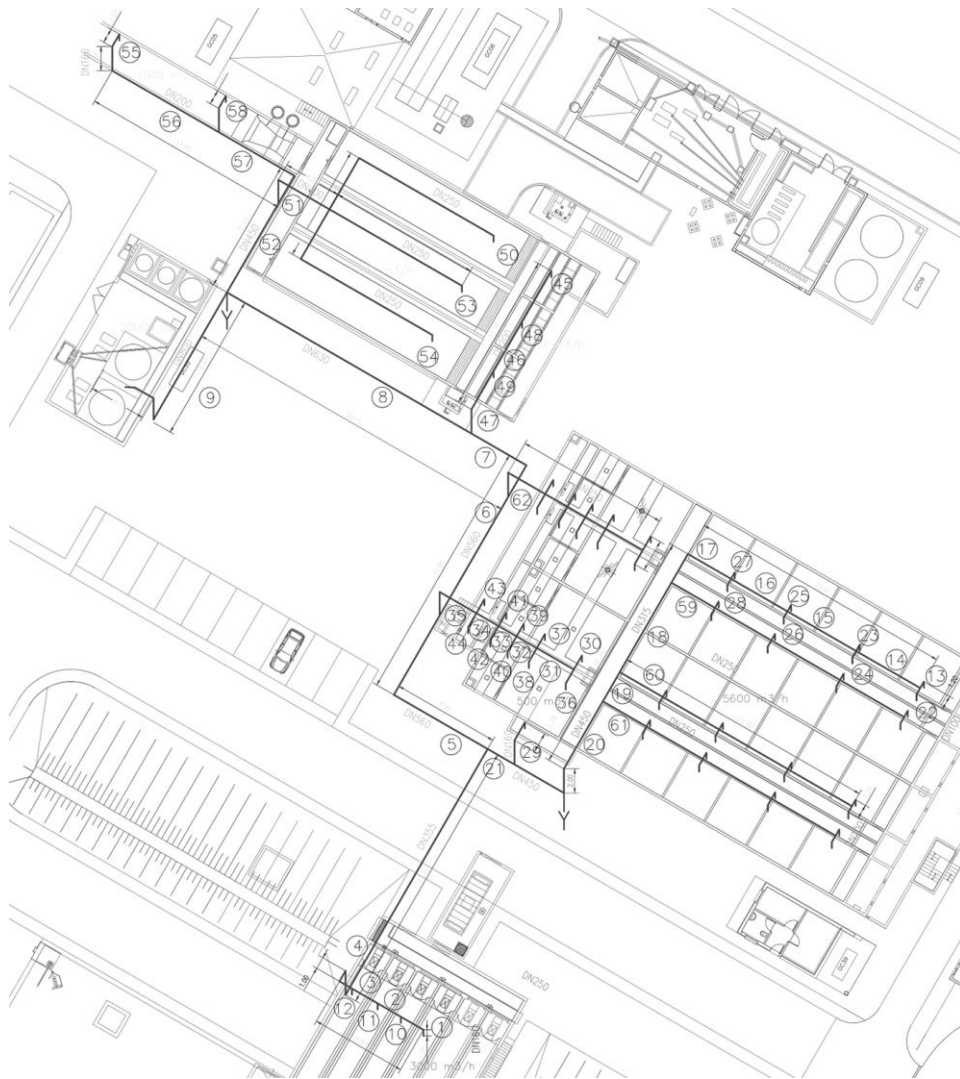


Figura A. 2 – Rede de condutas projetada da torre 2.

Quadro A. 4 – Cálculos de perda de carga da rede de projetada da torre 2.

Troço <sup>a</sup>	Q (m <sup>3</sup> /h)	L (m)	ø (mm)	V (m/s)	ΔP linha <sup>b</sup> (Pa/m)	ΔP acessórios <sup>c</sup> (Pa)	ΔP componentes (Pa)	ΔP total (Pa)
1	750	2,6	160	10,4	9,18	121	-	145
2	1500	2	250	8,5	3,64	17	-	25
3	2250	2	250	12,7	7,87	63	-	79
4	3000	26,5	355	8,4	2,34	54	-	116
5	9100	18,4	560	10,3	1,95	41	-	77
6	10850	9,5	560	12,2	2,73	30	-	56
7	12600	8,2	630	11,2	2,01	44	-	60

Quadro B. 3 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede de projetada da torre 2.

8	13600	23,25	630	12,1	2,32	106	-	160
9	19550	17,05	800	10,8	1,39	143	-	167
12	750	0,5	160	10,4	9,18	157	-	162
13	175	1,10	100	6,2	6,12	192	-	198
14	350	5,53	250	2,0	0,23	2	-	4
15	700	5,53	250	4,0	0,86	7	-	12
16	1050	5,53	250	5,9	1,85	14	-	24
17	1400	8,33	250	7,9	3,20	29	-	56
18	2800	8,45	315	10,0	3,74	43	-	75
19	4200	2,80	315	15,0	1,35	11	-	14
20	5600	13,10	450	9,8	2,33	57	-	88
21	6100	2,55	450	10,7	2,74	42	-	49
23	175	1,10	100	6,2	6,12	73	-	80
25	175	1,10	100	6,2	6,12	54	-	60
27	175	1,10	100	6,2	6,12	27	-	34
29	500	4,20	160	6,9	4,25	32	-	49
30	175	1,80	100	6,2	6,12	192	-	203
31	350	3,80	250	2,0	0,23	2	-	3
32	700	1,80	250	4,0	0,86	7	-	9
33	1050	1,80	250	5,9	1,85	14	-	17
34	1400	1,80	250	7,9	3,20	21	-	27
35	1750	3,70	250	9,9	4,88	41	-	59
37	175	1,80	100	6,2	6,12	73	-	84
39	175	1,80	100	6,2	6,12	44	-	55
41	175	1,80	100	6,2	6,12	27	-	38
43	175	1,80	100	6,2	6,12	20	-	31
45	333,3	4,90	140	6,0	3,84	41	-	60
46	666,7	4,40	200	5,9	2,39	8	-	19
47	1000	6,40	200	8,8	5,17	28	-	61
48	333,3	0,50	140	6,0	3,84	39	-	41
49	333,3	0,50	140	6,0	3,84	39	-	41
50	1650	17,93	250	9,3	4,37	173	-	252
51	4950	5,85	400	10,9	3,33	109	-	129
52	5950	8,50	450	10,4	2,61	66	-	88

Quadro B. 3 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede de projetada da torre 2.

53	1650	13,10	250	9,3	4,37	99	-	157
55	500	3,70	160	6,9	4,25	69	-	85
56	500	10,20	200	4,4	1,39	6	-	20
57	1000	9,85	200	8,8	5,17	71	-	122
58	500	3,70	160	6,9	4,25	24	-	40
59	1400	5,53	250	7,9	3,20	23	-	40
60	1400	5,53	250	7,9	3,20	9	-	27
61	1400	5,53	250	7,9	3,20	21	-	38
62	1750	3,70	250	9,9	4,88	68	-	86
Saída do ventilador	19550	1	800	10,9	1,39	77	-	77
Torre	19550	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>	350
Saída da Torre	19550	2,7	800	10,9	1,39	93	-	93

<sup>a</sup> ver Figura A. 2

<sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento turbulento de [36]

<sup>c</sup> ver Quadro A. 5

<sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga através de enchimento limpo, comumente aplicado na indústria é de 350 Pa.

Quadro A. 5 – Coeficientes de perda de carga por troço da rede projetada da Torre 2.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Código <sup>a</sup>	Parâmetros	Coeficiente (k)
1	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4$ , $Q_b/Q_c=0,5$	0,53
2	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4$ , $Q_b/Q_c=0,33$	0,40
3	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,2$ , $Q_b/Q_c=0,25$	0,33
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,50$ , $\theta=30^\circ$	0,32
4	3	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ , $Q_b/Q_c=0,33$	0,60
5	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,2$ , $Q_b/Q_c=0,16$	0,23
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
6	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,80$ , $\theta=30^\circ$	0,13
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,16$ , $Q_b/Q_c=0,14$	0,2
7	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,13$ , $Q_b/Q_c=0,1$	0,16

Quadro A. 5 (continuação)– Coeficientes de perda de carga por trecho da rede projetada da Torre 2

8	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,6$ , $Q_b/Q_c= 0,7$	1,2
9	2	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	$90^\circ$ , 4 gomos, $r/D=1$ , $L/D=0$	1,20
10	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ , $Q_b/Q_c= 0,5$	1,1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
11	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ , $Q_b/Q_c= 0,33$	0,59
	1	Entrada simples	-	-	0,93
12	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,41$ , $Q_b/Q_c= 0,33$	1,51
	1	Entrada simples	-	-	0,93
13/22	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,5$ $A_{1b}/A_c=0,2$ , $Q_{2b}/Q_{1b}=1$	7,4
14	1	Cruzeta, $90^\circ$ , linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,5$	0,96
15	1	Cruzeta, $90^\circ$ , linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,7$	0,72
16	1	Cruzeta, $90^\circ$ , linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,75$	0,64
17	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,63$ , $\theta=30^\circ$	0,24
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,63$ , $Q_b/Q_c= 0,5$	0,53
18	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,5$ , $\theta=30^\circ$	0,32
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,31$ , $Q_b/Q_c= 0,33$	0,4
19	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,31$ , $Q_b/Q_c= 0,25$	0,33
20	2	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,13$ , $Q_b/Q_c= 0,1$	0,16
21	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4$ , $Q_b/Q_c= 0,33$	0,40
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,65$ , $\theta=30^\circ$	0,22
23/24	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,25$ $A_{1b}/A_c=0,2$ , $Q_{2b}/Q_{1b}=1$	2,25
25/26	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,2$ $A_{1b}/A_c=0,2$ , $Q_{2b}/Q_{1b}=1$	1,4

Quadro A. 5 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede projetada da Torre 2.

27/28	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}; A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,12$ $A_{1b}/A_c=0,2; Q_{2b}/Q_{1b}=1$	0,24
29	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,13, Q_b/Q_c=0,1$	0,17
30/36	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,5$ $A_{1b}/A_c=0,2, Q_{2b}/Q_{1b}=1$	7,4
31	1	Cruzeta, 90°, linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,5$	0,96
32	1	Cruzeta, 90°, linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,67$	0,76
33	1	Cruzeta, 90°, linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,75$	0,64
34	1	Cruzeta, 90°, linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,8$	0,56
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,2, Q_b/Q_c=0,16$	0,28
35	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
	1	Entrada simples	-	-	0,93
37/38	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,25$ $A_{1b}/A_c=0,2, Q_{2b}/Q_{1b}=1$	2,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
39/40	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,17$ $A_{1b}/A_c=0,2, Q_{2b}/Q_{1b}=1$	1,0
	1	Entrada simples	-	-	0,93
41/42	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,12$ $A_{1b}/A_c=0,2, Q_{2b}/Q_{1b}=1$	0,24
	1	Entrada simples	-	-	0,93
43/44	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}, A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,1$ $A_{1b}/A_c=0,2, Q_{2b}/Q_{1b}=1$	-0,05
	1	Entrada simples	-	-	0,93

Quadro A. 5 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede projetada da Torre 2.

45	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,5$ , $Q_b/Q_c=0,5$	0,53
46	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,5$ , $Q_b/Q_c=0,33$	0,40
47	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,13$ , $Q_b/Q_c=0,1$	0,17
48	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,5$ , $Q_b/Q_c=0,5$	0,88
49	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,5$ , $Q_b/Q_c=0,33$	0,45
50/54	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_{1b}/Q_c=Q_{2b}/Q_c=0,33$ $A_{1b}/A_c=0,4$ , $Q_{2b}/Q_{1b}=1$	1,54
51	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,8$ , $Q_b/Q_c=0,83$	1,1
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
52	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,6$ , $Q_b/Q_c=0,7$	0,60
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,32$ , $\theta=30^\circ$	0,42
53	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,4$ , $\theta=30^\circ$	0,38
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Cruzeta, 90°, linha	5-35	$A_{1b}=A_{2b}$ , $A_s=A_c$ $Q_s/Q_c=0,33$	1,1
55	1	Entrada simples	-	-	0,93
	3	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,64$ , $\theta=30^\circ$	0,23
56	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,64$ , $Q_b/Q_c=0,5$	0,53
57	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,20$ , $\theta=30^\circ$	0,49
	1	Tê, linha		$A_b/A_c=0,8$ , $Q_b/Q_c=0,83$	0,60
58	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,64$ , $Q_b/Q_c=0,5$	-0,5
59	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,63$ , $Q_b/Q_c=0,5$	0,6
60	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,31$ , $Q_b/Q_c=0,33$	1,0
61	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,31$ , $Q_b/Q_c=0,25$	0,55
62	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,16$ , $Q_b/Q_c=0,14$	0,74

Quadro A. 5 (continuação)– Coeficientes de perda de carga por troço da rede projetada da Torre 2.

Saída do ventilador	1	Saída súbita	2-2	-	0,88
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,6
Torre	-	-	-	-	-
Saída da Torre	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=2,75 \theta=150^\circ$	0,33
	1	Chaminé	2-12	$De/D=1$	1,0

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

Quadro A. 6 – Perda de carga por percurso da rede de condutas projetada da Torre 2.

<b>Percurso</b>	<b><math>\Delta P</math> total (Pa)</b>	<b>Desequilíbrio</b>
Elevação intermédia (ponto mais distante) 1-...-9	1312	-155 (-10,6%)
Decantação primária (ponto mais distante) 5-...-9-13-...-23	1467	Cominho Crítico
Canal de medição (ponto mais distante) 9-52-55-56-57	531	-28 (-4,9%)
Desengordurador 9-50-51-52	447	-111 (-19,9%)

## Apêndice B. Dimensionamento das melhorias

### Solução 1



Figura B. 1 – Rede de condutas da torre 1: Solução 1.

### Solução 1: Cenário 1

Quadro B. 1 – Cálculos de perda de carga da rede de condutas da torre 1: Solução 1, Cenário 1.

Troço <sup>a</sup>	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	$\Delta P$ linha <sup>b</sup> (Pa/m)	$\Delta P$ acessórios <sup>c</sup> (Pa)	$\Delta P$ total (Pa)
1	4375	2,5	450	7,6	1,46	103	106
2	5775	3,8	500	8,2	1,45	37	22
3	7650	26,4	550	8,9	1,54	120	161
4	9817	7,1	600	9,6	1,60	53	72
5	14350	2	706 <sup>a</sup>	8,9	1,45	143	65
6	14783	7,25	706 <sup>a</sup>	10,50	1,54	21	40
7	20850	53,4	800	11,53	1,58	290	381
8	1400	3,0	315	5,0	1,00	33	35
9	313	2,8	160	4,3	1,74	41	37
10	625	2,3	250	3,5	0,69	24	5

Quadro B. 1 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede de condutas da torre 1: Solução 1, Cenário 1.

11	938	2,3	250	5,3	1,49	13	13
12	1250	2,3	315	4,5	0,81	13	5
13	1563	2,3	315	5,6	1,23	5	7
14	1875	5,9	315	6,7	1,75	18	21
15	313	0,5	160	4,3	1,74	28	30
16	313	0,5	160	4,3	1,74	27	25
17	313	0,5	160	4,3	1,74	26	29
18	313	0,5	160	4,3	1,74	22	22
19	313	0,5	160	4,3	1,74	22	33
20	2167	6,5	355	6,1	1,26	7	14
21	1733	2,5	450	3,0	0,25	2	1
22	3567	3,0	450	6,2	0,99	5	3
23	4533	1,0	450	7,9	1,56	9	29
24	100	3,7	110	2,9	1,31	48	8
25	100	3,7	110	2,9	1,31	20	8
26	4333	6,5	450	7,6	1,43	6	16
Saída do ventilador	20850	1	800	11,5	1,58	112	113
Torre	20850	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>
Saída da Torre	20850	2,7	800	11,5	1,58	106	110

<sup>a</sup> ver Figura B. 1      <sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento turbulento de [36]

<sup>c</sup> ver Quadro B. 2      <sup>d</sup> diâmetro equivalente da conduta retangular de 850 x 500 mm

<sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga em enchimento limpo, comumente usado na indústria é de 350 Pa

Quadro B. 2 – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 1, cenário 1.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Código <sup>a</sup>	Parâmetros	Coeficiente (k)
1	1	Entrada	-	-	0,93
	2	simples	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Curva	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =1,2, θ=30°	0,25
	1	Transição	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,4; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,24	0,31
	1	Tê, linha Registo	6-1	D/D <sub>0</sub> =0,98, θ=0°	0,60
2	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,83, θ=30°	0,11
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,33; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,24	0,31

Quadro B. 2 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 1, cenário 1.

3	5	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,84$ , $\theta=30^\circ$	0,11
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,35$ ; $Q_b/Q_c= 0,22$	0,29
4	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Transição,	4-5	$A_0/A_1=0,72$ , $\theta=30^\circ$	0,17
	1	retangular/circular Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,56$ ; $Q_b/Q_c= 0,46$	0,50
5	4	Curva sem raio	3-6	$\theta=45^\circ$ , $H/W=1,8$	0,33
6	1	Transição,	4-5	$A_0/A_1=0,77$ , $\theta=30^\circ$	0,14
	1	retangular/circular Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c= 0,21$	0,29
7	6	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	90°, 4 gomos, $r/D=1$ , $L/D=0$	1,20
8	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c= 0,24$	0,16
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
9	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,41$ , $\theta=30^\circ$	0,40
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,41$ ; $Q_b/Q_c= 0,5$	0,53
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
10	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,41$ ; $Q_b/Q_c= 0,33$	0,40
11	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,26$ ; $Q_b/Q_c= 0,25$	0,32
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,63$ , $\theta=30^\circ$	0,24
12	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,26$ ; $Q_b/Q_c= 0,2$	0,27
13	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,25$ ; $Q_b/Q_c= 0,17$	0,24
14	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,33$ ; $Q_b/Q_c= 0,24$	0,4
15	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,41$ ; $Q_b/Q_c= 0,5$	1,1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
16	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,41$ ; $Q_b/Q_c= 0,33$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60

Quadro B. 2 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 1, cenário 1.

17	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,26$ ; $Q_b/Q_c= 0,25$	0,95
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
18	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,26$ ; $Q_b/Q_c= 0,2$	0,39
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
19	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,25$ ; $Q_b/Q_c= 0,17$	1,35
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
20	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,35$ ; $Q_b/Q_c= 0,22$	0,29
21	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,05$	0,08
22	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	0,05
23	1	Tê, ramal	5-7	$A_b/A_c=0,56$ $Q_b/Q_c= 0,46$	0,70
24	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,05$	-1
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
25	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	-1
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
26	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c= 0,21$	0,21
Saída do ventilador	1	Saída súbita	2-2	-	0,88
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ ; $\theta=0^\circ$	0,6
Torre	-	-	-	-	-
Saída da Torre	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=2,75$ ; $\theta =150^\circ$	0,33
	1	Chaminé	2-12	$D_e/D=1$	1,0

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

Quadro B. 3 – Perda de carga por percurso da rede da torre 1: Solução 1, cenário 1

Percurso	$\Delta P$ total (Pa)	Desequilíbrio
Elevação inicial poço do 1ºestágio 1-2-3-...-7	1420	Caminho crítico
Elevação inicial 1ºestágio 8-2-3-...-7	1348	-72 (-5,1%)
Elevação inicial 2ºestágio 9-10-...-14-3-4-...-7	1379	-41 (-2,9%)
Elevação inicial 2ºestágio 15-10-...-14-3-4-...-7	1373	-47 (-3,3%)
Elevação inicial 2ºestágio 16-11-...-14-3-4-...-7	1363	-58 (-4,1%)
Elevação inicial 2ºestágio 17-12-...-14-3-4-...-7	1320	-100 (-7,0%)
Elevação inicial 2ºestágio 18-13-...-14-3-4-...-7	1314	-106 (-7,5%)

Quadro B.3 (continuação) – Perda de carga por percurso da rede da torre 1: Solução 1, cenário 1

Elevação inicial 2ºestágio 19-14-...-14-3-4-...-7	1355	-65 (-4,6%)
Gradagem 20-4-5-6-7 (mais grelha*)	1155	-265 (-18,7%)
Gradagem 21-22-23-5-6-7 (mais grelha*)	1102	-318 (-22,4%)
Gradagem 24-22-23-5-6-7	1099	-321 (-22,6%)
Gradagem 25-23-5-6-7	1096	-324 (-22,8%)
Gradagem 26-7 (mais grelha*)	980	-440 (-31,0%)

\*grelha 125 x 525 mm com 10 Pa com registro totalmente aberto do modelo GLS-GLD do fabricante FINCO, cada grelha extrai 433,3 m<sup>3</sup>/h.

### Solução 1: Cenário 2

Quadro B. 4 – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 2

Troço <sup>a</sup>	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	ΔP linha <sup>b</sup> (Pa/m)	ΔP acessórios <sup>c</sup> (Pa)	ΔP total (Pa)
1	4375	2,5	450	7,6	1,46	103	106
2	5775	3,8	500	8,2	1,45	21	27
3	8900	26,4	600	8,7	1,33	118	153
4	11478	7,1	700	8,3	0,99	53	60
5	17666	2	726 <sup>d</sup>	10,9	1,87	131	134
6	18181	7,25	900	7,94	0,67	23	31
7	25400	53,4	900	11,10	1,27	275	343
8	1400	3,0	315	5,0	1,00	32	35
9	521	2,8	200	4,6	1,50	35	39
10	1042	2,3	250	5,9	1,82	24	28
11	1563	2,3	315	5,6	1,23	8	11
12	2083	2,3	355	5,8	1,17	8	10
13	2604	2,3	400	5,8	0,98	5	7
14	3125	5,9	400	6,9	1,39	18	26
15	521	0,5	200	4,6	1,50	28	28
16	521	0,5	200	4,6	1,50	27	28
17	521	0,5	200	4,6	1,50	25	25
18	521	0,5	200	4,6	1,50	24	25
19	521	0,5	200	4,6	1,50	22	23
20	2578	6,5	400	5,7	0,96	9	15
21	2063	2,5	500	2,9	0,21	0	1
22	4641	3,0	500	6,6	0,96	2	4
23	6188	1,0	500	8,8	1,66	7	10
24	516	3,7	200	4,6	1,47	3	8

Quadro B.4 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 2.

25	516	3,7	200	4,6	1,47	3	8
26	5156	6,5	500	7,3	1,17	7	15
Saída do ventilador	25400	1	800	14,0	2,29	112	168
Torre	25400	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>
Saída da Torre	25400	2,7	800	14,0	2,29	106	164

<sup>a</sup> ver Figura B. 1      <sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento turbulento de [36]

<sup>c</sup> ver Quadro B. 5      <sup>d</sup> diâmetro equivalente da conduta retangular 900 x 500 mm

<sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga em enchimento limpo, comumente usado na indústria é de 350 Pa

Quadro B. 5 – Coeficientes de perda de carga da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 2.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Código <sup>a</sup>	Parâmetros	Coeficiente (k)
1	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,81, θ=30°	0,11
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,4; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,24	0,31
	1	Registro	6-1	D/D <sub>0</sub> =0,98, θ=0°	0,60
2	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,81, θ=30°	0,11
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,44; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,35	0,42
3	5	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,74, θ=30°	0,16
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,33; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,23	0,31
4	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição, retangular/circular	4-5	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =1, θ=30°	0
	1	Tê, linha retangular	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,5; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,35	0,42
5	4	Curva sem raio	3-6	θ=45°, H/W=1,8	0,33
	1	Transição, retangular/circular	4-5	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,74, θ=30°	0,15
6	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,81, θ=30°	0,11
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,3; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,2	0,28
7	6	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	90°, 4 gomos, r/D=1, L/D=0	1,20

Quadro B. 5 (continuação) – Coeficientes de perda de carga da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 2.

8	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c= 0,24$	0,16
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
9	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,64$ , $\theta=30^\circ$	0,24
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,64$ ; $Q_b/Q_c= 0,5$	0,53
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
10	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c= 0,33$	0,40
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,63$ , $\theta=30^\circ$	0,24
11	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c= 0,25$	0,32
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79$ , $\theta=30^\circ$	0,11
12	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,25$ ; $Q_b/Q_c= 0,2$	0,27
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8$ , $\theta=30^\circ$	0,11
13	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,25$ ; $Q_b/Q_c= 0,17$	0,24
14	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,44$ ; $Q_b/Q_c= 0,35$	0,63
15	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,64$ ; $Q_b/Q_c= 0,5$	0,63
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
16	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c= 0,33$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
17	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c= 0,25$	0,41
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
18	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,25$ ; $Q_b/Q_c= 0,2$	0,39
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
19	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,25$ ; $Q_b/Q_c= 0,17$	0,18
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
20	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,33$ ; $Q_b/Q_c= 0,23$	0,40
21	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,05$ ; $Q_b/Q_c= 0,04$	0,08
22	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,05$ ; $Q_b/Q_c= 0,02$	0,08
23	1	Tê, ramal	5-7	$A_b/A_c=0,5$ $Q_b/Q_c= 0,35$	0,18

Quadro B. 5 (continuação) – Coeficientes de perda de carga da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 2.

24	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,05; Q_b/Q_c= 0,04$	-1
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
25	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,05; Q_b/Q_c= 0,02$	-1
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
26	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,3; Q_b/Q_c= 0,2$	0,20
Saída do ventilador	1	Saída súbita	2-2	-	0,88
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98; \theta=0^\circ$	0,6
Torre	-	-	-	-	-
Saída da Torre	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=2,75; \theta =150^\circ$	0,33
	1	Chaminé	2-12	$De/D=1$	1,0

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

Quadro B. 6 – Perda de carga por percurso da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 2.

Percurso	$\Delta P$ total (Pa)	Desequilíbrio
Elevação inicial poço do 1ºestágio 1-2-3-...-7	1536	Caminho crítico
Elevação inicial 1ºestágio 8-2-3-...-7	1464	-72 (-4,7%)
Elevação inicial 2ºestágio 9-10-...-14-3-4-...-7	1524	-12 (-0,8%)
Elevação inicial 2ºestágio 15-10-...-14-3-4-...-7	1514	-22 (-1,4%)
Elevação inicial 2ºestágio 16-11-...-14-3-4-...-7	1485	-51 (-3,3%)
Elevação inicial 2ºestágio 17-12-...-14-3-4-...-7	1428	-108 (-7,0%)
Elevação inicial 2ºestágio 18-13-...-14-3-4-...-7	1428	-108 (-7,0%)
Elevação inicial 2ºestágio 19-14-...-14-3-4-...-7	1454	-82 (-5,4%)
Gradagem 20-4-5-6-7 (mais grelha*)	1276	-260 (-16,9%)
Gradagem 21-22-23-5-6-7 (mais grelha*)	1215	-321 (-20,9%)
Gradagem 24-22-23-5-6-7	1210	-326 (-21,2%)
Gradagem 25-23-5-6-7	1207	-329 (-21,4%)
Gradagem 26-7 (mais grelha*)	1050	-486 (-31,7%)

\*grelha 125 x 625 mm com 11 Pa com registo totalmente aberto do modelo GLS-GLD do fabricante FINCO, cada grelha extrai 515,6 m<sup>3</sup>/h.

### Solução 1: Cenário 3

Quadro B. 7 – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 3.

Troço <sup>a</sup>	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	$\Delta P$ linha <sup>b</sup> (Pa/m)	$\Delta P$ acessórios <sup>c</sup> (Pa)	$\Delta P$ total (Pa)
1	4375	2,5	450	7,6	1,46	98	101
2	5775	3,8	500	8,2	1,45	26	32
3	9525	26,4	600	9,4	1,51	158	198
4	14985	7,1	710	10,5	1,53	119	130
5	26145	2	802 <sup>a</sup>	16,1	2,39	206	210
6	26577	7,25	802 <sup>a</sup>	14,6	2,47	129	143
7	39225	53,4	1100	11,5	1,06	294	350
8	1400	3,0	315	5,0	1,00	32	35
9	625	2,8	250	3,5	0,69	20	22
10	1250	2,3	315	4,5	0,81	14	16
11	1875	2,3	355	5,3	0,96	15	19
12	2500	2,3	400	5,5	0,91	5	7
13	3125	2,3	400	6,9	1,39	10	13
14	3750	5,9	450	6,6	1,09	16	22
15	625	0,5	250	3,5	0,69	16	17
16	625	0,5	250	3,5	0,69	14	14
17	625	0,5	250	3,5	0,69	13	13
18	625	0,5	250	3,5	0,69	11	12
19	625	0,5	250	3,5	0,69	11	11
20	5460	6,5	500	7,7	1,31	20	28
21	4368	2,5	630	3,9	0,27	0	1
22	8856	3,0	630	7,9	1,03	0	3
23	11160	1,0	630	9,9	1,59	28	32
24	120	3,7	110	3,5	1,85	4	11
25	120	3,7	110	3,5	1,85	4	11
26	10920	6,5	630	9,7	1,53	39	48
Saída do ventilador	39225	1	1100	11,5	1,06	111	112
Torre	39225	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>

Quadro B.7 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 3.

Saída da Torre	39225	2,7	1100	11,5	1,06	105	108
----------------	-------	-----	------	------	------	-----	-----

<sup>a</sup> ver Figura B. 1      <sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento turbulento de [36]

<sup>d</sup> diâmetro equivalente da conduta retangular de 1000 x 550 mm

<sup>c</sup> ver Quadro B. 8      <sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga em enchimento limpo, comumente usado na indústria é de 350 Pa

Quadro B. 8 – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 3.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Código <sup>a</sup>	Parâmetros	Coeficiente (k)
1	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,81$ , $\theta=30^\circ$	0,11
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c=0,24$	0,32
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
2	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79$ , $\theta=30^\circ$	0,11
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,51$ ; $Q_b/Q_c=0,40$	0,46
3	5	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,62$ ; $\theta=30^\circ$	0,24
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,5$ ; $Q_b/Q_c=0,36$	0,72
4	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição, retangular/circular	4-5	$A_0/A_1=0,91$ , $\theta=30^\circ$	0,06
	1	Tê, linha retangular	5-7	$A_b/A_c=0,71$ ; $Q_b/Q_c=0,43$	0,48
5	4	Curva sem raio	3-6	$\theta=45^\circ$ , H/W=1,8	0,33
	1	Transição, retangular/circular	5-3	$A_0/A_1=0,71$ , $\theta=30^\circ$	0,18
6	1	Tê, linha	4-5	$A_b/A_c=0,35$ ; $Q_b/Q_c=0,26$	0,33
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,7$ ; $\theta=30^\circ$	0,19
7	6	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	90°, 4 gomos, r/D=1, L/D=0	1,20
8	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c=0,24$	0,41
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60

Quadro B. 8 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 3.

9	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,63$ , $\theta=30^\circ$	0,24
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,63$ ; $Q_b/Q_c= 0,5$	0,53
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
10	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,50$ ; $Q_b/Q_c= 0,33$	0,40
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79$ , $\theta=30^\circ$	0,11
11	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c= 0,25$	0,32
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79$ , $\theta=30^\circ$	0,11
12	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,31$ ; $Q_b/Q_c= 0,2$	0,27
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8$ , $\theta=30^\circ$	0,11
13	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,31$ ; $Q_b/Q_c= 0,17$	0,24
14	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,51$ ; $Q_b/Q_c= 0,40$	0,74
15	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,63$ ; $Q_b/Q_c= 0,5$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
16	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,50$ ; $Q_b/Q_c= 0,33$	0,45
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
17	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c= 0,25$	0,21
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
18	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,31$ ; $Q_b/Q_c= 0,2$	0,44
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
19	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,31$ ; $Q_b/Q_c= 0,17$	-0,03
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
20	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,5$ ; $Q_b/Q_c= 0,36$	0,57
21	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,03$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	0,05
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,62$ ; $\theta =30^\circ$	0,24
22	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,02$ ; $Q_b/Q_c= 0,01$	0,01
23	1	Tê, ramal	5-7	$A_b/A_c=0,71$ ; $Q_b/Q_c= 0,43$	0,48
24	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,02$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	-1
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93

Quadro B. 8 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 3.

25	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,02$ ; $Q_b/Q_c= 0,01$	-1
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Entrada simples	-	-	0,93
26	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,35$ ; $Q_b/Q_c= 0,26$	0,42
Saída do ventilador	1	Saída súbita	2-2	-	0,88
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ ; $\theta=0^\circ$	0,6
Torre	-	-	-	-	-
Saída da Torre	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=2,75$ ; $\theta =150^\circ$	0,33
	1	Chaminé	2-12	$De/D=1$	1,0

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

Quadro B. 9 – Perda de carga por percurso da rede da torre 1: Solução 1, Cenário 3.

Percurso	$\Delta P$ total (Pa)	Desequilíbrio
Elevação inicial poço do 1ºestágio 1-2-3-...-7	1402	Caminho crítico
Elevação inicial 1ºestágio 8-2-3-...-7	1374	-28 (-2%)
Elevação inicial 2ºestágio 9-10-...-14-3-4-...-7	1398	-4 (-0,3%)
Elevação inicial 2ºestágio 15-10-...-14-3-4-...-7	1392	-10 (-0,7%)
Elevação inicial 2ºestágio 16-11-...-14-3-4-...-7	1383	-19 (-1,4%)
Elevação inicial 2ºestágio 17-12-...-14-3-4-...-7	1331	-71 (-5%)
Elevação inicial 2ºestágio 18-13-...-14-3-4-...-7	1333	-69 (-4,9%)
Elevação inicial 2ºestágio 19-14-...-14-3-4-...-7	1346	-56 (-4%)
Gradagem 20-4-5-6-7 (mais grelha*)	1189	-213 (-15,2%)
Gradagem 21-22-23-5-6-7 (mais grelha*)	1134	-267 (-19,1%)
Gradagem 24-22-23-5-6-7	1123	-279 (-19,9%)
Gradagem 25-23-5-6-7	1122	-280 (-20,0%)
Gradagem 26-7 (mais grelha*)	855	-547 (-39,0%)

\*grelha 125 x 1025 mm com 17 Pa com registo totalmente aberto do modelo GLS-GLD do fabricante FINCO, cada grelha extrai 1092 m<sup>3</sup>/h.

## Solução 2



Figura B. 2 – Rede de condutas da linha da torre 1: Solução 2.

Quadro B. 10 – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

Troço <sup>a</sup>	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	$\Delta P$ linha <sup>b</sup> (Pa/m)	$\Delta P$ acessórios <sup>c</sup> (Pa)	$\Delta P$ total (Pa)
1	4375	2,50	450	7,6	1,46	98	101
2	5775	10,60	500	8,2	1,45	37	52
3	6088	2,25	500	8,6	1,61	4	7
4	6400	2,25	500	9,1	1,77	4	8
5	6713	2,25	500	9,5	1,94	10	15
6	7025	2,25	560	7,9	1,20	2	5
7	7338	2,25	560	8,3	1,30	2	5
8	7650	27,10	560	8,6	1,41	109	147
9	9006	5,00	600	8,9	1,36	12	19
10	10561	2,70	600	10,4	1,83	33	38
11	14150	8,10	710	9,9	1,37	30	41
12	19294	5,20	800	10,7	1,36	68	75
13	20850	32,95	800	11,5	1,58	263	315

Quadro B. 10 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

14	1400	3,10	315	5,0	1,00	32	35
15	313	1,00	160	4,3	1,74	15	16
16	313	1,00	160	4,3	1,74	14	16
17	313	1,00	160	4,3	1,74	14	16
18	313	1,00	160	4,3	1,74	6	8
19	313	1,00	160	4,3	1,74	6	8
20	313	1,00	160	4,3	1,74	6	8
21=23	678	2,23	315	2,4	0,25	5	5
22	1356	5,00	315	4,8	0,94	6	10
24	100	3,70	110	2,9	1,31	13	18
25	778	2,80	315	2,8	0,33	1	2
26	1556	4,70	315	5,5	1,22	12	18
27	100	3,70	110	2,9	1,31	11	15
28	2033	5,75	354	5,7	1,13	31	37
29	2811	2,85	400	6,2	1,14	1	5
30	3589	3,20	400	7,9	1,81	48	54
31	100	3,70	110	2,9	1,31	3	8
32	100	3,70	110	2,9	1,31	3	8
33	678	2,65	315	2,4	0,25	4	5
34	2033	1,40	355	5,7	1,12	4	5
35	3489	2,15	400	7,7	1,71	2	5
36	3589	2,15	400	7,9	1,81	6	10
37	5044	2,15	450	8,8	1,91	1	6
38	5144	6,81	450	9,0	1,98	52	66
39	1356	5,40	315	4,8	0,94	27	32
40	100	4,70	110	2,9	1,31	5	11
41	100	2,7	110	2,9	1,31	6	10
42	100	4,70	110	2,9	1,31	5	11
43	100	2,7	110	2,9	1,31	6	10
44	100	3,7	111	2,9	1,25	13	18
45	778	2,65	250	4,4	1,05	5	8
46	1556	9,36	315	5,5	1,22	28	40
47	100	3,7	110	2,9	1,31	14	19
Saída do ventilador	20850	1	800	11,5	1,58	112	113
Torre	20850	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>

Quadro B. 10 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

Saída da Torre	20850	2,7	800	11,5	1,58	106	110
----------------	-------	-----	-----	------	------	-----	-----

<sup>a</sup> ver Figura B. 2

<sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento turbulento de [36]

<sup>d</sup> diâmetro equivalente da conduta retangular 350x300

<sup>c</sup> ver Quadro B.11

<sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga em enchimento limpo, comumente usado na indústria é de 350 Pa

Quadro B.11 – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Código <sup>a</sup>	Parâmetros	Coeficiente (k)
1	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,81$ , $\theta=30^\circ$	0,11
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c=0,24$	0,31
	1	Registro	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
2	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,1$ ; $Q_b/Q_c=0,05$	0,08
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
3	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,1$ ; $Q_b/Q_c=0,05$	0,08
4	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,1$ ; $Q_b/Q_c=0,05$	0,08
5	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c=0,04$	0,06
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8$ , $\theta=30^\circ$	0,13
6	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c=0,04$	0,06
7	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c=0,04$	0,06
8	5	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,28$ ; $Q_b/Q_c=0,15$	0,25
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,87$ , $\theta=30^\circ$	0,08
9	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,28$ ; $Q_b/Q_c=0,15$	0,25
10	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,31$ ; $Q_b/Q_c=0,25$	0,32
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,7$ , $\theta=30^\circ$	0,19
11	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c=0,27$	0,38
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8$ , $\theta=30^\circ$	0,13
12	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=1$ ; $Q_b/Q_c=0,92$	1,0
13	5	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	90°, 4 gomos, r/D=1, L/D=0	1,20

Quadro B.11 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

14	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4; Q_b/Q_c= 0,24$	0,16
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
15	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,1; Q_b/Q_c= 0,05$	-0,30
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
16	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,1; Q_b/Q_c= 0,05$	-0,30
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
17	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,1; Q_b/Q_c= 0,05$	-0,30
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
18	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,08; Q_b/Q_c= 0,04$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
19	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,08; Q_b/Q_c= 0,04$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
20	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,08; Q_b/Q_c= 0,04$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
21	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_b/A_c=1; Q_b/Q_c= 0,5; Q_s/Q_c=0$	1,4
22	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,28; Q_b/Q_c= 0,15$	-0,02
	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
23	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_b/A_c=1; Q_b/Q_c= 0,5; Q_s/Q_c=0$	1,4
24	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,6
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,12; \theta=30^\circ$	0,57
25	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,12; Q_b/Q_c= 0,11$	0,16
26	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,28; Q_b/Q_c= 0,15$	0,25
	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42

Quadro B.11 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

27	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,12$ ; $Q_b/Q_c= 0,11$	0,54
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
28	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,05$	0,08
	1	Transição, retangular/circular	4-5	$A_0/A_1=0,8$ $\theta=30^\circ$	0,12
	4	Curva sem raio	3-6	$\theta=45^\circ$ , $H/W=1,2$	0,34
29	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	0,06
30	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,31$ ; $Q_b/Q_c= 0,25$	0,85
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
31	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,05$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
32	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
33	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_b/A_c=0,8$ ; $Q_{2b}/Q_c= 0,33$ ; $Q_s/Q_c=0$	1,2
34	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,05$	0,06
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8$ ; $\theta=30^\circ$	0,13
35	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	0,05
36	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	0,05
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8$ , $\theta=30^\circ$	0,12
37	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,02$	0,03
38	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c= 0,27$	0,66
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
39	1	Tê, ramal	5-35	$A_b/A_c=0,8$ ; $Q_{1b}/Q_c= 0,66$ ; $Q_s/Q_c=0$	1,93 <sup>p</sup>
40	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,05$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42

Quadro B.11 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

41	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	-1
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registro	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
42	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,03$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registro	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
43	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,02$	-1
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registro	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
44	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,2$ , $\theta=30^\circ$	0,5
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	2	Registro	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
45	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,12$ ; $Q_b/Q_c= 0,11$	0,16
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,6$ , $\theta=30^\circ$	0,26
46	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=1$ ; $Q_b/Q_c= 0,93$	0,55
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,15$ , $\theta=30^\circ$	0,55
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
47	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,12$ ; $Q_b/Q_c= 0,11$	0,54
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registro	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
Saída do ventilador	1	Saída súbita	2-2	-	0,88
	1	Registro	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
Torre	-	-	-	-	-
Saída da Torre	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=2,75$ $\theta=150^\circ$	0,33
	1	Chaminé	2-12	$D_e/D=1$	1,0

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

<sup>b</sup> valor extrapolado

Quadro B. 12 – Perda de carga por percurso da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 1.

<b>Percurso</b>	<b><math>\Delta P</math> total (Pa)</b>	<b>Desequilíbrio</b>
Elevação inicial poço do 1ºestágio 1-2-...-13	1378	Caminho crítico
Elevação inicial 1ºestágio 14-2-3-...-13	1312	-67(-4,8%)
Elevação inicial 2ºestágio 15-3-4-...-13	1241	-137(-10,0%)
Elevação inicial 2ºestágio 16-4-5-...-13	1233	-145(-10,6%)
Elevação inicial 2ºestágio 17-5-6-...-13	1225	-153(-11,1%)
Elevação inicial 2ºestágio 18-6-7-...-13	1203	-176(-12,8%)
Elevação inicial 2ºestágio 19-7-8-...-13	1198	-181(-13,1%)
Elevação inicial 2ºestágio 20-8-9-...-13	1192	-186(-13,5%)
Gradagem 23(21)-22-9-10-...-13 (mais grelha*)	1071	-307(-22,3%)
Gradagem 26-27-10-...-13	1053	-326(-23,6%)
Gradagem 24-25-26-10-...-13	1057	-322(-23,3%)
Gradagem 25-26-10-...-13 (mais grelha*)	1057	-322(-23,3%)
Gradagem 28-29-30-11-...-13 (mais grelha*)	1095	-284(-20,6%)
Gradagem 31-29-30-11-12-13	1047	-331(-24,0%)
Gradagem 32-30-11-12-13	1043	-336(-24,4%)
Gradagem 33-...-38-12-13 (mais grelha*)	1055	-324(-23,5%)
Gradagem 39-34-...-38-12-13 (mais grelha*)	1082	-296(-21,5%)
Gradagem 40-35-...-38-12-13	1038	-340(-24,7%)
Gradagem 41-36-...-38-12-13	1031	-347(-25,2%)
Gradagem 42-37-38-12-13	1022	-356(-25,8%)
Gradagem 43-38-12-13	1016	-363(-26,3%)
Gradagem 44-45-46-13	930	-449(-31,5%)
Gradagem 45-46-13 (mais grelha*)	929	-455(-33,0%)
Gradagem 47-46-13	923	-449(-32,6%)

\*grelha 125 x 625 mm com 17,5 Pa com registo totalmente aberto do modelo GLS-GLD do fabricante FINCO, cada grelha extrai 678 m<sup>3</sup>/h.

## Solução 2: Cenário 2

Quadro B. 13 – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

<b>Troço<sup>a</sup></b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b><math>\Delta P</math> linha<sup>b</sup> (Pa/m)</b>	<b><math>\Delta P</math> acessórios<sup>c</sup> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P</math> total (Pa)</b>
1	4375	2,50	450	7,6	1,46	98	101
2	5775	10,60	500	8,2	1,45	39	54
3	6296	2,25	500	8,9	1,71	12	16
4	6817	2,25	560	7,7	1,13	4	6

Quadro B. 13 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

5	7338	2,25	560	8,3	1,30	5	7
6	7858	2,25	560	8,9	1,48	5	8
7	8379	2,25	560	9,5	1,67	10	13
8	8900	27,10	600	8,7	1,33	108	144
9	10622	5,00	600	10,4	1,85	26	35
10	12544	2,70	710	8,8	1,09	24	27
11	17050	8,10	800	9,4	1,08	27	36
12	23478	5,20	900	10,3	1,09	63	69
13	25400	32,95	900	11,1	1,27	244	286
14	1400	3,10	315	5,0	1,00	32	35
15	521	1,00	200	4,6	1,50	17	18
16	521	1,00	200	4,6	1,50	16	17
17	521	1,00	200	4,6	1,50	15	17
18	521	1,00	200	4,6	1,50	15	17
19	521	1,00	200	4,6	1,50	14	16
20	521	1,00	200	4,6	1,50	19	21
21=23	861	2,23	315	3,1	0,40	8	9
22	1722	5,00	315	6,1	1,49	9	16
24	100	3,70	110	2,9	1,31	13	18
25	961	2,80	315	3,4	0,49	1	2
26	1922	4,70	315	6,9	1,83	17	26
27	100	3,70	110	2,9	1,31	9	14
28	2583	5,75	400	5,7	0,97	28	33
29	3544	2,85	400	7,8	1,76	2	7
30	4506	3,20	450	7,9	1,54	40	45
31	100	3,70	110	2,9	1,31	3	8
32	100	3,70	110	2,9	1,31	3	8
33	861	2,65	315	3,1	0,40	4	5
34	2583	1,40	355	7,3	1,76	9	12
35	4406	2,15	450	7,7	1,48	1	4
36	4506	2,15	450	7,9	1,54	11	14
37	6328	2,15	560	7,1	0,98	1	3
38	6428	6,81	560	7,3	1,01	23	30
39	1722	5,40	315	6,1	1,49	44	52
40	100	4,70	110	2,9	1,31	5	11
41	100	2,7	110	2,9	1,31	6	10
42	100	4,70	110	2,9	1,31	5	11
43	100	2,7	110	2,9	1,31	6	10

Quadro B. 13 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

44	100	3,7	110	2,9	1,31	16	21
45	961	2,65	250	5,4	1,56	9	13
46	1922	9,36	355	5,4	1,00	27	36
47	100	3,7	110	2,9	1,31	13	18
Saída do ventilador	25400	1	800	14,0	2,29	112	168
Torre	25400	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>
Saída da Torre	25400	2,7	800	14,0	2,29	106	164

<sup>a</sup> ver Figura B. 2      <sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento turbulento de [36]

<sup>d</sup> diâmetro equivalente da conduta retangular 450x300

<sup>c</sup> ver Quadro B.14      <sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga em enchimento limpo, comumente usado na indústria é de 350 Pa

Quadro B.14 – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Código <sup>a</sup>	Parâmetros	Coefficiente (k)
1	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,81, θ=30°	0,11
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,4; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,24	0,31
	1	Registo	6-1	D/D <sub>0</sub> =0,98, θ=0°	0,60
2	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,16; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,08	0,13
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
3	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,8, θ=30°	0,13
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,13; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,08	0,13
4	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,13; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,07	0,11
5	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,13; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,07	0,11
6	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,13; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,06	0,10
7	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,13; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,06	0,10
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,87, θ=30°	0,08
8	5	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,28; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,16	0,25
9	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,7, θ=30°	0,19
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,20; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,15	0,21

Quadro B.14 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

10	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,32; Q_b/Q_c= 0,27$	0,38
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8, \theta=30^\circ$	0,13
11	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4; Q_b/Q_c= 0,27$	0,38
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,8, \theta=30^\circ$	0,13
12	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=1; Q_b/Q_c= 0,92$	1,0
13	5	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	$90^\circ, 4 \text{ gomos}, r/D=1, L/D=0$	1,20
14	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4; Q_b/Q_c= 0,24$	0,16
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
15	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,16; Q_b/Q_c= 0,08$	-0,22
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
16	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,13; Q_b/Q_c= 0,08$	-0,30
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
17	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,13; Q_b/Q_c= 0,07$	-0,33
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
18	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,13; Q_b/Q_c= 0,07$	-0,33
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
19	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,13; Q_b/Q_c= 0,06$	-0,42
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
20	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,13; Q_b/Q_c= 0,06$	-0,02
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
21	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_b/A_c=1; Q_b/Q_c= 0,5; Q_s/Q_c=0$	1,4
22	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,28; Q_b/Q_c= 0,16$	-0,02
	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
23	1	Cruzeta, $90^\circ$ , ramal	5-35	$A_b/A_c=1; Q_b/Q_c= 0,5; Q_s/Q_c=0$	1,4

Quadro B.14 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

24	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,12$ ; $\theta=30^\circ$	0,57
25	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,12$ ; $Q_b/Q_c=0,09$	0,14
26	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,20$ ; $Q_b/Q_c=0,15$	0,18
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
27	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,12$ ; $Q_b/Q_c=0,09$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
28	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c=0,04$	0,06
	1	Transição, retangular/circular	4-5	$A_0/A_1=1$ , $\theta=30^\circ$	0
	4	Curva sem raio	3-6	$\theta=45^\circ$ , $H/W=1,5$	0,33
29	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c=0,03$	0,05
30	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,32$ ; $Q_b/Q_c=0,27$	0,66
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
31	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,08$ ; $Q_b/Q_c=0,04$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
32	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c=0,03$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
33	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_b/A_c=0,8$ ; $Q_{2b}/Q_c=0,33$ ; $Q_s/Q_c=0$	0,73
34	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c=0,04$	0,05
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,62$ ; $\theta=30^\circ$	0,24
35	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c=0,02$	0,03
36	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,04$ ; $Q_b/Q_c=0,02$	0,10
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,65$ , $\theta=30^\circ$	0,20
37	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,04$ ; $Q_b/Q_c=0,01$	0,02
38	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4$ ; $Q_b/Q_c=0,27$	0,30
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
39	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_b/A_c=0,8$ ; $Q_{1b}/Q_c=0,66$ ; $Q_s/Q_c=0$	1,93 <sup>b</sup>

Quadro B.14 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

40	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,04$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
41	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,02$	-1
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	$45^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
42	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,04$ ; $Q_b/Q_c= 0,02$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
43	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,04$ ; $Q_b/Q_c= 0,01$	-1
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	$45^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
44	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,2$ , $\theta=30^\circ$	0,5
	2	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	$45^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
45	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,1$ ; $Q_b/Q_c= 0,1$	0,16
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,5$ , $\theta=30^\circ$	0,32
46	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=1$ ; $Q_b/Q_c= 0,92$	0,55
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,15$ , $\theta=30^\circ$	0,55
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
47	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,1$ ; $Q_b/Q_c= 0,1$	0,40
	1	Curva	3-2	$90^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	$45^\circ$ , 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
Saída do ventilador	1	Saída súbita	2-2	-	0,88
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
Torre	-	-	-	-	-

Quadro B.14 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

Saída da Torre	1 1	Transição Chaminé	4-1 2-12	$A_0/A_1=2,75$ $\theta=150^\circ$ $De/D=1$	0,33 1,0
----------------	--------	----------------------	-------------	---	-------------

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

<sup>b</sup> valor extrapolado

Quadro B. 15 – Perda de carga por percurso da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 2.

Percurso	$\Delta P$ total (Pa)	Desequilíbrio
Elevação inicial poço do 1ºestágio 1-2-...-13	1450	Caminho crítico
Elevação inicial 1ºestágio 14-2-3-...-13	1383	-67(-4,6%)
Elevação inicial 2ºestágio 15-3-4-...-13	1312	-138(-9,5%)
Elevação inicial 2ºestágio 16-4-5-...-13	1295	-155(-10,7%)
Elevação inicial 2ºestágio 17-5-6-...-13	1288	-162(-11,2%)
Elevação inicial 2ºestágio 18-6-7-...-13	1281	-169(-11,7%)
Elevação inicial 2ºestágio 19-7-8-...-13	1271	-178(-12,3%)
Elevação inicial 2ºestágio 20-8-9-...-13	1263	-187(-12,9%)
Gradagem 23(21)-22-9-10-...-13 (mais grelha*)	1140	-310(-21,4%)
Gradagem 26-27-10-...-13	1103	-347(-23,9%)
Gradagem 24-25-26-10-...-13	1109	-341(-23,5%)
Gradagem 25-26-10-...-13 (mais grelha*)	1107	-343(-23,6%)
Gradagem 28-29-30-11-...-13 (mais grelha*)	1138	-312(-21,5%)
Gradagem 31-29-30-11-12-13	1096	-354(-24,4%)
Gradagem 32-30-11-12-13	1089	-361(-24,9%)
Gradagem 33-...-38-12-13 (mais grelha*)	1084	-365(-25,2%)
Gradagem 39-34-...-38-12-13 (mais grelha*)	1131	-319(-22,0%)
Gradagem 40-35-...-38-12-13	1063	-387(-26,7%)
Gradagem 41-36-...-38-12-13	1057	-393(-27,1%)
Gradagem 42-37-38-12-13	1044	-406(-28,0%)
Gradagem 43-38-12-13	1040	-410(-28,3%)
Gradagem 44-45-46-13	1001	-449(-30,9%)
Gradagem 45-46-13 (mais grelha*)	986	-464(-32,0%)
Gradagem 47-46-13	996	-453(-31,3%)

\*grelha 125 x 825 mm com 16 Pa com registo totalmente aberto do modelo GLS-GLD do fabricante FINCO, cada grelha extrai 861 m<sup>3</sup>/h.

## Solução 2: Cenário 3

Quadro B. 16 – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

Troço <sup>a</sup>	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	$\Delta P$ linha <sup>b</sup> (Pa/m)	$\Delta P$ acessórios <sup>c</sup> (Pa)	$\Delta P$ total (Pa)
1	4375	2,50	500	6,2	0,86	64	66
2	5775	10,60	560	6,5	0,82	25	33
3	6400	2,25	560	7,2	1,00	8	10
4	7025	2,25	560	7,9	1,20	4	7
5	7650	2,25	630	6,8	0,78	3	5
6	8275	2,25	630	7,4	0,90	3	5
7	8900	2,25	710	6,2	0,57	4	5
8	9525	27,10	710	6,7	0,65	63	81
9	13058	5,00	710	9,2	1,18	20	26
10	16832	2,70	800	9,3	1,05	27	29
11	25905	8,10	1000	9,2	0,78	26	32
12	38752	5,20	1100	11,3	1,03	77	82
13	42525	32,95	1200	10,4	0,80	216	242
14	1400	3,10	315	5,0	1,00	32	35
15	625	1,00	250	3,5	0,69	10	11
16	625	1,00	250	3,5	0,69	9	10
17	625	1,00	250	3,5	0,69	9	10
18	625	1,00	250	3,5	0,69	9	10
19	625	1,00	250	3,5	0,69	8	9
20	625	1,00	250	3,5	0,69	11	12
21=23	1767	2,23	355	5,0	0,86	21	23
22	3533	5,00	450	6,2	0,97	9	14
24	120	3,70	110	3,5	1,85	19	25
25	1887	2,80	400	4,2	0,53	1	3
26	3773	4,70	450	6,6	1,10	16	21
27	120	3,70	110	3,5	1,85	13	20
28	5300	5,75	567	5,8	0,66	29	33
29	7187	2,85	560	8,1	1,25	2	6
30	9073	3,20	630	8,1	1,08	42	46
31	120	3,70	110	3,5	1,85	4	11
32	120	3,70	110	3,5	1,85	4	11
33	1767	2,65	355	5,0	0,86	4	5
34	5300	1,40	560	6,0	0,70	6	7
35	8953	2,15	630	8,0	1,05	1	3

Quadro B. 16 (continuação) – Cálculos de perda de carga da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

36	9073	2,15	630	8,1	1,08	12	14
37	12727	2,15	710	8,9	1,12	1	3
38	12847	6,81	710	9,0	1,14	35	43
39	3533	5,40	450	6,2	0,97	44	49
40	120	4,70	110	3,5	1,85	7	16
41	120	2,7	110	3,5	1,85	9	14
42	120	4,70	110	3,5	1,85	7	16
43	120	2,7	110	3,5	1,85	9	14
44	120	3,7	110	3,5	1,85	23	30
45	1887	2,65	355	5,3	0,97	8	11
46	3773	9,36	450	6,6	1,10	40	50
47	120	3,7	110	3,5	1,85	19	26
Saída do ventilador	42525	1	1200	10,4	0,8	72	73
Torre	42525	-	-	-	-	-	350 <sup>e</sup>
Saída da Torre	42525	2,7	1200	10,4	0,8	87	89

<sup>a</sup> ver Figura B. 2      <sup>b</sup> perda de carga na conduta circular de aço galvanizado com escoamento turbulento de [36]

<sup>d</sup> diâmetro equivalente da conduta retangular 450x600

<sup>c</sup> ver Quadro B.17      <sup>e</sup> valor standard assumido na literatura de perda de carga em enchimento limpo, comumente usado na indústria é de 350 Pa

Quadro B.17 – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

Troço	Qtd.	Tipo de acessório	Código <sup>a</sup>	Parâmetros	Coeficiente (k)
1	1	Entrada simples	-	-	0,93
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,81, θ=30°	0,11
	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,32; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,24	0,31
	1	Registo	6-1	D/D <sub>0</sub> =0,98, θ=0°	0,60
2	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,2; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,1	0,17
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, r/D=1	0,42
3	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,2; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,08	0,13
4	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,16; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,08	0,13
	1	Transição	4-1	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =0,8, θ=30°	0,13
5	1	Tê, linha	5-3	A <sub>b</sub> /A <sub>c</sub> =0,16; Q <sub>b</sub> /Q <sub>c</sub> = 0,07	0,11

Quadro B.17 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

6	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,12; Q_b/Q_c= 0,07$	0,11
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79, \theta=30^\circ$	0,11
7		Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,12; Q_b/Q_c= 0,06$	0,10
8	5	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,27; Q_b/Q_c= 0,4$	0,46
9	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79, \theta=30^\circ$	0,11
	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,32; Q_b/Q_c= 0,22$	0,29
10	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,4; Q_b/Q_c= 0,35$	0,42
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,64, \theta=30^\circ$	0,24
11	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,42; Q_b/Q_c= 0,33$	0,40
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,83, \theta=30^\circ$	0,11
12	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,84; Q_b/Q_c= 0,9$	1,16
13	5	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
	1	Curva à entrada do ventilador	7-4	$90^\circ, 4 \text{ gomos}, r/D=1, L/D=0$	1,20
14	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,32; Q_b/Q_c= 0,24$	0,40
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
	1	Curva	3-2	$90^\circ, 3 \text{ gomos}, r/D=1$	0,42
15	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,2; Q_b/Q_c= 0,1$	-0,37
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
16	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,2; Q_b/Q_c= 0,08$	-0,50
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
17	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,16; Q_b/Q_c= 0,08$	-0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
18	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,16; Q_b/Q_c= 0,07$	-0,34
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
19	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,12; Q_b/Q_c= 0,07$	-0,13
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60
20	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,12; Q_b/Q_c= 0,06$	-0,02
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,60

Quadro B.17 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

21	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_b/A_c=1; Q_{b2}/Q_{b1}=1;$ $Q_b/Q_c=0,62; Q_s/Q_c=0$	1,86
22	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,27; Q_b/Q_c=0,4$	2,76
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
23	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_b/A_c=1; Q_{b2}/Q_{b1}=1;$ $Q_b/Q_c=0,62; Q_s/Q_c=0$	1,86
24	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,6
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,08; \theta=30^\circ$	0,6
25	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,06; Q_b/Q_c=0,06$	0,10
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79, \theta=30^\circ$	0,11
26	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,32; Q_b/Q_c=0,22$	0,28
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
27	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06; Q_b/Q_c=0,06$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,6
28	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,04; Q_b/Q_c=0,02$	0,03
	1	Transição, retangular/circular	4-5	$A_0/A_1=1, \theta=30^\circ$	0
	4	Curva sem raio	3-6	$\theta=45^\circ, H/W=1,5$	0,33
29	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,03; Q_b/Q_c=0,02$	0,03
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79, \theta=30^\circ$	0,11
30	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,4; Q_b/Q_c=0,35$	0,69
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
31	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,04; Q_b/Q_c=0,02$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,6
32	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,03; Q_b/Q_c=0,02$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98, \theta=0^\circ$	0,6
33	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_b/A_c=0,65; Q_{2b}/Q_c=0,33;$ $Q_s/Q_c=0$	0,73
34	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,05; Q_b/Q_c=0,02$	0,03
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79; \theta=30^\circ$	0,11
35	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,03; Q_b/Q_c=0,01$	0,02
36	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,02; Q_b/Q_c=0,01$	0,02
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,79, \theta=30^\circ$	0,11

Quadro B.17 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por trecho da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

37	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,02$ ; $Q_b/Q_c= 0,01$	0,02
38	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,42$ ; $Q_b/Q_c= 0,33$	0,60
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
39	1	Cruzeta, 90°, ramal	5-35	$A_b/A_c=0,65$ ; $Q_{1b}/Q_c= 0,66$ ; $Q_s/Q_c=0$	1,93 <sup>b</sup>
40	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,05$ ; $Q_b/Q_c= 0,02$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
41	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,03$ ; $Q_b/Q_c= 0,01$	-1
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
42	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,02$ ; $Q_b/Q_c= 0,01$	-1
	1	Entrada simples	-	-	0,93
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,60
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
43	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,02$ ; $Q_b/Q_c= 0,01$	-1
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
44	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,1$ , $\theta=30^\circ$	0,59
	2	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93
45	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,84$ ; $Q_b/Q_c= 0,9$	0,59
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,14$ , $\theta=30^\circ$	0,32
46	1	Tê, linha	5-3	$A_b/A_c=0,14$ ; $Q_b/Q_c= 0,09$	0,14
	1	Transição	4-1	$A_0/A_1=0,14$ , $\theta=30^\circ$	0,55
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
47	1	Tê, ramal	5-3	$A_b/A_c=0,06$ ; $Q_b/Q_c= 0,06$	-1
	1	Curva	3-2	90°, 3 gomos, $r/D=1$	0,42
	1	Registo	6-1	$D/D_0=0,98$ , $\theta=0^\circ$	0,6
	1	Curva	3-2	45°, 3 gomos, $r/D=1$	0,25
	1	Entrada simples	-	-	0,93

Quadro B.17 (continuação) – Coeficientes de perda de carga por troço da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

Saída do ventilador	1 1	Saída súbita Registo	2-2 6-1	- D/D <sub>0</sub> =0,98, θ=0°	0,88 0,6
Torre	-	-	-	-	-
Saída da Torre	1 1	Transição Chaminé	4-1 2-12	A <sub>0</sub> /A <sub>1</sub> =2,75 θ=150° De/D=1	0,33 1,0

<sup>a</sup> ASHRAE fitting loss coefficients (2021)

<sup>b</sup> valor extrapolado

Quadro B. 18 – Perda de carga por percurso da rede da torre 1: Solução 2, Cenário 3.

Percurso	ΔP total (Pa)	Desequilíbrio
Elevação inicial poço do 1ºestágio 1-2-...-13	1138	Caminho crítico
Elevação inicial 1ºestágio 14-2-3-...-13	1106	-32 (-2,8%)
Elevação inicial 2ºestágio 15-3-4-...-13	1048	-89 (-7,8%)
Elevação inicial 2ºestágio 16-4-5-...-13	1037	-100 (-8,8%)
Elevação inicial 2ºestágio 17-5-6-...-13	1030	-107 (-9,4%)
Elevação inicial 2ºestágio 18-6-7-...-13	1026	-112 (-9,9%)
Elevação inicial 2ºestágio 19-7-8-...-13	1020	-118 (-10,4%)
Elevação inicial 2ºestágio 20-8-9-...-13	1017	-121 (-10,6%)
Gradagem 23(21)-22-9-10-...-13 (mais grelha*)	993	-145 (-12,7%)
Gradagem 26-27-10-...-13	939	-198 (-17,4%)
Gradagem 24-25-26-10-...-13	948	-190 (-16,7%)
Gradagem 25-26-10-...-13 (mais grelha*)	954	-183 (-16,1%)
Gradagem 28-29-30-11-...-13 (mais grelha*)	985	-152 (-13,4%)
Gradagem 31-29-30-11-12-13	931	-206 (-18,1%)
Gradagem 32-30-11-12-13	926	-212 (-18,6%)
Gradagem 33-...-38-12-13 (mais grelha*)	945	-193 (-16,9%)
Gradagem 39-34-...-38-12-13 (mais grelha*)	989	-148 (-13,0%)
Gradagem 40-35-...-38-12-13	917	-221 (-19,4%)
Gradagem 41-36-...-38-12-13	911	-226 (-19,9%)
Gradagem 42-37-38-12-13	899	-239 (-21,0%)
Gradagem 43-38-12-13	894	-244 (-21,4%)
Gradagem 44-45-46-13	845	-293 (-25,7%)
Gradagem 45-46-13 (mais grelha*)	831	-307 (-27,0%)
Gradagem 47-46-13	847	-290 (-25,5%)

\*grelha 125 x 1225 mm com 32 Pa com registo totalmente aberto do modelo GLS-GLD do fabricante FINCO, cada grelha extrai 1767 m<sup>3</sup>/h.

## **Anexos**

- Anexo A. Curva do ventilador atual da linha da Torre 1
- Anexo B. Curva do ventilador atual da linha da Torre 2
- Anexo C. Dados técnicos das grelhas de extração
- Anexo D. Dados técnicos da grelha de tomada de ar externo
- Anexo E. Dados técnicos dos ventiladores selecionados

# Anexo A. Curva do ventilador atual da linha da Torre 1

**VENTACID**

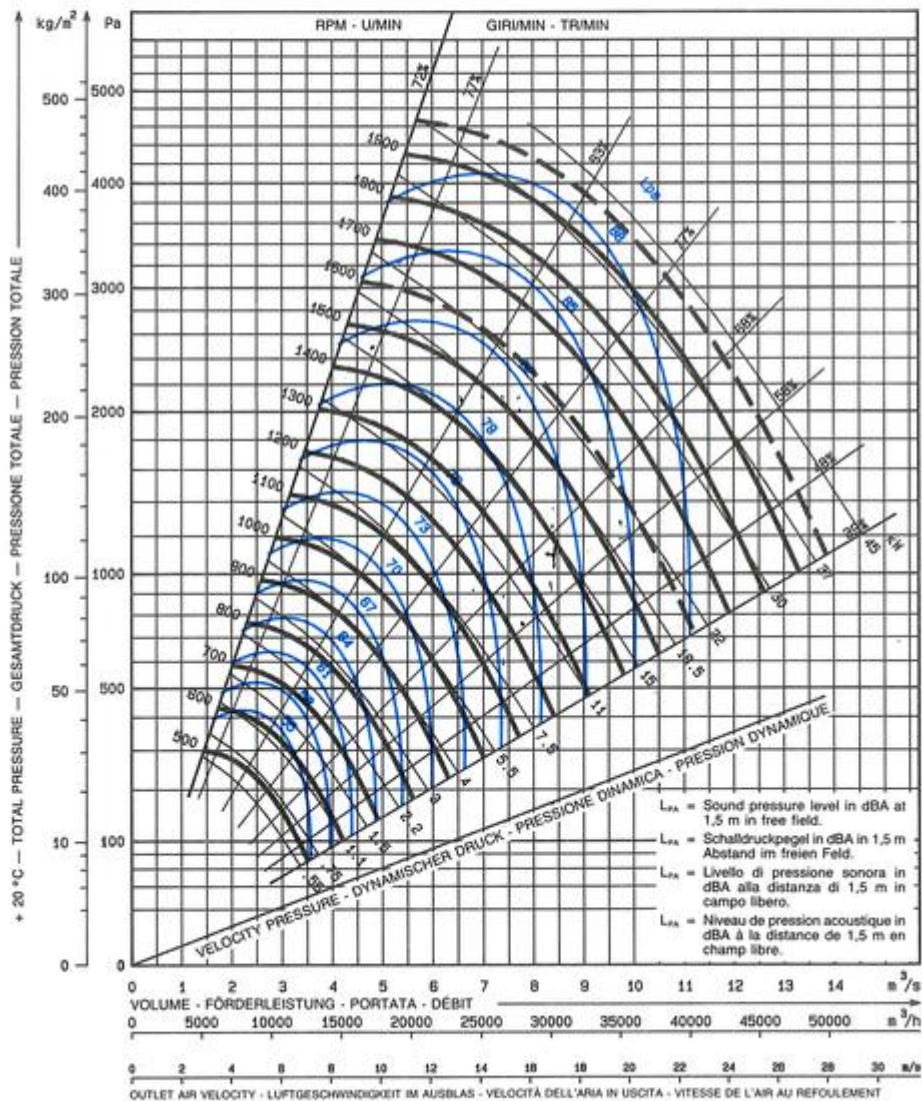
$$N = \frac{Vh}{1000\pi} \text{ [kW]}$$

$$N_{v-o} = 1,94 \left( \frac{n}{1000} \right)^3 \text{ [kW]}$$

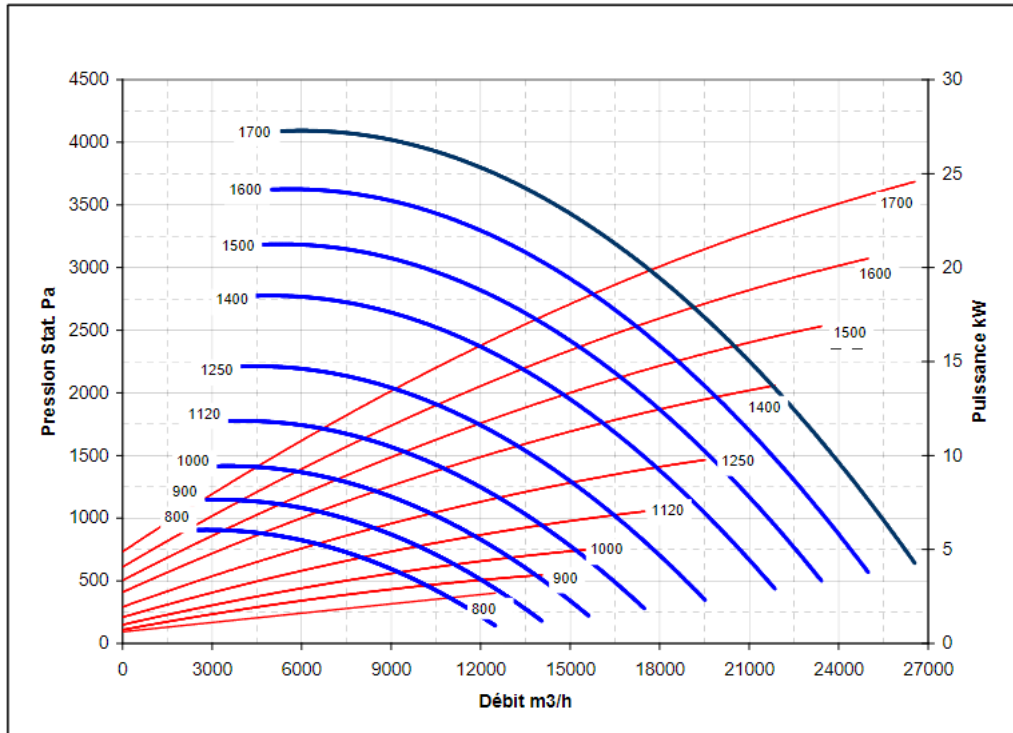
Wheel diameter  
 Laufrad durchmesser  
 Diametro girante  
 Diamètre de la turbine  
**836 mm**

**Ch 30**

Rpm class	U/min Klasse	Giri/min classe	Tr/min classe
1	2	3	4
915	1170	1170	1600
			1980



## Anexo B. Curva do ventilador atual da linha da Torre 2



Correspondance débit / vitesse d'aspiration / Pression dynamique

Débit (m <sup>3</sup> /h)	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	22000	24000	26000	28000
V asp (m/s)	3	6	8	11	14	17	20	23	25	28	31	34	37	40
P dyn. (Pa)	5	19	43	77	120	173	235	307	389	480	581	692	812	941

Niveau Sonore :  
 Schalleistungspegel :  
 Sound power level :

LWA dB (A)

Niveau de pression acoustique :  
 Schalldruckpegel :  
 Sound pressure level :

LPA = LWA - 7 dB (A)  
 Dist. 1m

N	Lwa	Hz							
		Trs/min	dB (A)	63	125	250	500	1000	2000
1700	101	81	89	93	98	94	90	85	79
1600	100	80	88	92	97	93	89	84	78
1500	98	78	86	90	95	91	87	82	76
1400	97	77	85	89	94	90	86	81	75
1250	94	74	82	86	91	87	83	78	72
1120	92	72	80	84	89	85	81	76	70
1000	90	69	77	81	86	82	78	73	67
900	87	67	75	79	84	80	76	71	65
800	85	65	73	77	82	78	74	69	63

## Anexo C. Dados técnicos das grelhas de extração

### GLS-GLD GRELHAS LINEARES



#### APLICAÇÃO

- São empregadas no insuflamento e na exaustão de ar em sistemas de ventilação e ar condicionado. Com estética elegante e harmoniosa, são indicadas para os mais modernos ambientes
- Montagem em dutos ou paredes

#### DESCRIÇÃO

- Fabricadas com perfis de alumínio, possuem uma serie de aletas fixas na face frontal, dispostas longitudinalmente. As grelhas GLS-0, GLD-0 e NLS-0 lançam o fluxo de ar perpendicularmente à face da grelha. As grelhas GLS-15, GLD-15 e NLS-15, inclinado a 15 graus
- O modelo NLS compreende apenas o núcleo, sem molduras. O modelo GLD possui uma serie adicional de aletas posteriores ajustáveis, que permitem alterar a amplitude do fluxo de ar.
- Como padrão, são fornecidas anodizadas na cor natural (A) e com furos na moldura externa para fixação por parafusos (F1).
- Sob consulta, são disponíveis com fixação por molas (F2), fixação invisível (F3) e com pintura em epóxi-pó (P) - cor definida pelo cliente

#### ACESSÓRIOS

- Registro de regulagem de fluxo (RGD), com moldura em aço, aletas convergentes, e pintura na cor preta
- Moldura de montagem (MM) em aço galvanizado e pintura na cor preta. De emprego obrigatório com a fixação F2 e F3

#### DIMENSIONAMENTO RÁPIDO

##### a) Vazão - insuflamento

- A Tabela 1 lista as dimensões padrão, a vazão recomendada de ar  $Q_n$  para cada tamanho e o respectivo alcance  $L_n$  do jato de ar isotérmico para  $V_t=0,5$  m/s, (com aletas posteriores a 0° de inclinação (GLD) e com influencia do teto - efeito Coanda)

Tabela 1

H (mm)	Vazão Nominal $Q_n$ (m <sup>3</sup> /h) x Alcance $L_n$ (m)								
	B (mm)								
	225	325	425	525	625	825	1025	1225	
125	$Q_n$	140	215	285	355	430	570	715	860
	$L_n$	4,1	4,9	5,6	6,1	6,6	7,3	7,9	8,3
225	$Q_n$	275	410	550	685	825	1100	1375	1655
	$L_n$	5,7	6,9	7,9	8,8	9,6	10,8	11,9	12,8
325	$Q_n$	405	610	815	1020	1225	1630	2040	2450
	$L_n$	7,0	8,5	9,8	10,9	11,8	13,5	14,9	16,1
425	$Q_n$	540	810	1080	1350	1620	2160	2700	3245
	$L_n$	8,1	9,9	11,3	12,6	13,7	15,7	17,4	18,9

Dimensões não indicadas disponíveis sob consulta

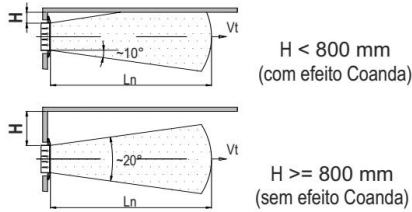
**DIMENSIONAMENTO RÁPIDO**

**a) Vazão - Insuflamento** (continuação)

- Para obter o alcance  $L_{n2}$ , na ausência de efeito Coanda, ou para outras velocidades terminais  $V_t$  do jato de ar, deve-se multiplicar  $L_n$  pelos fatores de correção da Tabela 2

Tabela 2

$V_t$ (m/s)		0,2	0,35	0,50	0,65
Com Coanda	H=0,3 $L_{n2} = L_n \times$	2,50	1,43	1,00	0,77
	H=0,5 $L_{n2} = L_n \times$	2,20	1,26	0,88	0,68
	H=0,7 $L_{n2} = L_n \times$	1,88	1,07	0,75	0,58
Sem Coanda	H>=0,8 $L_{n2} = L_n \times$	1,75	1,0	0,70	0,54



- O alcance do jato de ar  $L_r$ , para grelhas operando com vazões  $Q_r$  diferentes de  $Q_n$ , é igual a:

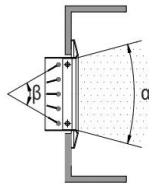
$$L_r = K_v \times L_n \quad \text{onde}$$

$$K_v = \frac{Q_r}{Q_n} = \frac{\text{vazão efetiva na grelha}}{\text{vazão nominal - Tabela 1}}$$

- Alterando a inclinação das aletas posteriores das grelhas GLD, podemos aumentar a amplitude do jato de ar. Nestes casos, conforme o ângulo de inclinação  $\beta$ , os valores de  $L_n$ ,  $\Delta Pt$  e  $L_{wa}$  devem ser multiplicados pelos fatores de correção da Tab 3

Tabela 3

$\beta$	$\alpha$	$L_n$	$\Delta Pt$	$L_{wa}$
45°	35°	x 0,7	x 1,3	+ 3
90°	60°	x 0,5	x 1,6	+ 5

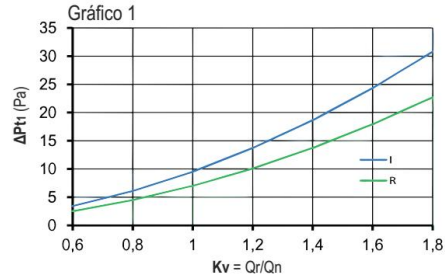


**b) Vazão ( retorno )**

- As grelhas NLS e GLS são também empregadas no retorno do ar. Neste caso, a Vazão nominal recomendada é a mesma listada na Tab 1 ( $Q_n$ ) e os valores de perda de carga e nível sonoro são dados em c) e d) a seguir

**c) Perda de carga**

- A perda de carga  $\Delta Pt$ , na vazão de operação  $Q_r$ , segundo o sentido do fluxo de ar, - insuflamento (I) ou retorno (R) -, é obtida no Gráfico 1 em função de  $K_v$



**d) Potencia sonora**

- O nível de potencia sonora real,  $L_{wr}$ , nas condições de operação de cada grelha, é igual ao valor  $L_{wa}$  obtido no Gráfico 2, (conforme I ou R e  $K_v$ ), somado ao fator de correção  $K_s$ , obtido na Tab 4, segundo suas dimensões B e H

$$L_{wr} = L_{wa} + K_s$$

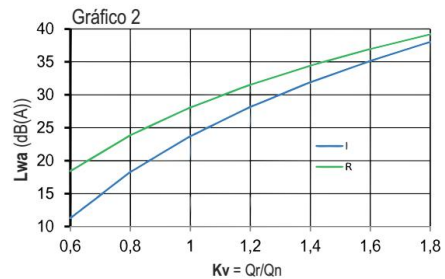


Tabela 4

H (mm)	Fator de Correção $K_s$ ( dB(A) )							
	B (mm)							
	225	325	425	525	625	825	1025	1225
125	-7	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
225	-4	-2	-1	0	1	2	3	4
325	-2	-1	1	2	2	4	5	6
425	-1	1	2	3	4	5	6	7

### e) Determinação da Vazão efetiva

- Para avaliar a vazão real  $Q_r$  a que esta submetida uma grelha deve-se, inicialmente, medir a velocidade de saída do ar em vários pontos de sua face e em seguida calcular a velocidade média  $V_m$  (m/s), do fluxo de ar.  
Com  $V_m$  e  $A_{eff}$ , área Efetiva da grelha, obtida na Tab 5), tem-se:

$$Q_r = V_m \times A_{eff} \times 1000 \text{ (l/s) ou,}$$

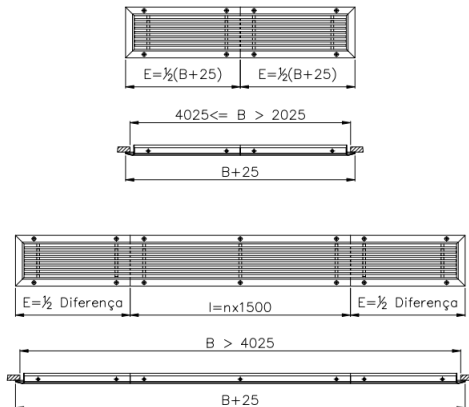
$$Q_r = V_m \times A_{eff} \times 3600 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

Tabela 5

H (mm)	Área Efetiva $A_{eff}$ (m <sup>2</sup> )							
	B (mm)							
	225	325	425	525	625	825	1025	1225
125	0,011	0,017	0,023	0,028	0,034	0,046	0,057	0,068
225	0,022	0,033	0,044	0,055	0,066	0,088	0,110	0,131
325	0,032	0,049	0,065	0,081	0,097	0,130	0,162	0,195
425	0,043	0,064	0,086	0,107	0,129	0,172	0,215	0,250

### f) Grelhas contínuas

- As grelhas NLS, GLS e GLD são fabricadas em uma única peça, até a dimensão nominal  $B = 2025$  mm. Acima dessa dimensão, as grelhas são fabricadas em partes, para união no local da instalação, como ilustrado a seguir.  
A fixação é sempre feita por meio de parafusos aparentes (F1)

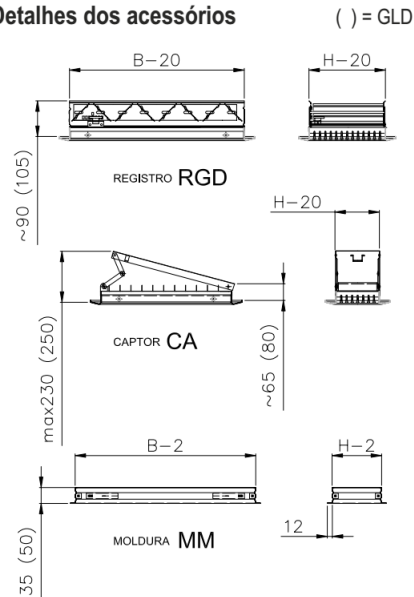


### g) Grelhas com registro RGD

- Para obter a perda de carga total  $\Delta Pt_2$  e a potência sonora total  $L_{wa2}$ , segundo o grau de abertura do registro, deve-se aplicar os fatores de correção da tabela abaixo, aos valores  $L_{wa}$  e  $\Delta Pt$  obtidos para as grelhas sem registro.

GRAU DE ABERTURA DO REGISTRO		100%	50%	25%
I - Insuflamento	$\Delta Pt_2 = \Delta Pt \times$	1,0	2,5	5,3
	$L_{wa2} = L_{wa} +$	0	14	24
R - Retorno	$\Delta Pt_2 = \Delta Pt \times$	1,0	2,2	5,6
	$L_{wa2} = L_{wa} +$	0	6	11

### h) Detalhes dos acessórios



#### CÓDIGO PARA COMPRA :

GLD + RGD 625 x 225 - F1 - A

1      2      3      4      5

- 1- Modelo
- 2- Acessório
- 3- Dimensão B x H
- 4- Fixação
- 5- Acabamento

OBS: Códigos de características padrão podem ser omitidos

## Anexo D. Dados técnicos da grelha de tomada de ar externo

**TAC**

**TOMADA DE AR EXTERNO**



### APLICAÇÃO

- Empregadas nas instalações de ventilação e ar condicionado para proteger as entradas e saídas de ar contra ingresso de chuva, pequenos animais e objetos
- Em substituição 'as tomadas de ar TAG nas aberturas de menores dimensões

### DESCRIÇÃO

- Apresentam construção compacta e resistente 'as agredões climáticas, o que as torna ideais para montagens externas
- Fabricadas a partir de perfis de alumínio, possuem aletas horizontais fixas, espaçadas a cada 25 mm, uma moldura externa rígida e uma tela metálica na face traseira, que completa o conjunto
- Como padrão, as venezianas TAC são fornecidas anodizadas na cor natural (A) e com furos na moldura externa para fixação por parafusos (F1).
- Sob consulta, são disponíveis com pintura em epóxi-pó (P) - cor definida pelo cliente

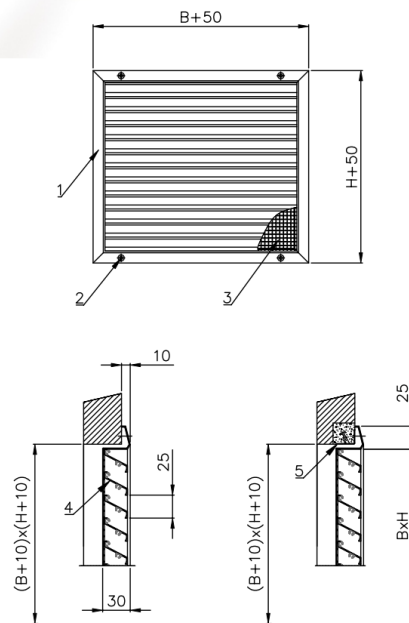
### ACESSÓRIOS

- Moldura de montagem (MM)

### DIMENSIONAMENTO RÁPIDO

#### a) vazão

- A Tabela 1, lista as dimensões padrão e a correspondente vazão de ar Qn, recomendada para cada tamanho.
- Nesta vazão, para todas as venezianas,  $\Delta Pt < 36$  Pa e de acordo com o tamanho,  $25 < Lw < 52$  dB(A)



- 1- moldura  
2- furos para fixação  
3- tela  
4- aletas  
5- moldura de montagem MM

Tabela 1

H (mm)	Vazão Nominal Qn (m3/h)								
	B (mm)								
	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200
100	60	120	180	240	305	365	485	610	730
200	150	300	450	600	755	905	1205	1510	1810
300	240	480	720	960	1205	1445	1925	2410	2890
400	330	660	990	1320	1655	1985	2645	3310	3970
500	420	840	1260	1680	2105	2525	3365	4210	5050
600	510	1020	1530	2040	2555	3065	4085	5110	6130
800	690	1380	2070	2760	3455	4145	5525	6910	8290
1000	870	1740	2610	3480	4355	5225	6965	8710	10450
1200	1050	2100	3150	4200	5255	6305	8405	10510	12610

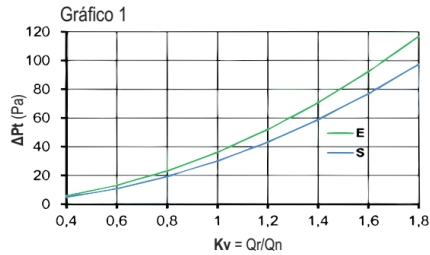
Dimensoes nao indicadas disponíveis sob consulta

### DIMENSIONAMENTO RÁPIDO (continuação)

#### b) Perda de carga

- A perda de carga  $\Delta Pt$ , na vazão real de operação  $Q_r$ , segundo o sentido do fluxo de ar, - entrada (E) ou saída (S) -, é obtida no Gráfico 1 em função de  $K_v$

$$K_v = \frac{Q_r}{Q_n} = \frac{\text{vazão de operação}}{\text{vazão nominal - Tabela 1}}$$



#### c) Potencia sonora

- O nível de potencia sonora real  $L_{wr}$ , nas condições de operação de cada veneziana, é igual ao valor  $L_{wa}$  obtido no Gráfico 2, (conforme E ou S e  $K_v$ ), somado ao fator de correção  $K_s$ , obtido na Tab 4, segundo as dimensões B e H

$$L_{wr} = L_{wa} + K_s$$

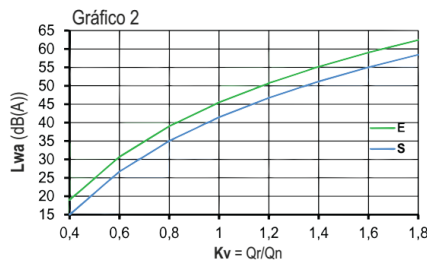
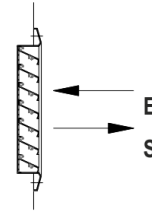


Tabela 2

H (mm)	Fator de Correção $K_s$ (dB(A))									
	B (mm)									
	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
100	-16	-13	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	
200	-13	-10	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	
300	-11	-8	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	
400	-10	-7	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	
500	-9	-6	-4	-3	-2	-1	0	1	2	
600	-8	-5	-3	-2	-1	0	1	2	3	
800	-7	-4	-2	-1	0	1	2	3	4	
1000	-6	-3	-1	0	1	2	3	4	5	
1200	-5	-2	0	1	2	3	4	5	6	



#### d) Determinação da Vazão efetiva

- Para avaliar a vazão real  $Q_r$  a que esta submetida uma grelha deve-se, inicialmente, medir a velocidade de saída do ar em vários pontos de sua face e em seguida calcular a velocidade média  $V_m$  (m/s), do fluxo de ar. Com  $V_m$  e  $A_{eff}$ , area efetiva da grelha obtida na Tab 4, tem-se:

$$Q_r = V_m \times A_{eff} \times 1000 \text{ (l/s) ou,}$$

$$Q_r = V_m \times A_{eff} \times 3600 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

Tabela 4

H (mm)	Área Efetiva $A_{eff}$ (m <sup>2</sup> )									
	B (mm)									
	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
100	0,007	0,014	0,020	0,027	0,034	0,041	0,054	0,068	0,082	
200	0,017	0,034	0,050	0,067	0,084	0,101	0,134	0,168	0,202	
300	0,027	0,054	0,080	0,107	0,134	0,161	0,214	0,268	0,322	
400	0,037	0,074	0,110	0,147	0,184	0,221	0,294	0,368	0,442	
500	0,047	0,094	0,140	0,187	0,234	0,281	0,374	0,468	0,562	
600	0,057	0,114	0,170	0,227	0,284	0,341	0,454	0,568	0,682	
800	0,077	0,154	0,230	0,307	0,384	0,461	0,614	0,768	0,922	
1000	0,097	0,194	0,290	0,387	0,484	0,581	0,774	0,968	1,162	
1200	0,117	0,234	0,350	0,467	0,584	0,701	0,934	1,168	1,402	

#### CÓDIGO PARA COMPRA :

TAC + MM 600 x 400 - F1 - A

1
2
3
4
5

- 1- Modelo
- 2- Acessorio
- 3- Dimensão B x H
- 4- Fixação
- 5- Acabamento

OBS: Codigos de características padrão podem ser omitidos

# Anexo E. Dados técnicos dos ventiladores selecionados

INDUSTRIAL FANS · GENERAL CATALOGUE ·

## BELT-DRIVEN MOTOR

# CMRS-X

**Belt driven fans, equipped with an electric motor, a set of pulleys, belts and protectors standardized according to ISO-13857**  
*Designed for clean or slightly dusty air*



- Sizes over 1600 are supplied with split casing for easy transport.
- Casing continuously welded from size 800 and up.

**Motor:**

- IE3 efficiency motors.
- Class F motors with ball bearings and IP55 protection.
- Three-phase 230/400 V 50 Hz (up to 4 kW) and 400/690 V 50 Hz (powers greater than 4 kW).
- Maximum temperature of air to be carried: -25 °C +90 °C.

**Finishing:**

- Anti-corrosive finish in polyester resin, polymerised at 190 °C, after degreasing with phosphate-free nanotechnology treatment.

**On request:**

- Special windings for different voltages.
- Fan prepared to transport air up to +300 °C.
- Stainless steel fan.
- ATEX certified Category 2.
- System 8 elastic coupling.

**Fan:**

- Sheet steel casing.
- Backward curved impeller in extremely robust sheet steel, specially designed for clean or dusty air.
- Engine mounted on general bench.
- Belt driven fan.
- Fitted with inspection hatch, except models 350, 400, 450, 500 and 560.
- With inspection and cleaning hatch from size 560 and up.

\*The images are provided only for illustrative purposes, the product may vary depending on its size, specifications and position.

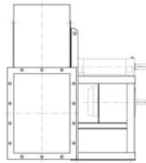
### Belt-driven motor construction method

SYSTEM  
**12**



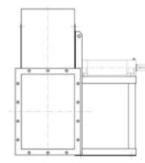
Transmission drive, identical to SYSTEM 1, with the motor and fan mounted on the common bench, Motor positions "W" or "Z" and exceptionally "X" or "Y".

SYSTEM  
**9**



Transmission drive, identical to SYSTEM 1, with the motor mounted on the side of the pedestal, in position "W" or "Z".

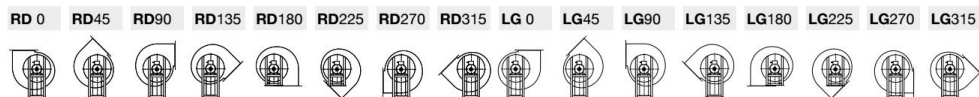
SYSTEM  
**1**



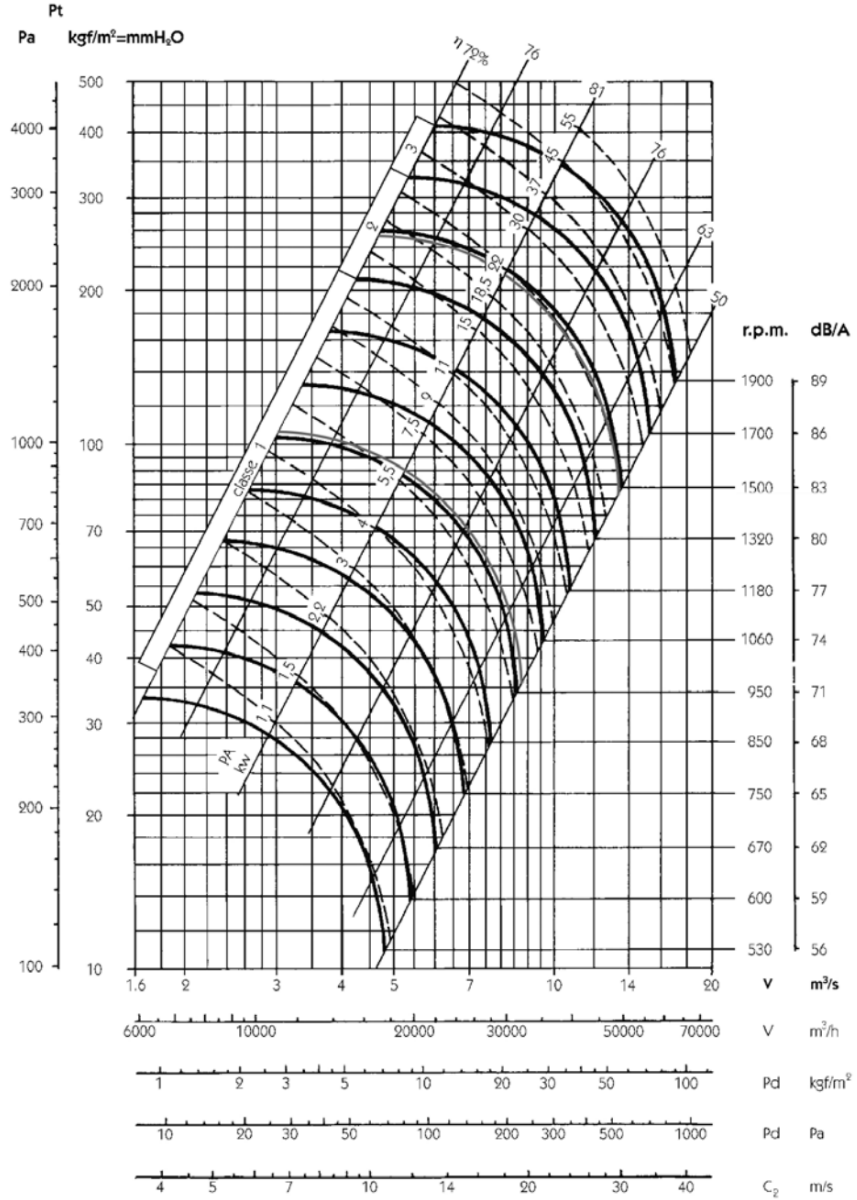
Transmission drive, impeller mounted on the support shaft. Support mounted on the pedestal.

LARGE SERIES

### Orientations



CMRS-X 800



Flow margin  $\pm 5\%$   
 Noise level margin + 3... 5 dB  
 Margin of kW absorbed  $\pm 3\%$

Outlet characteristics

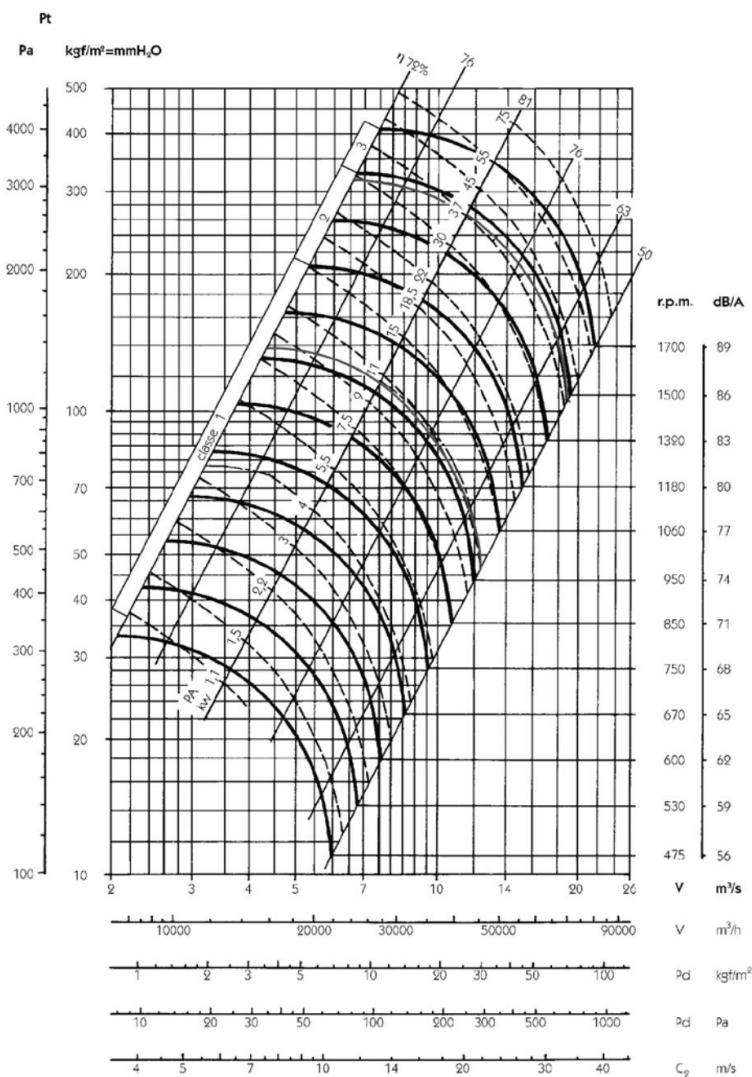
Maximum admissible Rpm

	Class 1	Class 2	Class 3
$\leq 100^\circ\text{C}$	1250	1600	2000
100...200°C	1120	1400	1800
200...300°C	1000	1250	1600

Characteristic curves

CMRS-X 900

LARGE SERIES



Flow margin  $\pm 5\%$   
 Noise level margin + 3... 5 dB  
 Margin of kW absorbed  $\pm 3\%$

Maximum admissible Rpm

	Class 1	Class 2	Class 3
$\leq 100^\circ\text{C}$	1120	1400	1800
100...200°C	1000	1250	1600
200...300°C	900	1120	1400

Outlet characteristics