



Análise de Soluções de Ventilação em Atmosferas Explosivas para Instalações de Purificação de Hidrogénio

DUARTE ROSA SANCHES

outubro de 2025

Análise de Soluções de Ventilação em
Atmosferas Explosivas para Instalações de
Purificação de Hidrogénio

Duarte Rosa Sanches

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Energia

Orientador: José Carlos Pereira Lopes da Costa

Co-orientador: Nídia de Sá Caetano

Júri:

Presidente:

Rui Filipe Neves de Araújo Rego, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

José Carlos Pereira Lopes da Costa, Professor Adjunto, ISEP

José Luis Alexandre, Professor Auxiliar, FEUP

Dedicatória

"Tenho em mim todos os sonhos do mundo." — Fernando Pessoa

Dedico este trabalho a todos os que acreditaram em mim e me inspiraram a nunca desistir.

Agradecimentos

Desejo expressar a minha mais profunda gratidão aos meus pais, que constituíram, ao longo de todo o meu percurso académico, um pilar fundamental de apoio incondicional e uma fonte inesgotável de força e motivação.

Estendo igualmente o meu reconhecimento à minha irmã, aos meus avós, tios e primos, cujo encorajamento constante e incentivo foram determinantes para a superação dos desafios enfrentados.

Aos meus orientadores académicos, Sr. Eng.^o Lopes da Costa e Sr.^a Eng.^a Nídia Caetano, manifesto sincera gratidão pela orientação competente, pela disponibilidade e pela partilha de conhecimento que tanto enriqueceram o presente trabalho.

À SODECA Portugal, expresso o meu profundo agradecimento pela oportunidade de realização deste estágio curricular. No seio da empresa, deixo um especial reconhecimento ao meu orientador, Sr. Eng.^o José Pinho, pela orientação prestada, aos responsáveis pela empresa, Sr. Eng.^o Luiz Araújo, Sr. Eng.^o Pedro Pessoa e Sr. Eng.^o Pedro Silva, bem como aos colegas com quem partilhei o gabinete durante estes meses, Sr.^a Eng.^a Alexandra Freixo, Sr. Eng.^o Fernando Fernandes, Sr.^a Eng.^a Cristina Bernardo, Sr.^a Eng.^a Mariela Fortunato, Sr. Eng.^o José Bessa.

À SYSADVANCE, manifesto a minha gratidão pela colaboração estabelecida, em particular ao Sr. Eng.^o Patrick Barcia, pela sua prontidão e disponibilidade, e à Sr.^a Eng.^a Salomé Macedo, pelo acompanhamento constante e pela paciência demonstrada ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Dirijo também um agradecimento a todos os meus colegas de curso, aos colegas de residência ao longo destes anos, bem como aos docentes e funcionários da instituição, cuja presença, contributo e dedicação foram essenciais para a concretização desta etapa académica.

Finalmente, agradeço à aldeia de Sanguinhedo, lugar onde cresci e que guardo no coração como verdadeiro lar. Foi sempre o meu porto seguro, o espaço onde encontrei serenidade nos momentos de maior dificuldade e a força para nunca esquecer quem sou. A sua simplicidade, os seus valores e as suas gentes mantiveram-me humilde, ligado às minhas raízes e fiel às minhas origens.

Resumo

Num contexto de transição energética, o hidrogénio assume um papel central como vetor energético alternativo, mas a sua elevada inflamabilidade exige soluções robustas para prevenir riscos de explosão. Esta dissertação incide sobre a avaliação de riscos associados às operações com hidrogénio na indústria química, aplicada a uma instalação de separação de gases por VPSA (*Vacuum Pressure Swing Adsorption*). O estudo é desenvolvido no âmbito de um estágio curricular na SODECA Portugal e tem como foco o projeto de sistemas de ventilação mecânica capazes de prevenir a formação de atmosferas explosivas num contentor técnico sujeito a fugas de hidrogénio, aplicando as normas ATEX e, em particular, a IEC 60079-10-1.

A metodologia adotada inclui a análise normativa e a análise do caso de estudo fornecido pela SYSADVANCE, seguida da conceção do projeto técnico, com seleção de grelhas e ventiladores ATEX, da modelação CAD do contentor VPSA e integração das soluções, da simulação CFD no *software* ANSYS Fluent, modelando a dispersão de hidrogénio, e da comparação entre resultados normativos e numéricos, propondo melhorias. São consideradas inicialmente soluções de ventilação natural, para fins comparativos, de forma a avaliar o seu desempenho e explorar de que modo poderiam complementar soluções mecânicas. Em seguida, são desenvolvidas e analisadas duas soluções de ventilação mecânica: uma com ventilador axial e outra com ventilador de cobertura, cada uma incluindo variantes otimizadas.

As simulações CFD permitem validar e aperfeiçoar as soluções dimensionadas segundo a norma, avaliando variáveis como velocidade média do escoamento e distribuição da concentração de hidrogénio. Conclui-se que a integração da análise normativa com a simulação CFD conduz a soluções de ventilação com melhor desempenho aerodinâmico e maior segurança operacional. O contributo deste trabalho assenta na criação de uma metodologia de projeto e validação que pode ser replicada em outras instalações industriais com risco ATEX, reforçando a segurança e a eficiência em contextos críticos da indústria química e energética.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogénio, ATEX, Ventilação Mecânica, IEC 60079-10-1, VPSA, Simulação CFD

Abstract

In the context of the energy transition, hydrogen plays a central role as an alternative energy vector, but its high flammability requires robust solutions to prevent explosion risks. This dissertation focuses on the risk assessment associated with hydrogen operations in the chemical industry, applied to a gas separation installation using VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption). The study is carried out within the scope of a curricular internship at SODECA Portugal and addresses the design of mechanical ventilation systems capable of preventing explosive atmospheres in a technical container exposed to hydrogen leaks, in accordance with ATEX standards and, in particular, IEC 60079-10-1.

The adopted methodology includes normative analysis and the analysis of the case study provided by SYSADVANCE, followed by the technical design, including the selection of ATEX grilles and fans, the CAD modeling of the VPSA container and integration of the solutions, CFD simulation in ANSYS Fluent software to model hydrogen dispersion, and comparison between normative and numerical results, proposing improvements. Natural ventilation solutions are initially considered for comparative purposes, to evaluate their performance and explore how they could complement mechanical solutions. Subsequently, two mechanical ventilation solutions are developed and analyzed: one with an axial fan and another with a roof-mounted fan, each including optimized variants.

CFD simulations allow the validation and refinement of solutions dimensioned according to the standards, evaluating variables such as average flow velocity and hydrogen concentration distribution. It is concluded that the integration of normative analysis with CFD simulation leads to ventilation solutions with improved aerodynamic performance and greater operational safety. The contribution of this work lies in creating a design and validation methodology that can be replicated in other industrial facilities with ATEX risk, enhancing safety and efficiency in critical chemical and energy industry contexts.

KEYWORDS: Hydrogen, ATEX, Mechanical Ventilation, IEC 60079-10-1, VPSA, CFD Simulation

Índice

Índice Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
Acrónimos e Símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Considerações	3
1.3 História e Missão da Empresa	3
1.4 Apresentação do Estágio	4
1.4.1 Objetivos de Estágio	5
Objetivos Profissionais	6
Objetivos Académicos	7
1.5 Metodologia e Estrutura	7
2 Enquadramento Teórico e Revisão Bibliográfica	9
2.1 Introdução - Zonas ATEX e Atmosferas Explosivas	9
2.1.1 Propriedades das Substâncias Inflamáveis	9
2.2 As Diretivas e Normas ATEX	11
2.2.1 Análise da Diretiva 1999/92/CE	11
Classificação para Gases, Vapores e Névoas (Categoria G):	12
Classificação para Poeiras Combustíveis (Categoria D):	12
2.2.2 Análise da Diretiva 2014/34/EU	14
Grupo I - Equipamentos para Minas Subterrâneas:	15
Grupo II - Equipamentos para Ambientes Industriais:	16
2.2.3 IEC 60079-10-1	17
Aplicação em Instalações com Hidrogénio	17
Abordagens Científicas à IEC 60079-10-1	18
2.2.4 IEC 60079-20-1	19
2.2.5 IEC 60079-14	20
2.2.6 Equipamentos ATEX	21
2.3 Segurança na Indústria e aplicabilidade das Diretivas ATEX	23
2.3.1 Acidentes na Indústria	24
2.4 Hidrogénio na Indústria Química	25
2.4.1 Propriedades do Hidrogénio	26
2.4.2 Purificação do Hidrogénio	27
Vacuum Pressure Swing Absorption - VPSA	28
Falhas Mecânicas Associadas	29
2.4.3 Hidrogénio em Portugal	31

Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)	31
Projetos e Iniciativas em Curso	31
2.5 Mecânica dos Fluidos Computacional - Introdução e Evolução Histórica	33
2.5.1 Métodos Numéricos Fundamentais	34
Diferenças Finitas	34
Volumes Finitos	34
Elementos Finitos	34
Modelos de Turbulência e Métodos Alternativos	35
2.5.2 Aplicações da CFD em Ambientes ATEX	35
3 Desenvolvimento	37
3.1 Desenvolvimento do Estágio	37
3.1.1 Contexto Profissional	37
3.1.2 Contexto Académico	39
3.2 Apresentação do Caso de Estudo	40
3.3 Dimensionamento	43
3.3.1 Classificação da Fuga	44
3.3.2 Área do Orifício da Fuga	45
3.3.3 Pressão Crítica	46
3.3.4 Taxa de Libertação	47
Coeficiente de Descarga	47
Fator de Compressibilidade	47
3.3.5 Caudal Volumétrico da Fuga	50
3.3.6 Caudal Característico	50
3.3.7 Taxa de Renovação - Renovações por Hora	51
3.4 Projeto	52
3.5 Ventilação Natural	53
3.5.1 1ª Solução: Induzida pelo Vento	53
3.5.2 2ª Solução: Induzida pelo Gradiente Térmico	61
3.6 Ventilação Mecânica	67
3.6.1 Simulação CFD	68
3.6.2 Modelação CAD	69
3.6.3 Solução 1 - Ventilador Axial	70
Apresentação da Solução	70
Dimensionamento Analítico da Solução	70
Simulação CFD da Solução	73
Proposta de Melhoria da Solução	73
3.6.4 Solução 2 - Ventilador de Cobertura	78
Apresentação da Solução	78
Dimensionamento Analítico da Solução	78
Simulação CFD da Solução	81
Proposta de Melhoria da Solução	82
4 Discussão dos Resultados	87
4.1 Análise de Ventilação Natural Induzida pelo Vento	87
4.2 Análise da Solução Natural Induzida pela Convecção Térmica	88
4.3 Avaliação da Solução - Ventilador Axial	88
4.3.1 Análise Comparativa: Norma vs CFD	88
4.3.2 Caudal Admitido por Grelha	88

4.3.3	Discussão Global da Solução	90
4.4	Avaliação da Solução - Ventilador de Cobertura	90
4.4.1	Análise Comparativa: Norma vs CFD	90
4.4.2	Caudal Admitido por Grelha	90
4.4.3	Discussão Global da Solução	92
4.5	Comparação Técnica entre Soluções	92
4.6	Discussão Global das Soluções	92
5	Conclusão	95
5.1	Trabalhos Futuros	96
	Referências	98
	Apêndice A - Primeiro apêndice	109
.1	Desenho Técnico - Zona Perigosa	109
.2	Desenho Técnico - Contentor Base	110
.3	Desenho Técnico - Contentor Base c/ Cortes	111
.4	Desenho Técnico - Solução v1.0	112
.5	Desenho Técnico - TAE 600x400	113
.6	Desenho Técnico - TAE 600x300	114
.7	Desenho Técnico - Solução v1.1	115
.8	Desenho Técnico - Solução v2.0	116
.9	Desenho Técnico - TAE 600x200	117
.10	Desenho Técnico - TAE 500x700	118
.11	Desenho Técnico - Solução v2.1	119
.12	Desenho Técnico - Tabelas A.1 e A.2 da IEC 60079-10-1	120
	Anexo A - Primeiro anexo	121
.13	Tabela B.1 da norma IEC 60079-10-1	121
.14	Tabela A-1 do Livro de Termodinâmica	122
.15	Figura A-15 do Livro de Termodinâmica	123
	Anexo B - Segundo anexo	125
.16	Ficha Técnica - Grelhas TAE da Tradair	125
.17	Tabela D.1 da norma IEC 60079-10-1	126
.18	Ficha Técnica Ventilador HCDF/ATEX	127
.19	Ficha Técnica Ventilador CVT/ATEX	128

Lista de Figuras

1.1 Procura de hidrogénio por setor e por região nos cenários de políticas atuais e compromissos anunciados	2
1.2 Logótipo SODECA Portugal.	4
1.3 Organograma SODECA Portugal.	5
2.1 Limites de Inflamabilidade para Combustíveis no Ar.	10
2.2 UFL, LFL, AIT e FlashPoint como funções da Temperatura e da Concentração (Pressão).	11
2.3 Condições Necessárias para a explosão de Gases, Vapores ou Névoas.	12
2.4 Condições Necessárias para a Explosão de Poeiras Combustíveis.	13
2.5 Zonas de Uso.	13
2.6 Simbologia ATEX.	15
2.7 Exemplo de Marcação CE.	15
2.8 CPV/ATEX da SODECA.	22
2.9 INT/ATEX da SODECA.	23
2.10 Destruição causada pelo acidente, Flixborough 1974.	24
2.11 Grande mobilização das Autoridades Sanitárias, Seveso 1976.	25
2.12 Isótopos do Hidrogénio	26
2.13 Esquema de um sistema VPSA.	28
2.14 Isotérmica de Adsorção (Capacidade de Adsorção em função da Pressão Parcial do Componente).	30
2.15 Isotérmicas de Adsorção do Hidrogénio e do Dióxido de Carbono em Zeólitos 13X (à esquerda) e em Carvão Ativado (à direita).	30
2.16 Refinaria da Galp, em Sines, futuro projeto para a produção de hidrogénio a nível nacional.	32
3.1 Logótipo QuickFan SODECA Selector.	37
3.2 Logótipo Microsoft Dynamics AX.	37
3.3 Condições climáticas no local de instalação.	41
3.4 Variação da velocidade média do vento ao longo do ano no local de instalação	41
3.5 Vista de corte - interior do contentor técnico.	42
3.6 Vista isométrica das colunas de adsorção.	42
3.7 Vista isométrica de uma bomba de vácuo.	43
3.8 Figura D.1 da norma, aplicada a este caso de estudo.	51
3.9 Ilustração explicativa retirada da norma EN 1991-1-4	55
3.10 Distância "x" do Contentor ao Muro.	56
3.11 Altura "h" do Muro.	56
3.12 Figura 7.20 da EN 1991-1-4.	57

3.13	Área efetiva A_e em função do caudal Q_{av} , para ventilação natural induzida pelo vento.	57
3.14	Relação entre área efetiva A_e e caudal Q_{av} para as configurações v0.1.	59
3.15	Relação entre área efetiva A_e e caudal Q_{av} para as configurações v0.2.	59
3.16	Classificação do grau de diluição em função do caudal e da velocidade de escoamento (IEC 60079-10-1, Gráfico C.1).	60
3.17	Temperaturas interior e exterior assumidas no dimensionamento da ventilação natural pela convecção térmica.	62
3.18	Área efetiva A_e em função do caudal Q_{ac} , para ventilação natural induzida pela convecção térmica.	64
3.19	Comparação entre as áreas efetivas A_e requeridas e os modelos de grelha TradAir disponíveis (pontos) para diferentes alturas H , para as configurações v0.3.	64
3.20	Comparação entre as áreas efetivas A_e requeridas e os modelos de grelha TradAir disponíveis (pontos) para diferentes alturas H , para as configurações v0.4.	66
3.21	Classificação do grau de diluição em função do caudal e da velocidade de escoamento (IEC 60079-10-1, Gráfico C.1).	67
3.22	Vistas isométricas da solução v1.0.	70
3.23	Ponto de funcionamento real do ventilador HCDF-40-4T/2G para a configuração com grelhas TAE 600×400 .	72
3.24	Classificação do grau de diluição (Gráfico C.1, IEC 60079-10-1) - v1.0.	72
3.25	Corte horizontal (xz) à cota do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar - v1.0.	73
3.26	Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar - v1.0.	74
3.27	Corte horizontal (xz) à cota da fuga - Concentração média de H_2 - v1.0.	74
3.28	Vistas isométricas da solução v1.1.	76
3.29	Corte horizontal (xz) à cota do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar - v1.1.	76
3.30	Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar - v1.1.	77
3.31	Corte horizontal (xz) à cota da fuga - Concentração média de H_2 - v1.1.	77
3.32	Vistas isométricas da solução v2.0.	78
3.33	Ponto de funcionamento real do ventilador CVT/ATEX-250-4T/2G Ex db para $Q_{Min} = 2223 \text{ m}^3/\text{h}$ e $\Delta P = 90 \text{ Pa}$.	80
3.34	Classificação do grau de diluição (Gráfico C.1, IEC 60079-10-1) - v2.0.	80
3.35	Corte horizontal (xz) à cota superior do contentor - Distribuição da velocidade média do ar - v2.0.	81
3.36	Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar - v2.0.	81
3.37	Corte vertical (xy) longitudinal ao eixo do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar - v2.0.	82
3.38	Corte horizontal (xz) à cota da fuga - Concentração média de H_2 - v2.0.	82
3.39	Vistas isométricas da solução v2.1.	83

3.40 Corte horizontal (xz) à cota superior do contentor - Distribuição da velocidade média do ar – v2.1.	84
3.41 Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar – v2.1.	84
3.42 Corte vertical (xy) longitudinal ao eixo do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar – v2.1.	85
3.43 Corte horizontal (xz) à cota da fuga - Concentração média de H ₂ – v2.1.	85

Lista de Tabelas

2.1	Relação entre a AIT do gás ou vapor e a classe de temperatura do equipamento.	20
2.2	Correspondência entre zonas ATEX e níveis de proteção dos equipamentos (EPLs) segundo a IEC 60079-14.	21
3.1	Cronograma de Trabalhos.	40
3.2	Parâmetros operacionais do caso de estudo.	43
3.3	Configuração das soluções v0.1 e v0.2: área efetiva total, caudal induzido e custo da solução.	58
3.4	Configuração das soluções v0.3 e v0.4: área efetiva total, caudal induzido e custo da solução.	65
3.5	Modelos TradAir TAE compatíveis com a solução v1.0 , considerando um caudal de referência por grelha de $Q_{\text{grelha}} = 1111,5 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.	71
3.6	Ventiladores axiais selecionados para a solução v1.0 , indicando a perda de carga total do sistema, o preço unitário de cada ventilador e o custo total da solução.	71
3.7	Modelos TradAir TAE compatíveis com a solução v1.1 , considerando um caudal de referência por grelha de $Q_{\text{grelha}} = 741,0 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.	75
3.8	Ventiladores axiais selecionados para a solução v1.1 , indicando a perda de carga total do sistema, o preço unitário de cada ventilador e o custo total da solução.	75
3.9	Modelos TradAir TAE compatíveis com a solução v2.0 , considerando um caudal de referência por grelha de $Q_{\text{grelha}} = 555,75 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.	79
3.10	Ventilador de Cobertura selecionado para a solução v2.0 , indicando a perda de carga total do sistema, o preço unitário de cada ventilador e o custo total da solução.	79
3.11	Especificações técnicas do modelo TAE 500×700, para $Q_{\text{grelha}} = 1111,5 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.	83
4.1	Comparação entre os critérios normativos e os resultados CFD para as soluções v1.0 e v1.1.	89
4.2	Caudal admitido por grelha nas soluções v1.0 e v1.1 e respetivo erro relativo face ao valor teórico.	89
4.3	Comparação entre os critérios normativos e os resultados CFD para as soluções v2.0 e v2.1.	91
4.4	Caudal admitido por grelha nas soluções v2.0 e v2.1 e respetivo erro relativo face ao valor teórico.	91
4.5	Resumo técnico comparativo entre as quatro soluções propostas, com base nos critérios da IEC 60079-10-1 e validação CFD.	93

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

AEP Associação Empresarial de Portugal

AIT Temperatura de Autoignição (*Auto-Ignition Temperature*)

APA Agência Portuguesa do Ambiente

APIRAC Associação Portuguesa da Indústria da Refrigeração e Ar Condicionado

APSEI Associação Portuguesa da Segurança

ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

ATEX *Atmosferas Explosivas* (Atmosphères Explosibles)

AVAC Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado

CE *Conformité Européenne* (Conformidade Europeia)

CFD Dinâmica dos Fluídos Computacional (*Computational Fluids Dynamics*)

DCPE Dispositivos de Controlo e Proteção de Explosão

DNS Direct Numerical Simulation

EFRIARC Associação Portuguesa dos Engenheiros de Frio Industrial e Ar Condicionado

EN-H2 Estratégia Nacional para o Hidrogénio

EPL Nível de Proteção do Equipamento (*Equipment Protection Level*)

ERP Enterprise Resource Planning

FCEVs Veículos Elétricos a Célula de Combustível (*Fuel Cell Electric Vehicles*)

FDM Método das Diferenças Finitas

FEM Método dos Elementos Finitos

FVM Método dos Volumes Finitos

HAZOP Estudo de Perigos e Operabilidade (*Hazard and Operability Study*)

I&D Investigação e Desenvolvimento

ISEP Instituto Superior de Engenharia da Porto

LBM Método Lattice Boltzmann

LES Large Eddy Simulation

LFL Limite Inferior de Inflamabilidade

LOC Concentração Limite de Oxigénio

MAC Marker-and-Cell

MESG Abertura Máxima Experimental Segura (*Maximum Experimental Safe Gap*)

MIC Corrente Mínima de Inigção (*Minimum Ignition Current*)

MIE Energia Mínima de Inigção

NP ISO Norma Portuguesa baseada na ISO

OERN Ordem dos Engenheiros - Região Norte

P.PORTO Politécnico do Porto

PCI Poder Calorífico Inferior

PCS Poder Calorífico Superior

RANS Reynolds-Averaged Navier-Stokes

TNS Time-accurate Navier-Stokes

TNT Trinitrotolueno

UFL Limite Superior de Inflamabilidade

VPSA *Vacuum Pressure Swing Absorption*

Lista de Símbolos

γ Razão dos Calores Específicos [adimensional]

ρ Densidade [kg/m³]

a Constante Específica de Van der Waals [Pa·m⁶/mol²]

A_e Área efetiva [m²]

b Constante Específica de Van der Waals [m³/mol]

C_d Coeficiente de descarga [adimensional]

c_p Calor Específico do Hidrogénio a Pressão Constante [J/(kg·K)]

$C_{p,x}$ Fator de abrigo [adimensional]

f Fator de ineficiência da ventilação [adimensional]

f_s	Fator de abrigo [adimensional]
k	Fator de correção [adimensional]
M_{H_2}	Massa Molar do Hidrogénio [kg/kmol]
p	Pressão de Operação [Pa]
p_a	Pressão Atmosférica [Pa]
p_c	Pressão Crítica [Pa]
p_R	Pressão Reduzida [adimensional]
p_{Cr}	Pressão Crítica do Gás [Pa]
Q_g	Caudal volumétrico da fuga [m ³ /h]
Q_{ac}	Caudal induzido pelo gradiente térmico [m ³ /h]
Q_{av}	Caudal induzido pelo vento [m ³ /h]
$Q_{c,lim}$	Caudal característico limite [m ³ /s]
R	Constante Universal dos Gases [J/(kmol·K)]
S	Área de fuga equivalente [m ²]
T	Temperatura de operação [K]
T_R	Temperatura Reduzida [adimensional]
T_{Cr}	Temperatura Crítica do Gás [K]
T_{in}	Temperatura interior [K]
T_{out}	Temperatura exterior [K]
u_w	Velocidade média do escoamento [m/s]
v	Volume Específico do Gás [m ³ /mol]
W_g	Taxa de Fuga Mássica do Gás [kg/s]
X_b	Concentração média de fundo [%]
Z	Fator de Compressibilidade do Gás [adimensional]

1 Introdução

Este capítulo estabelece o enquadramento da dissertação, abordando a relevância da segurança em atmosferas explosivas e a importância da ventilação mecânica em instalações industriais que utilizam hidrogénio. Discute-se, em particular, a formação de atmosferas potencialmente explosivas em instalações de VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption), e a necessidade de aplicar estratégias de mitigação adequadas. Além disso, são apresentados os objetivos do estudo, a metodologia adotada e a estrutura do documento. Por fim, faz-se a introdução da empresa onde o estágio foi realizado, destacando o seu papel no setor e a sua contribuição para o trabalho realizado.

1.1 Enquadramento e Motivação

A transição energética global tem sido impulsionada pela necessidade urgente de reduzir emissões de gases com efeito de estufa e atenuar os impactos das alterações climáticas [1].

O **hidrogénio** tem emergido como um vetor energético estratégico, ao possibilitar o armazenamento e transporte de energia proveniente essencialmente de fontes renováveis, com potencial para substituir os combustíveis fósseis na sua utilização final, em setores como o industrial e de mobilidade, sem emissões diretas de carbono [1].

Como se pode observar na figura 1.1, adaptada da *Global Hydrogen Review 2022* [2] da Agência Internacional de Energia (IEA), a procura pelo hidrogénio tem vindo a crescer de forma consistente, com projeções que apontam para um aumento significativo até 2030.

A sua versatilidade permite aplicações que vão desde a produção de eletricidade, a partir de células de combustível, até processos de síntese química, contribuindo para a descarbonização da economia. Além disso, a possibilidade de produzir hidrogénio verde, obtido a partir de eletrólise da água recorrendo a fontes de energia renovável, reforça o seu papel como alternativa sustentável para um futuro energético verde [3].

No entanto, apesar do hidrogénio apresentar diversas vantagens, a sua utilização em larga escala enfrenta desafios significativos. O hidrogénio é um gás altamente inflamável, com uma ampla faixa de explosividade, quando em contacto com o ar, baixa energia mínima de ignição e elevada capacidade de difusão [4]. Estas características demonstram a importância de implementar estratégias rigorosas, com o objetivo de reduzir riscos em processos industriais que envolvam este gás. Dentro destas estratégias, destaca-se a ventilação mecânica, que desempenha um papel crucial na prevenção do risco associado à acumulação de hidrogénio em ambientes confinados, de forma a reduzir a probabilidade de ignição acidental.

Dos vários processos necessários para tornar o hidrogénio uma aposta segura

Introdução

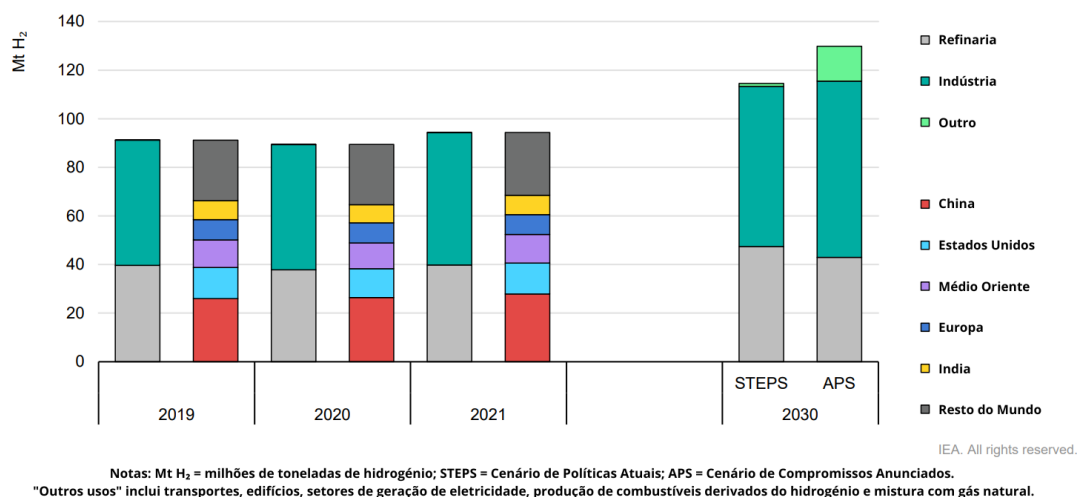


Figura 1.1: Procura de hidrogénio por setor e por região nos cenários de políticas atuais e compromissos anunciados [2].

e eficiente, a purificação do mesmo destaca-se como etapa essencial para garantir a sua viabilidade comercial, nos diferentes setores em que é utilizado. Diversos estudos demonstram que, de entre as tecnologias de purificação de hidrogénio atualmente disponíveis, o processo de *Vacuum Pressure Swing Adsorption (VPSA)* destaca-se por apresentar elevada eficiência de recuperação, aliada ao baixo consumo energético, apresentando vantagens claras face a outras técnicas convencionais como o *Pressure Swing Adsorption (PSA)* ou a destilação criogénica. Em particular, o VPSA pode apresentar eficácias de recuperação superiores em até 10%, comparativamente ao PSA, mantendo, contudo, níveis de pureza equivalentes [5]. Este processo baseia-se na utilização de materiais adsorventes seletivos e na variação cíclica de pressão, incluindo etapas sob vácuo, permitindo a remoção eficaz de contaminantes como o dióxido de carbono e o metano [6]. Todavia, como qualquer processo de separação de gases, pode ocorrer a libertação de gás em certas fases do processo, (através de fugas, por exemplo), o que pode ajudar ao aparecimento de atmosferas explosivas, sendo assim necessário um controlo rigoroso das condições de instalação.

A regulamentação europeia para as *Atmosferas Explosivas (Atmosphères Explosibles) (ATEX)*, francês para atmosferas explosivas, estabelece diretrizes para a classificação de zonas de risco, bem como para a seleção de equipamentos adequados ao funcionamento seguro em ambientes com potencial explosivo [7, 8]. Entre os demais documentos normativos relevantes, destaca-se a norma **IEC 60079-10-1** [9], que serve de base para grande parte da presente dissertação, fornecendo os fundamentos técnicos necessários para um correto dimensionamento de uma possível solução de ventilação.

No entanto, apesar da sua profundidade, a aplicação prática da norma exige uma leitura atenta das diversas secções que a constituem, uma vez que os critérios e procedimentos não se encontram organizados numa sequência sistematizada de cálculo e dimensionamento, podendo levar a uma interpretação errada da informação nela contida. Cabe ao leitor percorrer pelos vários anexos, tabelas e recomendações, reunindo e articulando a informação necessária para cada caso específico.

Neste contexto, e dado que, na pesquisa realizada, não foram identificadas ori-

entações sequenciais claras para o dimensionamento de soluções no contexto do VPSA, esta dissertação pretende contribuir para a sistematização da aplicação da IEC 60079-10-1 [9], nestas e nas mais diversas instalações. É neste contexto que se desenvolve o presente trabalho.

1.2 Considerações

O estágio realizado na **SODECA Portugal**, no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica - Área de Energia, representa uma etapa crucial para o desenvolvimento deste dissertação. Este estágio permitiu uma aproximação prática aos desafios técnicos e comerciais do setor, alinhando-se com a vontade de contribuir para uma transição energética sustentável, com ênfase na segurança em atmosferas potencialmente explosivas (ATEX) e nos sistemas de ventilação mecânica industrial.

A SODECA Portugal é uma empresa de referência na distribuição de soluções de ventilação industrial e de controlo de atmosferas explosivas, tornando-se no ambiente ideal para aprofundar e consolidar conhecimentos sobre eficiência energética, segurança em instalações e conformidade com as normas ATEX.

Tópicos como análise de ventilação em atmosferas explosivas e aplicação das normas internacionais de segurança foram explorados ao longo de todo o estágio. Este também teve uma forte componente comercial e orçamental, dado que a SODECA Portugal apenas se dedica à comercialização, distribuição e apoio ao projeto de soluções de ventilação, incluindo assim como funções a análise de cadernos de encargo, a seleção e especificação de ventiladores e acessórios, e adaptação das propostas comerciais às exigências dos clientes.

Além da vertente técnica, o estágio proporcionou uma experiência enriquecedora em termos de desenvolvimento profissional, permitindo a consolidação de competências associadas à gestão de projetos, trabalho em equipa e comunicação técnica. A interação direta com clientes e departamentos internos reforçou as competências interpessoais.

Embora todo o estudo da ventilação ATEX tenha sido desenvolvido no âmbito do estágio na SODECA Portugal, a análise do processo e das instalações de VPSA contou com o contributo da **SYSADVANCE**, uma empresa especializada em tecnologias de separação e purificação de gases, que atua no mercado mundial. A SYSADVANCE forneceu informações técnicas essenciais sobre o funcionamento do caso de VPSA, nomeadamente sobre as características operacionais e sobre os componentes do sistema, expondo também os desafios técnicos que este processo enfrenta. Esta colaboração permitiu uma abordagem mais fundamentada do problema, garantindo que o estudo fosse realizado de forma enquadrada com as singularidades do processo de VPSA.

1.3 História e Missão da Empresa

Na segunda metade da década de 1980, Portugal atravessava um período de instabilidade política e ajustamento económico, ainda em fase de consolidação do regime democrático pós-25 de Abril. Este contexto coincidiu com o processo de preparação para a adesão à então Comunidade Económica Europeia (CEE), gerando novas exigências estruturais em diversos setores, incluindo a construção civil. Apesar de alguns constrangimentos económicos, o setor da climatização e ventilação registava

um crescimento assinalável, impulsionado pelas crescentes preocupações com o conforto térmico, qualidade do ar e segurança em espaços comerciais, industriais e habitacionais.

É neste enquadramento que surge a SODECA Portugal, criada com o objetivo de dar resposta à evolução do mercado nacional de ventilação. A fundação da empresa, em março de 1985, sob a designação *D.E.C.flex – Distribuição de Equipamentos e Conduto Flexível, Lda.*, refletiu a identificação de uma lacuna no setor: a ausência de produtos tecnicamente mais avançados no segmento de tubos flexíveis para sistemas de ar condicionado e ventilação. A iniciativa baseou-se no conhecimento da existência destes produtos noutros mercados europeus e na perceção da sua aplicabilidade nas instalações nacionais.

Desde o início, a atividade da empresa centrou-se na distribuição de condutas flexíveis, à data pouco difundidas no mercado português, uma vez que a comercialização destes componentes era feita diretamente pelos fabricantes. Com a entrada da *D.E.C.flex*, este produto passou a estar disponível através de canais de distribuição mais acessíveis a instaladores e projetistas, permitindo uma maior flexibilidade na conceção e execução dos sistemas de ventilação.

A atuação da empresa procurou também dar maior relevância aos aspetos construtivos dos sistemas de climatização, numa altura em que a atenção do setor se concentrava essencialmente nos equipamentos principais, como unidades de tratamento de ar. A introdução de condutas flexíveis visava responder a requisitos específicos de instalação, transporte e armazenamento, simplificando a montagem dos sistemas. Paralelamente, a empresa passou a privilegiar a relação técnica com os clientes, apoiando o dimensionamento e a escolha de componentes de forma mais integrada.

Inicialmente, a identidade visual da marca refletia diretamente as características do produto comercializado, com as cores preto (*DEC*) e prateado (*flex*) associadas ao aspeto metálico das condutas.



Figura 1.2: Logótipo SODECA Portugal.

Desde então, a SODECA Portugal tem vindo a ampliar o seu portefólio de produtos e a adaptar-se às exigências do mercado nacional e internacional no domínio da ventilação e climatização, operando atualmente com uma estrutura consolidada e orientada para soluções técnicas em ambientes industriais e comerciais.

1.4 Apresentação do Estágio

O estágio curricular tem como principais objetivos a realização da tese de mestrado, em parceria com a SODECA Portugal, e o desenvolvimento de competências pesso-

ais e profissionais, cruciais para o término da minha formação académica e futura carreira como Engenheiro Mecânico, com especialização em Energias. Este estágio tem uma duração de 9 meses, tendo começado a 7 de outubro de 2024, e com fim previsto para o dia 3 de julho de 2025.

O estágio decorre em formato laboral, com uma carga horária de oito horas diárias. Este horário é repartido entre tarefas de índole profissional — relacionadas com as atividades correntes da empresa — e atividades de natureza académica, dedicadas ao desenvolvimento da presente dissertação.

Dentro da estrutura organizacional da SODECA Portugal, cujo organograma está representado na figura 1.3, o estagiário encontra-se integrado no departamento técnico, mais especificamente na secção de orçamentação, onde são desenvolvidas tarefas associadas à análise de projetos, definição de soluções técnicas e elaboração de propostas comerciais.

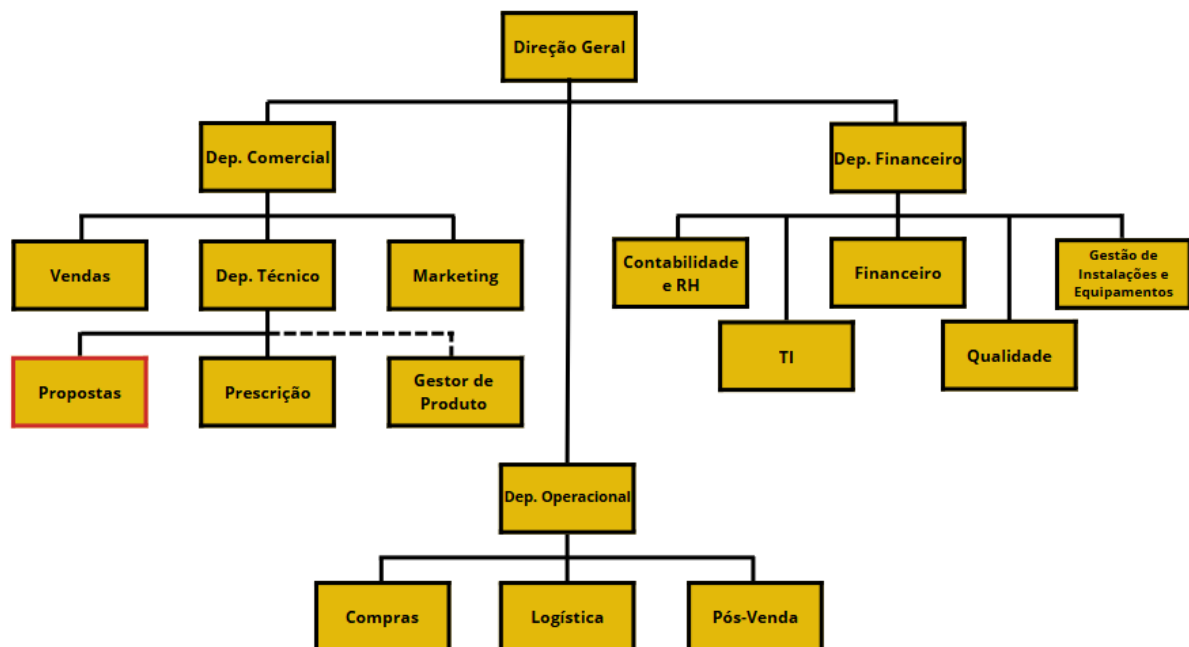


Figura 1.3: Organograma SODECA Portugal.

A orientação do estágio e da elaboração da dissertação está a cargo do Eng.^o Manuel Jorge da Silva Pinho, formado pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, tendo concluído o bacharelato em Materiais e Processos entre 1990 e 1999, e posteriormente a licenciatura em Gestão da Produção entre 1999 e 2001. Atualmente desempenha o cargo de técnico-comercial na SODECA Portugal, contando com uma vasta experiência no setor industrial, acompanhando de forma próxima todo o desenvolvimento desta dissertação.

1.4.1 Objetivos de Estágio

O presente estágio tem como objetivo principal o dimensionamento de um sistema de ventilação mecânica em conformidade com as diretivas ATEX, aplicado a um processo de purificação de hidrogénio por VPSA. Para além deste propósito central, foram definidos objetivos específicos, que se subdividem em duas categorias distin-

tas: objetivos profissionais e objetivos académicos. Estes encontram-se listados de seguida.

Objetivos Profissionais

No âmbito da vertente profissional do estágio, os objetivos estabelecidos centram-se na aplicação prática de conhecimentos técnicos e na integração com os processos operacionais da empresa. Entre os principais objetivos destacam-se:

1. Análise de Documentação Técnica

Compreender os requisitos técnicos e funcionais de cada projeto através da análise e interpretação de cadernos de encargos, mapas de quantidades, plantas e desenhos técnicos fornecidos pelos clientes;

2. Seleção de Equipamentos Equivalentes

Identificar e propor equipamentos alternativos aos especificados nos documentos recebidos, assegurando a compatibilidade técnica e funcional;

3. Utilização de Ferramentas Digitais de Apoio Técnico e Comercial

Adquirir proficiência na utilização de ferramentas digitais aplicadas à engenharia e à gestão, nomeadamente o *SODECA QuickFan Selector*, para seleção técnica de ventiladores, e o *Microsoft Dynamics AX*, para apoio à orçamentação, gestão de encomendas e de vendas;

4. Elaboração de Propostas Comerciais

Converter a informação técnica analisada em propostas comerciais completas, equilibrando critérios de engenharia com a viabilidade económica e os objetivos comerciais da empresa;

5. Formação Técnica Contínua

Participar nas sessões de formação promovidas pela SODECA, com vista ao aprofundamento de conhecimentos sobre soluções de ventilação, normas técnicas e boas práticas do setor;

6. Visitas Técnicas e Contacto com o Terreno

Realizar visitas a obras em curso e a feiras especializadas do setor, com o objetivo de observar a aplicação prática dos equipamentos e acompanhar a sua instalação e funcionamento em contexto real;

7. Integração em Ambiente Profissional

Adaptar-se às exigências do contexto empresarial, compreendendo a dinâmica interna da organização e contribuindo de forma autónoma e responsável nas atividades diárias;

8. Trabalho em Equipa e Colaboração Interdepartamental

Desenvolver competências interpessoais através da cooperação com diferentes departamentos, promovendo a comunicação eficaz e a partilha de conhecimentos técnicos.

Objetivos Acadêmicos

No que respeita à vertente académica, os objetivos do estágio visam consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso formativo, promovendo a aplicação de normas técnicas e fundamentos científicos ao estudo de um problema real de engenharia. Os principais objetivos académicos são:

1. **Pesquisa e Análise de Bibliografia Científica Relevante**
Realizar uma revisão crítica da literatura científica e técnica existente, com o objetivo de fundamentar metodologicamente o estudo, identificar boas práticas de engenharia e comparar diferentes abordagens aplicadas ao contexto da ventilação em atmosferas explosivas;
2. **Caracterização de Atmosferas Explosivas**
Compreender a natureza e os mecanismos de formação de atmosferas potencialmente explosivas, analisando os fatores que contribuem para a sua ocorrência — nomeadamente a presença simultânea de combustível, comburente (ar) e fonte de ignição;
3. **Estudo das Diretrizes ATEX e da Norma IEC 60079**
Analisar criticamente a regulamentação europeia aplicável (Diretivas ATEX [\[7\]](#) [\[8\]](#) e a norma técnica de referência IEC 60079-10-1 [\[9\]](#), com o objetivo de fundamentar o processo de classificação de zonas e garantir a conformidade das soluções adotadas;
4. **Cálculo de Parâmetros Críticos segundo a IEC 60079-10-1**
Determinar, com base nas metodologias propostas pela norma, os parâmetros necessários ao dimensionamento da ventilação — incluindo taxa de fuga, pressão crítica, densidade, caudal de diluição, extensão da zona e grau de ventilação;
5. **Classificação e Análise de Zonas de Risco**
Aplicar os critérios estabelecidos na norma para classificar zonas perigosas (Zonas 0, 1 e 2), tendo em conta a frequência e duração fugas, o tipo de gás envolvido e a eficácia da ventilação;
6. **Dimensionamento de Soluções Técnicas para Ambientes ATEX**
Desenvolver soluções de ventilação mecânica adequadas ao risco identificado, assegurando que respeitam os requisitos funcionais e legais definidos para atmosferas explosivas;
7. **Modelação e Validação das Soluções Propostas**
Representar as soluções dimensionadas em ambiente CAD, recorrendo ao software *SolidWorks*, e proceder à sua validação através de simulações computacionais de fluidos no *ANSYS Fluent*.

1.5 Metodologia e Estrutura

O presente capítulo descreve a abordagem metodológica adotada para a avaliação de riscos associados a operações com hidrogénio na indústria química, aplicada a uma instalação de separação de gases por VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption).

Introdução

Para além de detalhar os procedimentos técnicos, este capítulo apresenta a estrutura geral da dissertação, contextualizando cada etapa do estudo e a sequência lógica adotada para o desenvolvimento das soluções de ventilação, quer naturais, quer mecânicas, bem como a simulação CFD.

A metodologia adotada combina análise normativa, projeto técnico, modelação CAD, simulação CFD e avaliação comparativa entre resultados normativos e numéricos, permitindo uma validação integrada das soluções de ventilação. Os principais passos metodológicos incluem:

- Avaliação normativa segundo as normas ATEX e IEC 60079-10-1;
- Conceção do projeto técnico, incluindo seleção de grelhas e ventiladores ATEX;
- Modelação CAD do contentor VPSA e integração das soluções;
- Simulação CFD no ANSYS Fluent, com modelação da fuga de hidrogénio, representação das grelhas e ventiladores, com a análise de variáveis críticas como velocidade média do escoamento e distribuição de concentração de hidrogénio;
- Comparação entre resultados normativos e CFD, validação das soluções e proposta de melhorias.

A dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

1. **Introdução:** Contextualização do hidrogénio na transição energética, motivação do estudo e objetivos.
2. **Revisão Bibliográfica e Enquadramento Teórico:** Apresenta normas e equipamentos ATEX, abordando ligeiramente a segurança e o hidrogénio na indústria, finalizando com uma introdução ao CFD.
3. **Desenvolvimento:** Inclui a apresentação do caso de estudo, o dimensionamento do mesmo e as propostas de soluções, quer naturais, quer mecânicas.
4. **Resultados e Discussão:** Apresenta a análise detalhada dos resultados das simulações CFD, comparação com os cálculos normativos e avaliação de desempenho das soluções.
5. **Conclusão:** Síntese dos resultados, contributos técnicos, limitações e recomendações para futuras aplicações industriais.

2 Enquadramento Teórico e Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão detalhada da literatura relevante, abordando os conceitos fundamentais relacionados com atmosferas explosivas, normas ATEX, a utilização do hidrogénio na indústria química e com modelação CFD. Além disso, são exploradas práticas de segurança e a aplicabilidade das regulamentações em ambientes industriais, culminando numa análise crítica que destaca lacunas e oportunidades para futuras investigações.

2.1 Introdução - Zonas ATEX e Atmosferas Explosivas

As atmosferas explosivas são uma das preocupações mais inerentes relacionadas com ambientes industriais, e a sua presença requer uma gestão dedicada de forma a garantir segurança dos trabalhadores, bem como dos equipamentos e instalações. O termo ATEX deriva do francês "Atmosphères Explosibles" e é a regulamentação europeia específica sobre a segurança em áreas onde pode ocorrer a formação de zonas inflamáveis em contacto com o ar. Os atos regulamentares, ou seja, a Diretiva Europeia 1999/92/CE [7], a Diretiva Europeia 2014/34/UE [8] e a norma IEC 60079-10-1 [9], criam uma estrutura legal para prevenir danos mediante acidentes relacionados com a explosão; portanto, são uma diretiva eficaz para minimizar danos humanos, materiais, ou até mesmo ambientais [10].

As atmosferas explosivas podem ocorrer em uma variedade de indústrias. Estas formam-se quando substâncias inflamáveis, como gases, vapores ou poeiras atingem a concentração crítica junto à fonte de ignição, na presença claro, do oxigénio [11]. O grau de risco é de tal forma elevado que apenas um simples descuido, nas medidas de segurança, pode ter grandes consequências como explosão, fogo e emissões tóxicas.

As substâncias inflamáveis às quais correspondem zonas ATEX distinguem duas categorias: gases, incluindo vapores ou névoas, e poeiras, isto é, sólidos combustíveis [7]. Apesar de existirem semelhanças entre as duas categorias, como limites de explosão, velocidade de queima e energia mínima de ignição, há diferenças igualmente marcantes [12]. As nuvens explosivas de poeiras ocorrem com menos frequência do que as misturas inflamáveis de gases ou vapores, as quais tendem a ser mais comuns. Enquanto a propagação da chama em gases e vapores depende da concentração do mesmas no ar, as poeiras podem queimar mesmo quando depositadas em superfícies, originando um fenómeno conhecido como "explosão secundária". Isto acontece porque o oxigénio presente no ar entre as partículas finas é suficiente para sustentar uma combustão lenta e contínua [12].

2.1.1 Propriedades das Substâncias Inflamáveis

A análise das propriedades das substâncias responsáveis pela formação de zonas ATEX é um fator crítico para a segurança industrial. Ainda assim, pouca literatura consolidada está disponível sobre o assunto, o que dificulta a abordagem abrangente

de como essas propriedades influenciam a ocorrência de atmosferas explosivas. Assim, artigos específicos foram usados para construir uma base que possibilitasse uma melhor compreensão dessas propriedades e sua relevância prática.

Entre as propriedades dos compostos inflamáveis, deve-se considerar os limites de inflamabilidade, que se divide em Limite Inferior de Inflamabilidade (LFL) e em Limite Superior de Inflamabilidade (UFL). Estes indicam concentrações de combustível no ar que são misturas incapazes de sustentar a combustão [13]. Na figura 2.1 podemos ver a representação dos limites de inflamabilidade tanto para o hidrogênio, como para o metano.

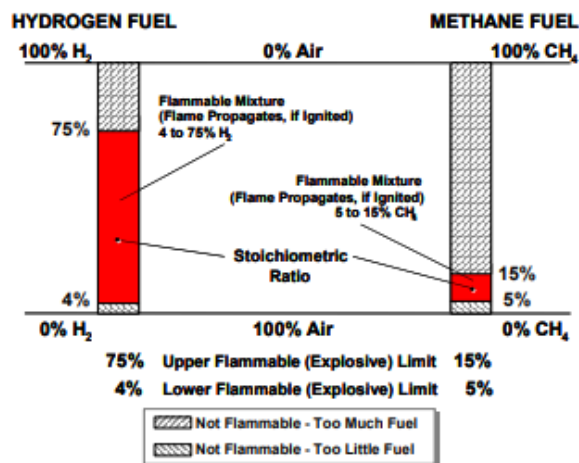


Figura 2.1: Limites de Inflamabilidade para Combustíveis no Ar [13].

Misturas abaixo do LFL são consideradas muito pobres para queimar, enquanto que as misturas acima dos UFL consideram-se muito ricas [4]. Estes índices são essenciais para avaliação de risco de explosão, tendo sido amplamente discutidos nos artigos analisados, indicando, por exemplo, que o LFL e o UFL podem variar muito em diferentes condições experimentais [14].

A temperatura e a pressão influenciam diretamente os limites de inflamabilidade de um componente. Um aumento da temperatura amplia a faixa de inflamabilidade, enquanto que variações de pressão tanto podem reduzir como aumentar estes limites. De um modo específico, a pressões mais baixas, o UFL diminui, proporcionando uma mistura mais fina e suscetível à ignição [4]. Estes fatores também apoiam a necessidade de projetar soluções mais conservadoras em ambientes operacionais, principalmente quando envolvem gases e vapores inflamáveis.

Outras propriedades críticas incluem a Concentração Limite de Oxigênio (LOC), que define a quantidade mínima de oxigênio necessária para que ocorra combustão, e a Energia Mínima de Ignição (MIE), que é a menor energia necessária para inflamar uma mistura. A Temperatura de Autoignição (*Auto-Ignition Temperature*) (AIT) também é um parâmetro essencial, representando a temperatura mínima em que uma substância pode queimar espontaneamente [4]. Por fim, o Ponto de Fulgor é um parâmetro essencial para a definição de líquidos inflamáveis, pois este indica a temperatura mínima a que uma substância começa a libertar vapores em quantidade suficiente de modo a formar, com o ar, uma mistura inflamável [4]. A figura 2.2 mostra um diagrama que relaciona os valores de temperatura e pressão com as variáveis já mencionadas.

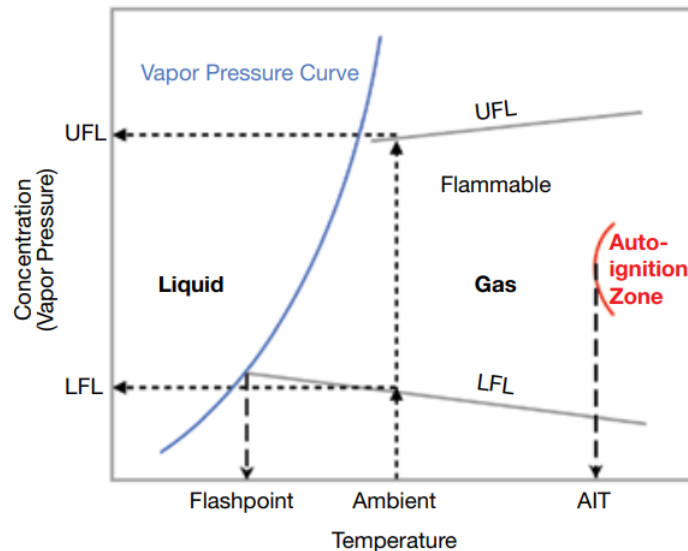


Figura 2.2: UFL, LFL, AIT e FlashPoint como funções da Temperatura e da Concentração (Pressão) [4].

2.2 As Diretivas e Normas ATEX

Neste capítulo, é apresentada a análise das **Diretivas 1999/92/CE** [7] e **2014/34/EU** [8], bem como da norma **IEC 60079-10**, complementada pelas normas **IEC 60079-20-1** [15] e **IEC 60079-14** [16].

No que diz respeito à IEC 60079-10, apenas será analisada a Parte 1 [9], relativa à classificação de áreas com presença de gases inflamáveis, por ser a que se enquadra no contexto do hidrogénio. A Parte 2 [17], dedicada a poeiras combustíveis, não será abordada dada a sua extensão e por não se enquadrar nos objetivos deste trabalho.

2.2.1 Análise da Diretiva 1999/92/CE

A Diretiva 1999/92/CE é uma norma fundamental da União Europeia que estabelece prescrições mínimas de segurança para os operários em ambientes com atmosferas explosivas. Publicada a 16 de dezembro de 1999, a diretiva foi criada para melhorar o nível de proteção dos trabalhadores e promover a harmonização das regulamentações entre os Estados-Membros, contribuindo para um ambiente industrial mais seguro e uniforme [7]. Os principais objetivos desta diretiva incluem a prevenção de explosões, a proteção da saúde, segurança dos trabalhadores, e a criação de um padrão regulamentar comum em toda a União Europeia. Estes objetivos são alcançados por meio de medidas técnicas e organizacionais que envolvem a avaliação de riscos, classificação de áreas perigosas e o uso de equipamentos apropriados.

A diretiva aplica-se a todas as indústrias e instalações onde possam ocorrer atmosferas explosivas devido à presença de gases, vapores, névoas ou poeiras combustíveis. Contudo, áreas específicas, como o transporte terrestre, marítimo e aéreo, setores médicos e indústrias extrativas já reguladas por outras normas, estão excluídas da sua área de ação [7].

A classificação de zonas ATEX é essencial para a gestão de riscos em atmosferas explosivas, estabelecendo diretrizes para a identificação e categorização de áreas

perigosas. Esta categorização baseia-se na frequência e na duração em que uma atmosfera explosiva está presente, sendo fundamental para a escolha de equipamentos e medidas de segurança [7].

Classificação para Gases, Vapores e Névoas (Categoria G):

- **Zona 0:** Define locais onde uma atmosfera explosiva constituída por uma mistura de gases, vapores ou névoas inflamáveis está presente continuamente, por longos períodos ou frequentemente. Exemplos incluem o interior de tanques de armazenamento de hidrocarbonetos líquidos.
- **Zona 1:** Refere-se a locais onde uma atmosfera explosiva é provável de ocorrer ocasionalmente durante operações normais, como áreas próximas a flanges ou válvulas em refinarias.
- **Zona 2:** Inclui áreas onde uma atmosfera explosiva é improvável durante condições normais de operação, mas, caso ocorra, será de curta duração, como pequenas fugas em sistemas de tubulação.

A figura 2.3 exibe uma representação gráfica das condições essenciais para que ocorra uma explosão proveniente de gases, vapores ou névoas.

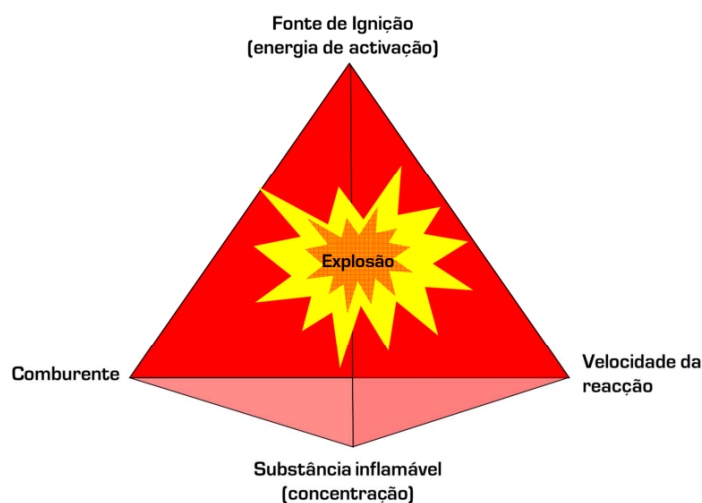


Figura 2.3: Condições Necessárias para a explosão de Gases, Vapores ou Névoas [18].

Classificação para Poeiras Combustíveis (Categoria D):

- **Zona 20:** Refere-se a locais onde uma nuvem de poeira combustível está presente continuamente, por longos períodos ou frequentemente, como silos de grãos.
- **Zona 21:** Representa locais onde uma atmosfera explosiva em forma de nuvem de poeira é provável de ocorrer ocasionalmente, como áreas próximas a moinhos ou misturadores.

- **Zona 22:** Abrange áreas onde a presença de poeiras combustíveis é improvável durante condições normais de operação, mas, caso ocorra, será de curta duração, como depósitos de poeira em superfícies.

Na figura 2.4 pode-se ver, da mesma forma, um grafismo representativo das condições que necessitam de existir para que se possa dar uma explosão proveniente de poeiras combustíveis.

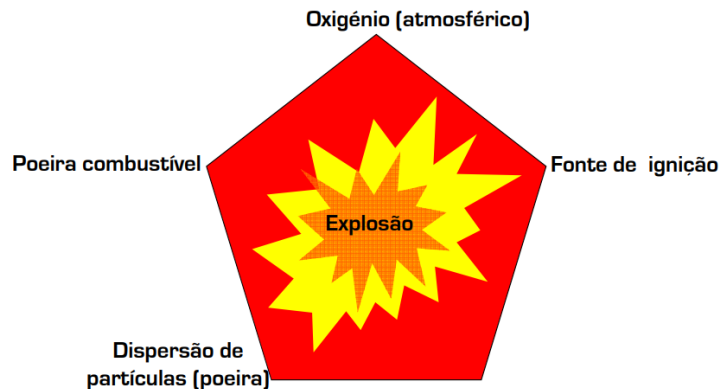


Figura 2.4: Condições Necessárias para a Explosão de Poeiras Combustíveis [18].

De acordo com a Diretiva 1999/92/CE, a responsabilidade pela classificação das zonas de risco cabe ao empregador. Este deve garantir a identificação e escolha precisa dos equipamentos que podem ser utilizados em cada zona, conforme os níveis de proteção exigidos [7]. Na figura 2.5 encontram-se representadas graficamente as zonas ATEX definidas pela Diretiva 1999/92/CE, adaptado da ficha técnica [19].

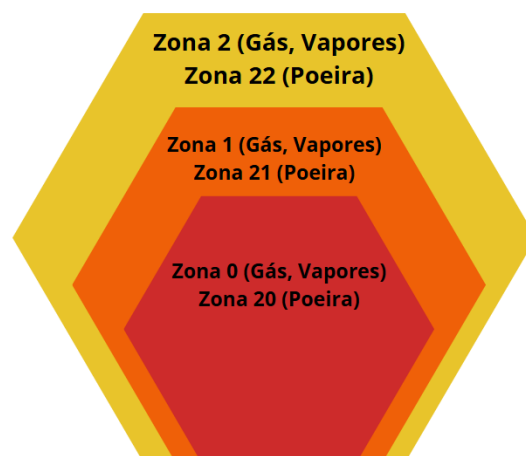


Figura 2.5: Zonas de Uso.

Outro elemento essencial da Diretiva 1999/92/CE é a obrigatoriedade de avaliação de riscos, que deve considerar a probabilidade de formação de atmosferas explosivas, a existência de fontes de ignição e as potenciais consequências de uma explosão. Essa avaliação é consolidada no Dispositivos de Controle e Proteção de Explosão

(DCPE), uma ferramenta dinâmica que inclui a identificação de zonas ATEX, as medidas preventivas e corretivas adotadas, evidências de treino dos trabalhadores e a conformidade de equipamentos e instalações. O DPCE deve ser atualizado regularmente, especialmente em situações de alteração nos processos industriais [7].

A diretiva também enfatiza a importância da coordenação em locais compartilhados, onde várias empresas operam simultaneamente, determinando que um empregador principal seja responsável pela gestão das medidas de segurança. Além disso, todos os trabalhadores em zonas ATEX devem receber formação específica, com temas que abrangem riscos de explosões, o uso de equipamentos e respostas a emergências [7].

Desde a sua implementação, a Diretiva 1999/92/CE trouxe benefícios significativos, sendo que entre eles se destaca a redução de acidentes industriais. A diretiva também contribuiu para a padronização regulatória na Europa, facilitando o comércio e a cooperação entre os Estados-Membros. Além disso, promoveu uma cultura de prevenção, incentivando as empresas a adotar abordagens proativas para a gestão de riscos [7]. No entanto, a sua implementação enfrenta desafios importantes, como os altos custos de conformidade para pequenas e médias empresas, a complexidade técnica envolvida na classificação de zonas e na elaboração do DPCE, além da necessidade de adaptação contínua às revisões normativas.

Em suma, a Diretiva 1999/92/CE representa um marco na proteção de trabalhadores em atmosferas explosivas, combinando uma abordagem abrangente de avaliação de riscos, classificação de áreas e medidas preventivas. Embora a sua implementação exija esforços significativos, os seus benefícios em termos de segurança, proteção ambiental e harmonização regulatória justificam os investimentos necessários a sua aplicação contínua.

2.2.2 Análise da Diretiva 2014/34/EU

A Diretiva 2014/34/EU entrou em vigor a 20 de abril de 2016, substituindo a antiga Diretiva 94/9/CE. Esta legislação foi desenvolvida com o objetivo de adequar os requisitos técnicos para equipamentos e sistemas de proteção utilizados em atmosferas potencialmente explosivas, e visa garantir que os produtos colocados no mercado europeu sejam seguros, de modo a reduzir os riscos associados a explosões em ambientes industriais e proteger tanto trabalhadores como instalações industriais [8]. Na figura 2.6 encontra-se representada a marcação que todos os equipamentos protegidos contra atmosferas explosivas devem ter.

A diretiva possui um foco claro direcionado para a proteção, segurança e saúde dos trabalhadores expostos a atmosferas explosivas, garantindo a integridade do operário, do equipamento e do processo. A Diretiva 2014/34/EU representa, assim, um marco na segurança industrial, integrando normas técnicas rigorosas com objetivos económicos e sociais mais amplos [8].

O âmbito de aplicação da diretiva abrange equipamentos elétricos e não elétricos destinados a serem instalados em atmosferas potencialmente explosivas, bem como sistemas de proteção projetados para evitar a propagação de explosões. Contudo, produtos destinados ao uso doméstico, equipamentos médicos e substâncias explosivas não enquadradas no conceito de atmosferas potencialmente explosivas são explicitamente excluídos do seu campo de aplicação [8].



Figura 2.6: Simbologia ATEX [20].

Uma das principais contribuições da Diretiva 2014/34/EU é a imposição de critérios técnicos rigorosos para a certificação de equipamentos. Antes de serem comercializados, os produtos devem passar por análises de risco detalhadas, onde potenciais fontes de ignição são identificadas e eliminadas. Estes equipamentos também são submetidos a testes rigorosos de desempenho, como resistência à ignição e robustez mecânica. De modo a garantir a conformidade, os fabricantes precisam submeter de os seus produtos a organismos notificados, que emitem os certificados de conformidade necessários. Além disso, todos os equipamentos devem exibir a marcação *Conformité Européenne* (Conformidade Europeia) (CE), acompanhada de um código ATEX, que identifica a categoria e o nível de proteção oferecido [8]. A figura 2.7 representa um exemplo de uma marcação CE.



Figura 2.7: Exemplo de Marcação CE [19].

A Diretiva 2014/34/EU classifica os equipamentos destinados a atmosferas potencialmente explosivas em dois grupos principais, consoante a aplicação e o nível de proteção necessário, de modo a garantir que cada equipamento é aplicado corretamente. São então divididos em:

Grupo I - Equipamentos para Minas Subterrâneas:

O Grupo I abrange equipamentos projetados para operar em minas subterrâneas, onde há risco de presença de metano ou poeiras combustíveis. Esses equipamentos são classificados em duas categorias:

- **Categoria M1:**

- Projetada para operar continuamente em condições de risco extremo.
- Oferece um alto nível de proteção.
- Equipamentos permanecem operacionais mesmo na presença de atmosferas explosivas.

- **Categoria M2:**

- Projetada para ser desligada quando uma atmosfera explosiva está presente.
- Oferece um nível elevado de proteção, mas com menor exigência de operação contínua.

Grupo II - Equipamentos para Ambientes Industriais:

O Grupo II aplica-se a instalações de superfície, como indústrias químicas, petroquímicas, alimentar, entre outras. Os equipamentos desse grupo são subdivididos em categorias baseadas no nível de risco:

- **Categoria 1:**

- Projetada para operar com segurança em zonas de alto risco.
- Aplicável em zonas 0 (gases) e 20 (poeiras), onde atmosferas explosivas estão presentes continuamente ou por longos períodos.
- Exige um nível muito elevado de proteção.

- **Categoria 2:**

- Projetada para operar com segurança em zonas de risco moderado.
- Aplicável em zonas 1 (gases) e 21 (poeiras), onde atmosferas explosivas podem ocorrer ocasionalmente durante operações normais.
- Oferece um elevado nível de proteção.

- **Categoria 3:**

- Projetada para operar com segurança em zonas de menor risco.
- Aplicável em zonas 2 (gases) e 22 (poeiras), onde atmosferas explosivas estão presentes apenas raramente e por curtos períodos.
- Requer um nível básico de proteção.

Desde a sua implementação, a Diretiva 2014/34/EU tem proporcionado benefícios significativos, especialmente no que toca à redução de riscos em atmosferas explosivas. Ao exigir equipamentos certificados, a diretiva, melhora a confiabilidade dos sistemas de proteção, incentivando avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de sensores de alta precisão e dispositivos mais resistentes a atmosferas agressivas. Além disso, a sua aplicação harmonizada em toda a União Europeia tem facilitado o comércio e promovido a competitividade no mercado, criando um ambiente mais seguro e eficiente para as operações industriais [8].

No entanto, à semelhança da Diretiva 1999/92/CE, já anteriormente referida, a Diretiva 2014/34/EU também enfrenta desafios significativos no seu cumprimento, especialmente por parte das pequenas e médias empresas. Estas continuam a deparar-se com dificuldades substanciais para satisfazer os requisitos da certificação, em grande parte devido aos elevados custos envolvidos e à complexidade técnica dos

processos. Além disso, a necessidade de adaptação constante às revisões normativas e à rápida evolução tecnológica impõe investimentos contínuos em infraestruturas e formação especializada, perpetuando os obstáculos já identificados no contexto da diretiva anterior. Apesar disso, os benefícios proporcionados pela Diretiva 2014/34/EU, em termos de proteção de vidas humanas e prevenção de perdas económicas, superam os desafios enfrentados pelas empresas na sua implementação [8].

Em conclusão, esta diretiva desempenha um papel central na segurança industrial na Europa. Ao estabelecer requisitos claros para o design, fabricação e certificação de equipamentos destinados a atmosferas explosivas, a diretiva não apenas protege os trabalhadores, mas também promove uma cultura de prevenção e inovação tecnológica [8].

2.2.3 IEC 60079-10-1

A norma **IEC 60079-10-1:2020** [9], intitulada "Atmosferas Explosivas - Parte 10-1: Classificação das áreas – Atmosferas explosivas gasosas", é a principal referência internacional para classificação de áreas com potencial de atmosferas explosivas por gases inflamáveis, sendo amplamente empregada em instalações industriais para delimitar zonas perigosas tanto em ambientes internos quanto externos [21]. Essa norma define as zonas 0, 1 e 2 conforme a probabilidade de ocorrência de atmosfera explosiva: Zona 0 quando a presença de gás inflamável é contínua ou frequente, Zona 1 quando ocorre ocasionalmente em condições normais de operação, e Zona 2 quando não é esperada em operação normal e, se acontecer, será por curto período [21]. O critério de determinação dessas zonas baseia-se no grau de liberação do gás (contínuo, primário ou secundário) e na eficácia da ventilação em diluí-lo [21]. Para apoiar a análise, a IEC 60079-10-1 [9] fornece modelos e equações que estimam o volume de nuvens inflamáveis resultantes de diferentes cenários de libertação, juntamente com diversas diretrizes de ventilação [22]. Contudo, o próprio padrão adverte que essas fórmulas se aplicam apenas a condições limitadas e não substituem avaliações detalhadas em casos complexos, promovendo uma análise assente em princípios de mecânica dos fluidos e ventilação para classificar e determinar as zonas [22]. A norma também recomenda o preenchimento das tabelas A.1 e A.2 para cada caso.

Aplicação em Instalações com Hidrogénio

Em instalações que manuseiam hidrogénio, a aplicação da IEC 60079-10-1 requer considerações especiais devido às propriedades únicas desse gás. O H_2 é extremamente leve e difunde-se rapidamente, de modo a que fugas que ocorrem ao ar livre tendem a dissipar-se de forma mais fácil – frequentemente resultando em extensões de zona relativamente pequenas ou até mesmo em classificação de extensão negligenciável (NE), caso haja ventilação abundante [23]. Por outro lado, em espaços fechados o hidrogénio pode acumular-se nas partes elevadas se a ventilação for inadequada, formando atmosferas explosivas internas mesmo a partir de pequenas fugas [23]. A ventilação, portanto, torna-se um fator crítico no projeto seguro de sistemas de hidrogénio, devendo-se garantir renovação de ar suficiente para evitar acumulações de gás acima do LFL. Estudos recentes recomendam, inclusive, adotar critérios de diluição conservadores para o hidrogénio – por exemplo, calcular a distância de classificação até onde a concentração atinja 50% do LFL – de modo a

incorporar margens de segurança face às incertezas na dispersão e à alta inflamabilidade do hidrogénio [21].

Do ponto de vista prático, a literatura técnica destaca o uso de simulações computacionais (CFD) para complementar os métodos da IEC 60079-10-1 na classificação de áreas com hidrogénio. Casos de estudo de fugas a alta pressão de hidrogénio têm demonstrado que as previsões analíticas da norma podem superestimar as zonas perigosas, indicando volumes inflamáveis maiores do que os obtidos por simulações CFD detalhadas [24]. Por exemplo, em cenários de fugas de hidrogénio a alta pressão (centenas de bar), verificou-se que as fórmulas padronizadas não capturam adequadamente a dispersão rápida do jato, muitas vezes extrapolando além do seu âmbito de validade; de fato, a metodologia simplificada do Anexo D da IEC 60079-10-1 mostrou-se inaplicável para certas condições de fuga de hidrogénio em estações de abastecimento, exigindo abordagens mais robustas ou modelação avançada de modo a determinar a extensão da zona [21]. Neste contexto, ferramentas de CFD e estudos experimentais atuam como validação das classificações propostas, permitindo ajustar as zonas de acordo com o comportamento real do hidrogénio e garantindo que a classificação resultante seja segura sem deixar de ser realista [24].

Abordagens Científicas à IEC 60079-10-1

A norma IEC 60079-10-1 tem sido aplicada de diversas formas por diversos autores, os quais exploram tanto os fundamentos conceptuais como as limitações práticas dos seus métodos de classificação de zonas com risco de atmosferas explosivas. Bozek [25] propõe uma leitura integrada da norma, destacando a introdução do caudal característico como parâmetro chave, definida por:

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \cdot k \cdot \text{LFL}} \quad (2.1)$$

onde W_g é a taxa de libertação do gás [kg/s], ρ_g a densidade do gás [kg/m³], k um fator de correção, e LFL o limite inferior de inflamabilidade. Este parâmetro é correlacionado com a velocidade de ventilação u_w , recorrendo ao gráfico da figura C.1 da norma [9], de modo a determinar o grau de diluição. .

Choi e Byeon [26] aplicam essa metodologia especificamente a instalações com hidrogénio. Partindo da interpretação logarítmica dos gráficos da norma, determinaram o valor crítico do caudal característico para assegurar uma diluição elevada com uma velocidade de 0,5 m/s:

$$Q_{c\text{lim}} = 0,0375 \text{ m}^3/\text{s}$$

A condição de não classificação (Zona 2 NE) pode, assim, ser garantida se a taxa de fuga cumprir:

$$W_g < 0.0001245 \text{ kg/s}$$

Assumindo $\rho_g = 0,083 \text{ kg/m}^3$ e $\text{LFL} = 0,04$, obtém-se $W_g < 1,245 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$. Para calcular W_g , os autores consideram um escoamento sónico, modelado por:

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT}} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (2.2)$$

com $C_d = 1$, $\gamma = 1,41$, $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$, $M = 2 \text{ kg}/\text{kmol}$, e $T = 293 \text{ K}$. Para pressões entre 258 kPa e 734 kPa, calcularam-se áreas de orifício críticas entre 0,4 e 1,3 mm², dependendo do equipamento considerado (aquecedor, permutador, filtro).

Já Mauri e van Wingerden [27] examinam a validade dos modelos normativos em recintos ventilados mecanicamente, através de simulações CFD. A norma requer, para atingir a condição não perigosa (volume inflamável $< 0,1 \text{ m}^3$), velocidades de ventilação significativamente superiores às obtidas por simulação: por exemplo, 0,753 m/s segundo a edição de 2015 (STD15), versus apenas 0,020 m/s em simulações com fluxo ideal e extração forçada. A mesma simulação mostrou que a norma de 2008 (STD08) exigiria 2,32 m/s para o mesmo cenário.

A diferença entre as abordagens reside na forma como é considerada a geometria e o escoamento do recinto. Enquanto STD08 se baseia no número de renovações de ar por hora, a STD15 centra-se na velocidade média de ventilação.

Conclui-se que, apesar da norma fornecer um quadro estruturado para a classificação de zonas perigosas, a sua aplicação direta pode resultar em classificações excessivamente conservadoras, justificando o uso de CFD para validar as condições reais de diluição em instalações específicas.

2.2.4 IEC 60079-20-1

A norma **IEC 60079-20-1:2010**, de título "*Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data*" [15], caracteriza e classifica as diversas substâncias inflamáveis, processo que se mostra essencial para a escolha de equipamentos elétricos e mecânicos, destinados a funcionar em zonas ATEX.

Esta norma apresenta-se como complementar à **IEC 60079-10-1** [9], que para além de consolidar a classificação das zonas perigosas, foca-se nas características das substâncias inflamáveis e em como estas influenciam a seleção dos equipamentos destinados a estas zonas. Sendo assim, esta norma organiza os gases e vapores inflamáveis em grupos (Grupos II e III), com base no risco de explosão associado.

Para os gases (Grupo II), esta classificação assenta em dois critérios: a Abertura Máxima Experimental Segura (*Maximum Experimental Safe Gap*) (MESG) e a Corrente Mínima de Iniguição (*Minimum Ignition Current*) (MIC):

- **Grupo IIA:** Gases menos inflamáveis, com $\text{MESG} \geq 0,9 \text{ mm}$ e $\text{MIC} > 0,8$ (ex: propano, etanol);
- **Grupo IIB:** Gases com inflamabilidade intermédia, com $0,5 \text{ mm} < \text{MESG} < 0,9 \text{ mm}$ e $0,45 \leq \text{MIC} \leq 0,8$ (ex: etileno, metanol);
- **Grupo IIC:** Gases altamente inflamáveis, com $\text{MESG} \leq 0,5 \text{ mm}$ e $\text{MIC} < 0,45$ (ex: hidrogénio, acetileno).

Já para as poeiras combustíveis (Grupo III), a classificação é feita da seguinte forma:

- **Grupo IIIA:** Poeiras combustíveis em suspensão (ex: fibras têxteis);

- **Grupo IIIB:** Poeiras combustíveis não condutivas (ex: farinha, açúcar);
- **Grupo IIIC:** Poeiras combustíveis condutivas (ex: poeira de alumínio, carbono).

2.2.5 IEC 60079-14

A norma **IEC 60079-14:2013** [16] define os requisitos técnicos para o projeto, seleção e instalação de equipamentos elétricos em atmosferas potencialmente explosivas, sendo um documento essencial na aplicação prática das diretivas ATEX. Entre os critérios de maior relevância, destaca-se a exigência de compatibilidade entre a temperatura máxima de superfície dos equipamentos e a temperatura mínima de ignição (AIT) dos gases, vapores ou poeiras presentes. Para gases, esta verificação é feita através da correspondência com as classes de temperatura normalizadas (T1 a T6), cuja correspondência com os limites mínimos de ignição está resumida na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Relação entre a AIT do gás ou vapor e a classe de temperatura do equipamento.

Classe de temperatura exigida	Temperatura mínima de ignição do gás [°C]	Classes de temperatura permitidas
T1	> 450	T1 – T6
T2	> 300	T2 – T6
T3	> 200	T3 – T6
T4	> 135	T4 – T6
T5	> 100	T5 – T6
T6	> 85	T6

No caso de atmosferas com poeiras combustíveis, a norma **IEC 60079-14:2013** [16] estabelece critérios específicos para garantir que a temperatura máxima de superfície dos equipamentos se mantém inferior à temperatura mínima de ignição da poeira presente. As fórmulas de verificação variam consoante a forma e espessura da poeira, como se indica a seguir:

- **Poeira em suspensão (nuvem):**

$$T_{\max} \leq \frac{2}{3} \cdot T_{\text{ignição, nuvem}}$$

- **Camada de poeira até 5 mm de espessura:**

$$T_{\max} \leq T_{5\text{mm}} - 75^\circ\text{C}$$

- **Camadas entre 5 mm e 50 mm:**

A temperatura máxima admissível deve ser reduzida com base em curvas experimentais (Figura 1 da IEC 60079-14 [16]) ou por ensaio laboratorial apropriado.

- **Camadas superiores a 50 mm ou imersão total em poeira:**

Deve considerar-se uma redução significativa da temperatura de superfície e garantir o cumprimento dos requisitos de proteção para equipamentos com nível **EPL Da**.

Em paralelo, a norma estabelece a obrigatoriedade de seleção do Nível de Proteção do Equipamento (*Equipment Protection Level*) (EPL), que deve estar em conformidade com a classificação da zona de risco: Ga, Gb e Gc para atmosferas com gases (Zonas 0, 1 e 2, respetivamente), e Da, Db e Dc para poeiras combustíveis (Zonas 20, 21 e 22). Dentro destas proteções, destacam-se a **Ex d** (invólucro antideflagrante), definida na norma **IEC 60079-1** [28], e a **Ex e** (segurança aumentada), estabelecida pela **IEC 60079-7** [29], amplamente utilizadas em equipamentos elétricos para zonas com presença de gases.

Tabela 2.2: Correspondência entre zonas ATEX e níveis de proteção dos equipamentos (EPLs) segundo a IEC 60079-14.

Zona	Níveis de proteção dos equipamentos (EPLs)
0	Ga
1	Ga ou Gb
2	Ga, Gb ou Gc
20	Da
21	Da ou Db
22	Da, Db ou Dc

Adicionalmente, a norma aborda aspetos críticos como a influência da temperatura ambiente, o risco de ignição por radiação ótica ou térmica, a necessidade de garantir a continuidade de terra e proteção contra descargas eletrostáticas, e os requisitos associados à instalação de componentes como cabos e sistemas de ventilação [16].

2.2.6 Equipamentos ATEX

Neste capítulo, apresentam-se dois exemplos de equipamentos certificados para atmosferas potencialmente explosivas: o ventilador centrífugo CPV/ATEX (Figura 2.8) e o interruptor INT/ATEX (Figura 2.9), de forma a enquadrar todas as normas abordadas com o contexto prático. Ambos os equipamentos são utilizados em ambientes industriais onde existem riscos associados à presença de gases inflamáveis ou poeiras combustíveis, cumprindo os requisitos da Diretiva ATEX 2014/34/EU [8] e das normas da série IEC 60079.

O CPV/ATEX é um ventilador centrífugo de simples aspiração, construído em material plástico antiestático, resistente à corrosão, especialmente concebido para operação em atmosferas explosivas. Está disponível em várias configurações com motores ATEX, adaptando-se tanto a atmosferas com gases como com poeiras inflamáveis.

As principais codificações ATEX disponíveis para os motores incluem:

- **II 2G Ex db IIB T4 Gb**

Proteção por invólucro antideflagrante (Ex d) [28], adequada para gases do

grupo IIB [15], com temperatura máxima de superfície de 135 °C (T4) [16], em zonas 1 e 2 (categoria 2G) [8], com EPL Gb [16];

- **II 2G Ex eb IIB T3 Gb**

Proteção por segurança aumentada (Ex e) [29], para atmosferas com gases do grupo IIB [15], com temperatura máxima de superfície de 200 °C (T3) [16], para zonas 1 e 2 [8], com EPL Gb [16];

- **II 2D Ex tb IIIC T135 °C Db**

Proteção por invólucro estanque ao pó (Ex tb) [30], para poeiras condutivas (grupo IIIC) [15], com temperatura de superfície de 135 °C [16], adequado para zonas 21 e 22 [8], com EPL Db [16].



Figura 2.8: CPV/ATEX da SODECA.

O INT/ATEX é um interruptor rotativo de arranque-paragem com invólucro termoplástico antiestático, concebido para ambientes com risco de atmosferas explosivas. Possui grau de proteção IP66, sendo adequado para o acionamento de motores trifásicos.

A sua codificação ATEX permite a utilização segura em zonas classificadas com gases ou poeiras:

- **II 3G Ex nR IIC T6 Gc**

Proteção por restrição de respiração (Ex nR) [31], adequada para atmosferas com gases do grupo IIC [15], com temperatura de superfície máxima de 85 °C (T6) [16], em zonas 2 (categoria 3G) [8], com nível de proteção EPL Db [16];

- **II 2D Ex tb IIIC T85 °C Db IP66**

Proteção por invólucro estanque ao pó (Ex tb) [30], adequada a poeiras condutivas (grupo IIIC) [15], com temperatura máxima de superfície de 85 °C [16], para zonas 21 (categoria 2D) [8], com nível de proteção EPL Db [16].

Estes equipamentos devem ser selecionados e instalados de acordo com a classificação da zona (IEC 60079-10-1) [9], as propriedades da substância presente (IEC 60079-20-1) [15], e os requisitos de instalação (IEC 60079-14) [16].



Figura 2.9: INT/ATEX da SODECA.

2.3 Segurança na Indústria e aplicabilidade das Diretivas ATEX

Em setores nos quais substâncias inflamáveis e com potencial explosivo estão presentes, é fundamental manter a segurança. Como referido anteriormente, as atmosferas explosivas são um risco em diversas indústrias, como a petroquímica, farmacêutica, alimentar e metalomecânica [32]. Incidentes acontecidos nos anos 70, como Flixborough [33], em 1974, ou Seveso [34], em 1976, foram responsáveis por promover um avanço regulatório na segurança, levando as empresas a adotar diretrizes como as ATEX, que estabelecem critérios técnicos e organizativos para a diminuição do risco [35].

Para efetuar a adesão às diretivas ATEX, a empresa deve realizar uma análise detalhada dos riscos, começando com a classificação das áreas e adoção de equipamentos em conformidade. A diretiva 1999/92/CE [7] exige que empregadores elaborem um documento de proteção contra explosões, que deve indicar os emissores, a medição do risco e o plano de emergências. Já a diretiva 2014/34/UE [8] é complementar e fornece o procedimento para a fabricação de equipamentos que operam nas áreas classificadas.

Casos práticos demonstram a importância de metodologias robustas de análise, como o estudo feito para a Refinaria de Sines [36]. Já para o caso da Repsol Polímeros [35], foi feito um estudo envolvendo emissores de hidrogénio em reatores de polimerização, medição das áreas classificadas e seleção de equipamento elétrico e não elétrico. Isto reduziu os riscos de explosão, preservando a integridade dos trabalhadores e da indústria.

Outro aspecto relevante é a análise das causas de acidentes, como ignições devido a descargas eletrostáticas ou falhas mecânicas [37]. A aplicação da norma EN 60079-10-1 auxilia na definição da classificação das áreas e no redimensionamento das medidas preventivas. Além disso, a aplicação de metodologias de gestão de risco, como a Norma Portuguesa baseada na ISO (NP ISO) 31000 e a EN 31010, possibilita uma abordagem sistemática e efetiva para identificação, avaliação e mitigação do risco [35].

Mais uma vez, como já referido antes, embora avanços tenham sido feitos, de-

safios ainda persistem, como a consciencialização limitada em pequenas e médias empresas e os custos elevados de conformidade [7]. A integração destas diretrizes nas políticas de segurança mais amplas é, no entanto, um fator crucial para a melhoria da segurança industrial.

2.3.1 Acidentes na Indústria

Os acidentes de Flixborough, 1974, e Seveso, 1976, representam dois acontecimentos cruciais na segurança industrial e sublinham o que pode correr mal quando o sistema de gestão de risco falha. Ambos os desastres demonstraram a extensão da vulnerabilidade de segurança existente e desempenharam um importante papel na subsequente implementação de regulamentos, como as Diretivas ATEX [35].

Apesar da natureza em que os acidentes ocorreram, as causas de fundo são semelhantes em termos de ausência de procedimentos estruturados e negligência dos projetistas.

No caso de Flixborough, uma falha de um tubo temporário de interligação não foi completamente analisada quanto ao seu desempenho, resultando na falha inesperada deste tubo, que transportava ciclohexano sob alta pressão e temperaturas altas, libertando 30 toneladas desta substância inflamável [38]. Esta falha culminou numa explosão de magnitude equivalente a até 45 toneladas de Trinitrotolueno (TNT), expondo a gravidade dos riscos associados à falta de uma gestão de riscos eficiente [39].



Figura 2.10: Destruição causada pelo acidente, Flixborough 1974.

Já no caso de Seveso, uma reação exotérmica ocorreu num reator químico, o que levou à libertação de dioxina, substância altamente tóxica [40]. A falta de monitorização, instrumentação e barreiras de contenção desempenhou um papel crucial no desastre. Este evento deixou clara a necessidade de efetuar avaliações detalhadas e proteções projetadas contra cenários catastróficos [41].

As consequências de Flixborough e Seveso foram devastadoras, tanto em termos humanos como materiais e ambientais.

A explosão em Flixborough resultou em 28 mortes, mais de 80 feridos e danos extensivos à infraestrutura local [39]. O incidente impactou a vizinhança próxima e causou danos à área circundante, à empresa em questão e também à comunidade em que estava inserida [38]. A tragédia destacou a importância de projetos seguros e de sistemas de proteção robustos.



Figura 2.11: Grande mobilização das Autoridades Sanitárias, Seveso 1976.

Em Seveso, a liberação de dioxina contaminou uma área densamente povoada até 6 km além do ponto do acidente, forçando a evacuação de centenas de pessoas e deixando impactos de longo prazo na saúde pública e ambiental [40]. A falta de transparência inicial e a resposta descoordenada dos serviços de emergência agravaram ainda mais a situação, gerando desconfiança e perdas económicas significativas [41].

Estes acidentes não apenas resultaram em tragédias locais, mas também impulsionaram mudanças globais na forma como os riscos industriais são avaliados e gerenciados.

Os desastres de Flixborough e Seveso catalisaram mudanças significativas nas regulamentações de segurança industrial, moldando o cenário legislativo europeu.

Após Flixborough, foi enfatizada a necessidade de abordagens estruturadas para a gestão de riscos, incluindo o Estudo de Perigos e Operabilidade (*Hazard and Operability Study*) (HAZOP) [39]. Este evento também contribuiu para a formulação de normas específicas para o manuseamento de substâncias perigosas no Reino Unido, que influenciaram diretamente regulamentações europeias subsequentes [38].

Por outro lado, Seveso resultou na criação da Diretiva Seveso (82/501/CEE), que estabeleceu requisitos para a identificação de cenários de risco, planos de emergência e comunicação com comunidades afetadas [42]. A Diretiva Seveso influenciou diretamente o desenvolvimento das Diretivas ATEX, que abordam a classificação de zonas perigosas e o uso de equipamentos certificados em atmosferas explosivas [41].

As lições aprendidas com esses eventos continuam a guiar a segurança industrial moderna. A aplicação das Diretivas ATEX e Seveso tem promovido a redução de acidentes, incentivado o avanço tecnológico em dispositivos de segurança e reforçado a importância de uma abordagem integrada para a mitigação de riscos.

2.4 Hidrogénio na Indústria Química

A integração do hidrogénio como vetor energético é vista como a estratégia principal para descarbonização dos setores energéticos. A sua simplicidade estrutural, composta por um próton e um eletrão, confere-lhe propriedades únicas, tornando-o

fundamental em diversas aplicações industriais e energéticas [43]. Além disso, a sua versatilidade química e física coloca-o como um dos principais candidatos à substituição de combustíveis fósseis na transição energética. No entanto, é deveras importante continuar o forte investimento em Investigação e Desenvolvimento (I&D), de modo a se conseguir superar os obstáculos técnicos, como a falta de infraestruturas, associadas ao seu uso generalizado.

2.4.1 Propriedades do Hidrogénio

Fisicamente, o hidrogénio distingue-se por ser o elemento mais leve da tabela periódica, com uma densidade de apenas $0,08967 \text{ kg/m}^3$ em condições normais de temperatura e pressão [43]. Esta densidade extremamente baixa, embora desafiante para o armazenamento, é uma vantagem significativa em aplicações onde o peso é crítico, como em programas espaciais [43]. Do ponto de vista energético, o hidrogénio apresenta o maior poder calorífico específico entre todos os combustíveis, com $141,86 \text{ kJ/g}$ no Poder Calorífico Superior (PCS), e um Poder Calorífico Inferior (PCI) com $119,93 \text{ kJ/g}$ [44]. Este valor é aproximadamente 2,5 vezes maior do que o da gasolina ou do gasóleo, o que reforça o seu potencial como combustível de elevado desempenho energético [44].

Além das propriedades físicas e energéticas, o hidrogénio apresenta uma elevada reatividade química. A sua ampla faixa de inflamabilidade, entre 4% e 75% em volume, combinada com uma energia de ignição extremamente baixa de cerca de $0,018 \text{ mJ}$, torna-o altamente inflamável [43, 4]. Embora esta característica exija precauções rigorosas no seu manuseamento, é também a base do seu elevado rendimento energético. A combustão do hidrogénio produz exclusivamente vapor de água, destacando-se pela ausência de emissões poluentes, como dióxido de carbono, óxidos de enxofre ou partículas finas [43].

O hidrogénio possui três isótopos naturais (figura 2.12): prótio (^1H), deutério (^2H) e trítio (^3H). O prótio, o mais abundante, é essencial em reações químicas e processos industriais. O deutério, devido à sua maior massa, é utilizado em aplicações nucleares e como marcador em estudos isotópicos. O trítio, por sua vez, é radioativo e encontra aplicações em iluminação de baixa intensidade e na investigação de fusão nuclear. Estes isótopos ampliam a gama de utilizações do hidrogénio, reforçando a sua relevância tecnológica [43].

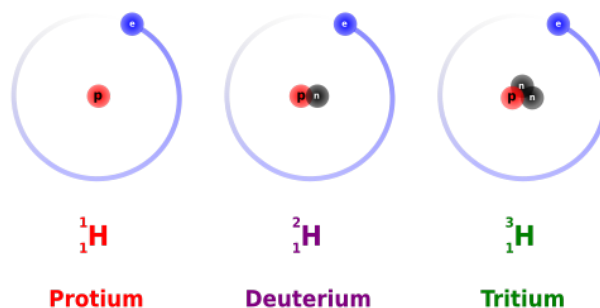


Figura 2.12: Isótopos do Hidrogénio

O armazenamento e transporte de hidrogénio representam desafios significativos devido às suas propriedades físicas. Em estado gasoso, o hidrogénio é frequen-

temente armazenado em tanques de alta pressão, enquanto que na forma líquida requer temperaturas criogénicas de -253°C [43]. Alternativamente, pode ser armazenado quimicamente em hidretos metálicos ou compostos líquidos. Apesar destas tecnologias apresentarem determinadas vantagens, enfrentam limitações relacionadas com custos, eficiência energética e densidade volumétrica [43].

Já contexto energético, considera-se o hidrogénio como um vetor energético promissor. Nas pilhas de combustível, reage com oxigénio para gerar eletricidade, calor e vapor de água, sem emissões nocivas [43, 44]. Esta tecnologia é amplamente utilizada em Veículos Elétricos a Célula de Combustível (*Fuel Cell Electric Vehicles*) (FCEVs) e em aplicações estacionárias, como sistemas de backup de energia [45]. Para além disso, o hidrogénio pode-se misturar com alguns combustíveis fósseis, de forma a reduzir as emissões de carbono, ou pode até ser convertido em combustíveis sintéticos, mostrando bem a sua versatilidade [43].

Relativamente à determinação das zonas ATEX, o hidrogénio destaca-se por apresentar propriedades que exigem uma atenção rigorosa, sendo elas [4]:

- **Limite Inferior de Inflamabilidade (LFL):** 4,0% em volume de combustível, indicando que mesmo em concentrações muito baixas, o hidrogénio pode formar misturas inflamáveis;
- **Limite Superior de Inflamabilidade (UFL):** 75,0% em volume de combustível, refletindo a ampla faixa de inflamabilidade deste gás;
- **Ponto de Fulgor:** O hidrogénio não possui um ponto de fulgor definido devido à sua natureza altamente volátil;
- **Concentração Limite de Oxigénio (LOC):** 5,0% em volume de oxigénio, um dos valores mais baixos entre os combustíveis analisados, indicando que requer muito pouco oxigénio para sustentar a combustão;
- **Temperatura de Autoignição (AIT):** 400°C , relativamente baixa, o que significa que o hidrogénio pode inflamar-se espontaneamente em superfícies quentes sem necessidade de uma fonte de ignição externa.

Estes valores reforçam que o hidrogénio, apesar de combinar propriedades físicas, químicas e energéticas que o tornam indispensável na transição para uma economia verde, é um dos gases mais críticos e que envolve mais desafios no que torna à classificação das respetivas zonas ATEX.

2.4.2 Purificação do Hidrogénio

A crescente procura por hidrogénio puro, aliada à necessidade de obter processos energeticamente eficientes e sustentáveis para o meio ambiente, impulsionaram o desenvolvimento de tecnologias para separação e purificação do hidrogénio. Este apresenta-se como uma fonte de energia renovável, capaz de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, promover a diversificação energética e minimizar a poluição sonora [46].

Porém, a nível industrial, a produção de hidrogénio acaba por resultar em misturas gasosas, misturas que, à partida, contêm impurezas como o dióxido de carbono

(CO₂), o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄) e o nitrogénio (N₂), o que torna a aplicação de técnicas de separação um processo imprescindível, no que toca à obtenção de hidrogénio puro. [46]

Neste contexto, o enquadramento ATEX desempenha um papel fundamental na avaliação e mitigação dos riscos associados à presença de hidrogénio em atmosferas potencialmente explosivas. Após uma análise à literatura disponível sobre este tema, chega-se à conclusão que, embora não exista uma emissão de poluentes específica associada a cada processo, os principais riscos decorrem de possíveis falhas mecânicas nos processos de separação e purificação.

Vacuum Pressure Swing Adsorption - VPSA

A tecnologia de *Vacuum Pressure Swing Adsorption* (VPSA) baseia-se na ligação química de um gás a um adsorvente sólido. A força de ligação entre a molécula de um gás e o material adsorvente depende do tipo de gás, do material adsorvente, e principalmente, da pressão a que se encontra o gás e da temperatura a que se dá a operação [47]. O processo de VPSA tem sido considerado uma alternativa viável para a separação de misturas gasosas provenientes de processos como o *reforming* de metano, devido à sua capacidade de operar em condições de pressão moderada e com ciclos de operação rápidos [47, 6]. A utilização de ciclos de adsorção e dessorção, implementados em regimes de pressão alternada, permite a obtenção de correntes de hidrogénio altamente puro (>99.99%), com uma taxa de recuperação de aproximadamente 86% [48], atendendo às exigências de processos industriais modernos [49]. Na figura 2.13 está representado um sistema VPSA em contexto de laboratório.

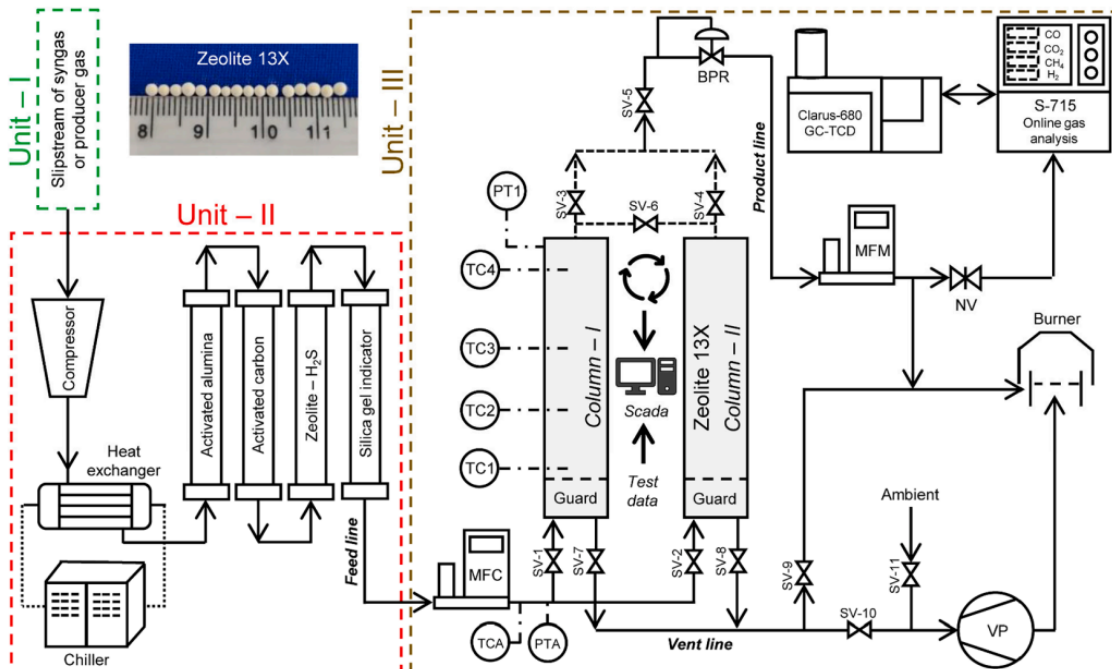


Figura 2.13: Esquema de um sistema VPSA [6].

O processo de VPSA opera a dois níveis diferentes de pressão: a adsorção ocorre a pressão alta, normalmente entre 10 e 40 bars, de forma a maximizar a captura de impurezas, enquanto que a regeneração do material adsorvente é feita com recurso

ao vácuo [47]. Distinguindo-se de outros métodos de purificação, o VPSA funciona essencialmente a temperatura constante, visto que a regeneração ocorre sem necessidade de aquecimento, resultando assim num ciclo de curta duração, na faixa dos minutos, e numa longa vida útil do material adsorvente. [47]

Já o *Rapid Vacuum Pressure Swing Adsorption* (RVPSA) é a evolução do convencional VPSA, onde o tempo de operação passa para a faixa dos segundos, podendo assim aumentar a produtividade do processo de purificação do hidrogénio e reduzir o tamanho dos equipamentos, sem comprometer a pureza final. Porém, são impostos alguns desafios a este processo inovador, tais como o aumento significativo do consumo energético e o rápido desgaste dos componentes mecânicos [47].

As etapas fundamentais deste sistema operacional são [47]:

- **Adsorção** - O gás de alimentação entra em contacto com o leito dos adsorventes, onde as impurezas como água, dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves são retidas seletivamente, sendo possível obter uma corrente de hidrogénio puro no topo das colunas;
- **Regeneração** - Estando o adsorvente saturado, a pressão é reduzida a vácuo, de forma a libertar as impurezas retidas;
- **Equalização da Pressão** - De forma a economizar energia, bem como recuperar o máximo de hidrogénio retido nas colunas de adsorção, antes da etapa de regeneração, parte do gás de uma coluna em regeneração é usada para pressurizar de forma parcial outra coluna, reduzindo a necessidade de compressão.

A seleção de adsorventes apropriados é determinante para a eficácia da purificação, sendo os mais comuns os zeólitos (4A, 5A, 13X) e o carvão ativado (AC5-KS) modificados, que apresentam alta área superficial e distribuição de poros otimizada para a adsorção seletiva de contaminantes como CO₂, CO, CH₄ e N₂ [6, 47]. Os materiais adsorventes são frequentemente caracterizados por curvas isotérmicas de adsorção e de rutura (*breakthrough*), os quais possibilitam a identificação dos parâmetros de equilíbrio e cinéticos relevantes para o processo [49]. Exemplos destas curvas encontram-se representados na figura 2.14, onde se pode observar um curva exemplo deste processo, e na figura 2.15, onde se pode observar o efeito que dois adsorventes distintos têm na adsorção de componentes indesejados, sendo neste caso o CO₂.

Falhas Mecânicas Associadas

O processo *Vacuum Pressure Swing Adsorption* (VPSA) de purificação de hidrogénio envolve ciclos frequentes de pressurização e despressurização até vácuo, impondo tensões mecânicas alternadas nos tanques de armazenamento, colunas de adsorção e tubagens [52]. Esta operação cíclica gera danos por fadiga acumulada que podem originar fissuras microscópicas nas paredes dos equipamentos ao longo do tempo [52]. A situação é agravada pelo efeito da fragilização por hidrogénio: o hidrogénio difunde-se nos metais e reduz a ductilidade do material, diminuindo a tensão necessária para formação de fissuras e provocando fratura ou falha prematura sob carga [53]. Estudos de integridade estrutural em unidades PSA evidenciam este fenómeno, tendo sido identificadas centenas de micro-fissuras induzidas por hidrogénio em soldaduras de múltiplos vasos de adsorção, mesmo com materiais adequados e serviço

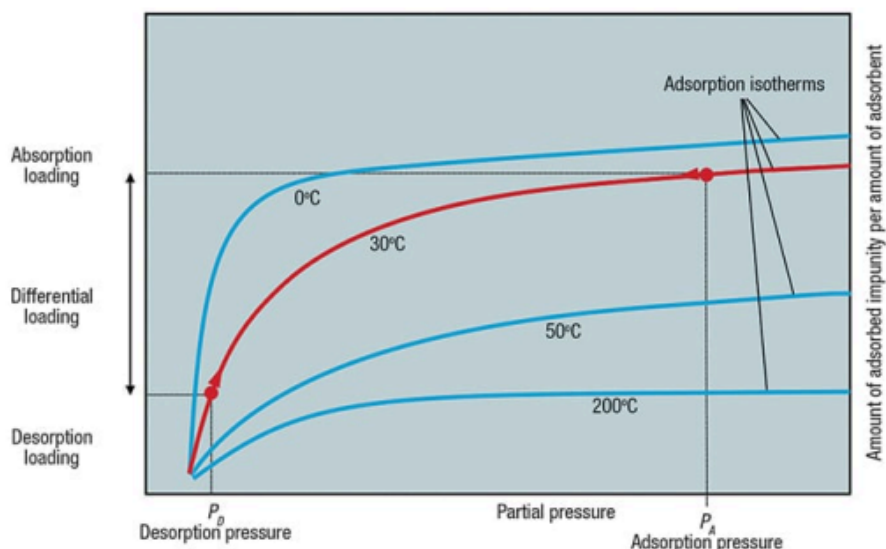


Figura 2.14: Isotérmica de Adsorção (Capacidade de Adsorção em função da Pressão Parcial do Componente [50].

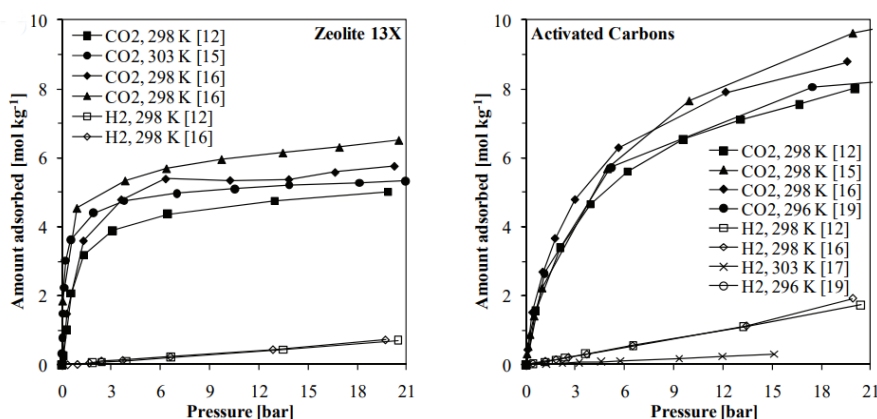


Figura 2.15: Isotérmicas de Adsorção do Hidrogénio e do Dióxido de Carbono em Zeólitos 13X (à esquerda) e em Carvão Ativado (à direita) [51].

dentro do esperado [54]. Tais fissuras são típicas de danos provocados por hidrogénio e podem propagar-se se não forem detetadas e reparadas, comprometendo a contenção do gás.

Além das fissuras estruturais, ocorrem falhas mecânicas em componentes móveis e vedantes devido ao serviço cíclico e ao vácuo. Os vedantes (juntas, *O-rings*, selos) degradam-se com as variações rápidas de pressão, perdendo elasticidade e eficácia de vedagem. Por exemplo, vedantes de atuadores pneumáticos (selos de pistão ou de diafragma) tendem a desgastar-se sob ciclos frequentes, tornando os atuadores menos responsivos e diminuindo a precisão de controlo das válvulas [55]. As próprias válvulas, sujeitas a centenas de milhares de atuações anuais, sofrem desgaste acelerado em componentes internos: as sedes, guias e rolamentos exibem erosão e fadiga, degradando a capacidade de fecho estanque [55]. Um modo de falha comum é a fuga de hidrogénio pela haste da válvula devido ao desgaste ou falha da gaxeta de vedação, o que provoca perda de gás purificado e emissões fugitivas preocupantes [55]. As tubagens e conexões também podem falhar por vibrações e tensões cíclicas,

levando ao enfraquecimento de juntas ou aparecimento de fissuras em soldaduras, especialmente se os materiais estiverem sujeitos a fragilização pelo hidrogénio [53]. Fenómenos de corrosão podem manifestar-se caso entrem impurezas como humidade ou sulforetos no sistema, acelerando a deterioração de superfícies metálicas internas.

Todas estas falhas mecânicas assumem especial criticidade num ambiente com hidrogénio devido ao seu potencial explosivo. O enquadramento de segurança IEC 60079 (atmosferas explosivas) exige que os equipamentos em zonas com hidrogénio (gás do grupo IIC) sejam concebidos para prevenir fontes de ignição e conter adequadamente o gás [56]. Na prática, isto implica a utilização de componentes com proteção *Ex* e a manutenção de sistemas fechados e vedados, de forma a evitar fugas de hidrogénio para o ambiente [56].

2.4.3 Hidrogénio em Portugal

O hidrogénio apresenta-se como um vetor energético estratégico para a transição energética em Portugal, alinhado com os objetivos de descarbonização definidos pela União Europeia. Este capítulo explora a situação atual e as iniciativas em curso para o desenvolvimento do mercado de hidrogénio no país, com ênfase na Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2) e outras políticas associadas [57].

Portugal encontra-se numa posição vantajosa para o desenvolvimento do hidrogénio verde devido à sua elevada capacidade de geração de energia renovável. A EN-H2, aprovada em 2020, delinea os principais objetivos e metas para a integração deste vetor energético no contexto energético nacional [57].

Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)

A EN-H2 foi elaborada como um instrumento de política energética para fomentar o desenvolvimento do mercado de hidrogénio verde em Portugal [57]. Esta estratégia tem como metas principais: substituir combustíveis fósseis por hidrogénio em setores de alta intensidade de carbono, como a indústria química e o setor dos transportes; promover a produção de hidrogénio a partir de eletrólise da água, utilizando eletricidade proveniente de fontes como energia solar e eólica; estimular a criação de empregos e a inovação tecnológica em setores relacionados com o hidrogénio; e tornar Portugal um fornecedor relevante de hidrogénio verde para mercados internacionais, aproveitando a sua localização geográfica privilegiada e a infraestrutura portuária existente [57].

A EN-H2 destaca a necessidade de colaboração entre o setor público e privado para a criação de um ecossistema favorável ao desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogénio.

Projetos e Iniciativas em Curso

Portugal tem implementado várias iniciativas no âmbito do hidrogénio verde, destacando-se:

- **Projeto de Hidrogénio Verde em Sines:** Um dos maiores projetos de hidrogénio na Europa, que visa a produção de hidrogénio verde em larga escala para consumo interno e exportação [57]. Esta refinaria encontra-se representada na figura 2.16.



Figura 2.16: Refinaria da Galp, em Sines, futuro projeto para a produção de hidrogénio a nível nacional.

- **Infraestruturas de Transporte e Armazenamento:** Investimentos na adaptação da infraestrutura existente, como gasodutos, para o transporte de hidrogénio [58].
- **Parcerias Internacionais:** Colaboração com outros países europeus para a criação de corredores de hidrogénio e mercados integrados [57].

2.5 Mecânica dos Fluidos Computacional - Introdução e Evolução Histórica

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluids Dynamics*) (CFD) consiste no uso de métodos numéricos e computacionais para resolver as equações que governam o escoamento de fluidos. Embora as equações fundamentais (como as equações de Euler de 1757 e Navier-Stokes do século XIX) já fossem conhecidas, foi apenas com o desenvolvimento do computador eletrônico em meados do século XX que a CFD nasceu e se disseminou como disciplina prática [59].

Um marco precursor foi o trabalho visionário de Lewis F. Richardson, que em 1910 tentou resolver equações diferenciais de escoamento por diferenças finitas manualmente [60]. Contudo, as primeiras simulações numéricas viáveis surgiram por volta dos anos 1950: por exemplo, M. Kawaguti (1953) conseguiu obter a solução numérica do escoamento em torno de um cilindro a número de Reynolds 40, realizando cálculos intensivos — então em grande parte manuais — ao longo de semanas [61].

Com o surgimento dos computadores digitais, duas figuras destacaram-se como pioneiros da CFD: Francis H. Harlow, no Laboratório de Los Alamos (EUA), e D. Brian Spalding, no Imperial College de Londres. No primeiro caso, Harlow e colaboradores desenvolveram métodos inovadores para fluidos, incluindo o método Marker-and-Cell (MAC), em 1965, para tratar superfícies livres. Em paralelo, o grupo de Spalding introduziu o método dos volumes finitos e os primeiros modelos práticos de turbulência, como o modelo $k-\varepsilon$, introduzido no início dos anos 1970 [62].

A partir dos anos 1970, com o aumento do poder computacional, os primeiros códigos foram aplicados a problemas reais de engenharia. Nos anos 1980, supercomputadores viabilizaram a solução das equações completas de Navier-Stokes para geometrias complexas. Um exemplo emblemático foi o projeto Time-accurate Navier-Stokes (TNS) da NASA, cujo objetivo era simular todo o fluxo em torno de um caça F-16 — desafio considerado extremo à época [63].

Na década de 1990, as metas evoluíram para simulações não estacionárias e multifísicas, suportadas por processadores mais rápidos e arquiteturas paralelas. Simultaneamente, surgiram códigos comerciais generalistas como o *PHOENICS* e o *ANSYS Fluent*, ou não comerciais, como o *OpenFOAM*, que permitiram popularizar a CFD em diversos setores da engenharia.

Atualmente, após mais de meio século de desenvolvimento, a CFD tornou-se uma ferramenta onnipresente. Para além das tradicionais aplicações aeroespaciais e automotivas, abrange hoje campos como biomecânica, indústria alimentar, segurança contra incêndios, eficiência energética e conforto térmico em edifícios (AVAC), entre outros [59, 64].

Em particular, nas áreas de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) e segurança em ambientes ATEX (atmosferas explosivas), a CFD desempenha um papel importante no projeto e avaliação de soluções, como será discutido nas seções seguintes.

Apesar dos avanços, alguns desafios persistem: para certos fenômenos complexos, ainda falta compreensão física ou modelos matemáticos plenamente adequados. Além disso, ferramentas CFD exigem normalmente elevada capacidade computacional e conhecimento especializado, e as suas previsões devem ser validadas com dados experimentais sempre que possível [59]. Ainda assim, os contínuos progressos em modelos de turbulência, técnicas híbridas e abordagens assistidas por *machine*

learning sinalizam uma evolução permanente da CFD como disciplina científica e tecnológica.

2.5.1 Métodos Numéricos Fundamentais

A resolução computacional de escoamentos envolve a discretização das equações governantes — geralmente as equações de Navier-Stokes, de continuidade e energia — num domínio espacial e temporal finito. Vários métodos numéricos foram desenvolvidos ao longo das décadas, destacando-se as abordagens de diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. A seguir, apresentam-se os fundamentos e particularidades de cada um.

Diferenças Finitas

O Método das Diferenças Finitas (FDM) foi um dos primeiros a ser utilizado na CFD. Baseia-se na aproximação das derivadas parciais por diferenças entre valores de função em pontos discretos de uma malha. Derivadas de primeiras e de segundas são substituídas por esquemas de diferenças progressivas, retroativas ou centradas [60, 61].

Apesar da sua simplicidade, o FDM apresenta limitações na aplicação a geometrias complexas, pois requer malhas estruturadas. Ainda assim, continua a ser utilizado em códigos meteorológicos e em estudos que envolvem domínios retangulares regulares e alta resolução.

Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos (FVM) é o mais amplamente utilizado na indústria. Neste método, o domínio é dividido em volumes de controlo, e as equações de conservação são integradas sobre cada volume. Com base no teorema da divergência, os fluxos de massa, momento e energia são calculados nas faces dos volumes, assegurando a conservação local [59, 64].

A sua principal vantagem reside na garantia de conservação numérica e na capacidade de lidar com malhas não estruturadas, o que o torna ideal para geometrias industriais. É o método base em pacotes comerciais como *ANSYS Fluent* e o *OpenFOAM*.

Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é amplamente usado em engenharia estrutural, tendo sido posteriormente adaptado para a dinâmica dos fluidos. Baseia-se em formulações variacionais, onde as equações diferenciais são multiplicadas por funções de peso e integradas, utilizando-se funções de forma para interpolação dentro de cada elemento [59].

O FEM é particularmente eficaz em escoamentos incompressíveis e domínios com malhas não estruturadas. Contudo, apresenta desafios na conservação local de propriedades físicas, o que limita a sua aplicação em escoamentos compressíveis ou com choques.

Modelos de Turbulência e Métodos Alternativos

Entre os métodos alternativos destaca-se o Método Lattice Boltzmann (LBM), uma abordagem mesoscópica baseada na equação de Boltzmann. O LBM tem sido utilizado em escoamentos com geometria complexa, incluindo meios porosos, devido à sua facilidade de implementação e paralelização [65].

A modelação da turbulência é parte integrante da CFD. Três abordagens principais coexistem:

- **Direct Numerical Simulation (DNS)** — resolve todas as escalas do escoamento, mas é computacionalmente viável apenas para números de Reynolds baixos.
- **Large Eddy Simulation (LES)** — resolve grandes estruturas turbulentas e modela as pequenas. É usada em contextos onde a fidelidade da simulação transiente é importante.
- **Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)** — modelo mais comum na engenharia, em que toda a turbulência é modelada estatisticamente por modelos de aproximação como o $k-\varepsilon$ [62].

Modelos híbridos RANS-LES, bem como abordagens assistidas por inteligência artificial, têm vindo a ganhar relevância nas últimas décadas, com o objetivo de combinar precisão e eficiência computacional em contextos industriais reais [59].

2.5.2 Aplicações da CFD em Ambientes ATEX

Em ambientes industriais onde ocorre o uso e o processamento de gases inflamáveis, a formação de atmosferas explosivas representa um risco significativo. A norma **IEC 60079-10-1** [9] fornece critérios para a classificação de zonas perigosas (Zonas 0, 1 e 2) com base na frequência e duração da presença de misturas inflamáveis. Contudo, os métodos prescritos assumem frequentemente geometrias simplificadas, ventilação uniforme e ausência de obstruções [9].

Neste contexto, a CFD surge como ferramenta complementar valiosa, permitindo simular a dispersão tridimensional de gases inflamáveis com elevado grau de realismo. Através da resolução das equações de Navier-Stokes acopladas a equações de transporte de espécies e modelos de turbulência, é possível estimar diretamente o volume e a extensão das regiões onde a concentração do gás excede o Limite Inferior de Inflamabilidade (LFL).

Um dos estudos de referência nesta área é o de Carcassi e Frosina [66], que compararam os resultados da norma **IEC 60079-10-1** [9] com simulações CFD realizadas com o software *FLACS*. Em um caso com caudal de fuga de 1 g/s de gás neutro em uma sala cúbica de 4 m, ventilada a 18 renovações/hora, a CFD indicou que a ventilação necessária para manter a concentração abaixo do LFL era 116 vezes inferior à exigida pela norma (edição de 2008) e 38 vezes inferior na edição de 2015 [66].

Outro exemplo relevante é o estudo de Souza *et al.* [67], no qual o software *ANSYS CFX* foi utilizado para simular 100 cenários distintos de uma fuga de metano em condições variáveis (diâmetro do orifício entre 0,1–2,5 mm; pressão entre 0,1–12 MPa; temperatura de 0–400 °C). As simulações revelaram que o diâmetro

da fuga é o parâmetro mais influente na extensão da zona explosiva, seguido pela pressão do reservatório. Constatou-se ainda que, em fugas consideradas sônicas, o impulso inicial do jato reduz a influência da gravidade, contrariando a expectativa de estratificação por fluotabilidade [67].

Estes estudos reforçam a importância da CFD como apoio técnico na delimitação de zonas perigosas. Ferramentas como *FLACS*, *ANSYS Fluent* e *OpenFOAM*, configuradas com modelos adequados de turbulência e transporte de espécies, permitem representar a geometria real da instalação, a localização precisa das fugas e o efeito de barreiras ou ventilação forçada.

3 Desenvolvimento

Neste capítulo, procede-se primeiramente à exposição do desenvolvimento do estágio curricular realizado na SODECA Portugal. Segue-se a apresentação do caso de estudo proposto pela SYSADVANCE, bem como a análise e o dimensionamento técnico das soluções de ventilação associadas. As propostas desenvolvidas serão posteriormente representadas em ambiente CAD e validadas por meio de simulações numéricas recorrendo a software de CFD.

3.1 Desenvolvimento do Estágio

3.1.1 Contexto Profissional

O estágio curricular teve início com uma fase de integração na SODECA Portugal, acompanhada por formação intensiva nas ferramentas *SODECA QuickFan Selector* (Figura 3.1) e *Microsoft Dynamics AX* (Figura 3.2). O primeiro é um software de apoio ao dimensionamento e seleção de ventiladores, principalmente com base em requisitos de caudal e perda de carga, possibilitando também a cotação de acessórios complementares como interruptores de corte ou potenciômetros. Já o *Microsoft Dynamics AX* é uma plataforma de *Enterprise Resource Planning (ERP)* utilizada para a gestão de cotações, encomendas e clientes, sendo essencial para a formalização das propostas comerciais.



Figura 3.1: Logótipo QuickFan SO-DECA Selector.



Figura 3.2: Logótipo Microsoft Dynamics AX.

As primeiras atividades consistiram na análise e interpretação de cadernos de encargo, mapas de quantidades e desenhos técnicos — maioritariamente em formatos como PDF e o Excel, mas também em formatos destinados ao AutoCAD ou DraftSight, principalmente para os desenhos técnicos — com o objetivo de extrair as informações técnicas relevantes. Posteriormente, foi realizada a correspondência entre os equipamentos especificados e os produtos comercializados pela empresa, garantindo compatibilidade técnica e conformidade normativa. Este processo culminava com a elaboração de propostas comerciais personalizadas, alinhadas com os requisitos técnicos e constrangimentos orçamentais dos clientes.

Paralelamente, foram conduzidos testes elétricos e potenciométricos a unidades *EC CONTROL*, com o objetivo de avaliar o impacto das atualizações de firmware no desempenho e estabilidade dos equipamentos. Neste âmbito, destaca-se a visita a três habitações multifamiliares:

- Habitação multifamiliar na Maia – Ventiladores centrífugos em caixa com motor EC, equipados com unidade *EC CONTROL*, instalados na cobertura, destinados à compensação de hottes de cozinha;
- Habitação multifamiliar em Leça do Balio – Ventiladores *In-Line* centrífugos em caixa, com motor EC e unidade *EC CONTROL*, instalados no piso -2, destinados à pressurização da caixa de escadas;
- Habitação multifamiliar em Guimarães – Ventiladores *In-Line* centrífugos em caixa, com motor EC e unidade *EC CONTROL*, instalados na cobertura, destinados à compensação de hottes de cozinha.

Noutra visita técnica relevante, foi analisado um sistema de controlo de fumo num túnel localizado em Braga, composto essencialmente por ventiladores de impulso.

No domínio da formação contínua, participaram-se em diversas iniciativas relevantes, incluindo a presença nas feiras **CONCRETA 2024** e **EMAF 2025**, e a representação da SODECA Portugal na **Feira de Emprego das IV Jornadas de Engenharia Mecânica**, organizadas núcleo de estudantes de engenharia mecânica do mesmo instituto. Foram ainda frequentadas formações presenciais sobre sistemas de desenfumagem, conduzidas por técnicos da SODECA Portugal.

Complementarmente, frequentaram-se as seguintes formações online promovidas pela SODECA SLU:

- 29 outubro 2024 – *Ventilation Systems in Chemical Product Warehouses*;
- 19 novembro 2024 – *Ventilation Solutions for Radon Gas Mitigation*;
- 12 fevereiro 2025 – *New In-Line Ventilation for Rectangular Ducts*;
- 1 abril 2025 – *Ventilation System in LEED, BREAM, and WELL Certifications*;
- 3 abril 2025 – *Efficient Solutions for Homes*;
- 29 abril 2025 – Unidades de Tratamento de Ar – DECACLIMA.

Finalmente, destaca-se a participação no jantar comemorativo dos **40 anos da SODECA Portugal**, evento de cariz profissional que proporcionou uma oportunidade privilegiada para o reforço de relações interpessoais e networking com entidades do setor. Estiveram presentes fornecedores internacionais, clientes, projetistas, representantes do meio académico, membros da Ordem dos Engenheiros - Região Norte (OERN) e associações setoriais de referência como a Associação Portuguesa da Indústria da Refrigeração e Ar Condicionado (APIRAC), Associação Portuguesa dos Engenheiros de Frio Industrial e Ar Condicionado (EFRIARC), *American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*, Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Associação Portuguesa da Segurança (APSEI) e a Associação Empresarial de Portugal (AEP).

3.1.2 Contexto Académico

O desenvolvimento do trabalho académico iniciou-se com uma fase de pesquisa e levantamento bibliográfico, centrada na compreensão das atmosferas potencialmente explosivas (ATEX) e na caracterização do hidrogénio enquanto gás inflamável. Este esforço contemplou a análise de literatura científica e normativa, com especial foco na norma **IEC 60079-10-1** [9], que estabelece os critérios técnicos para a classificação de zonas perigosas em função da presença de substâncias inflamáveis e da eficácia dos sistemas de ventilação.

Paralelamente, foram procuradas publicações que relacionassem a ventilação industrial com a dispersão de hidrogénio em ambientes confinados, incluindo abordagens ao nível do cálculo de risco, dimensionamento de ventilação e análise da eficácia de soluções de mitigação. Este enquadramento teórico permitiu consolidar uma base técnica que sustentasse as etapas subsequentes do trabalho.

Numa segunda fase, foi promovido o contacto com várias empresas do setor energético e industrial com o intuito de obter documentação técnica referente a instalações que utilizam o hidrogénio em processos como produção, armazenamento ou purificação. A seleção de um caso de estudo concreto, fornecido pela SYSADVANCE, viabilizou a transição da análise normativa e científica para o desenvolvimento prático de soluções de ventilação mecânica compatíveis com a classificação ATEX.

Com o caso de estudo definido e a documentação técnica analisada, procedeu-se à atualização da revisão bibliográfica inicial, de modo a assegurar a sua coerência com o processo específico de purificação de hidrogénio por VPSA, ao mesmo tempo que se aplicaram os métodos de cálculo da norma **IEC 60079-10-1** [9], incluindo a determinação da taxa de fuga, pressão crítica, caudal característico de ventilação, concentração de fundo e extensão da zona de risco.

A partir destes resultados, foram projetadas duas abordagens distintas: uma baseada em ventilação natural, utilizando grelhas de admissão e exaustão estrategicamente posicionadas, e outra baseada em ventilação mecânica, envolvendo o dimensionamento e seleção de ventiladores certificados para atmosferas explosivas, bem como os respetivos acessórios. Em ambas as soluções foram respeitados os critérios normativos de diluição e as condicionantes geométricas do contentor técnico, permitindo avaliar o desempenho teórico das alternativas propostas.

As soluções de ventilação mecânica foram posteriormente modeladas em ambiente CAD com recurso ao software *SolidWorks*, possibilitando a construção de uma geometria tridimensional detalhada da instalação. Este modelo foi, então, exportado para o *ANSYS Fluent*, onde foi realizada a simulação do escoamento interno e da dispersão do hidrogénio, utilizando métodos de dinâmica de fluidos computacional (CFD).

As simulações permitiram visualizar os padrões de escoamento, identificar zonas de recirculação e avaliar o tempo necessário para atingir uma concentração segura após uma libertação de gás. Este processo de validação numérica foi essencial para confirmar a eficácia das soluções de ventilação desenvolvidas, assegurando a con-

formidade com os critérios estabelecidos na **IEC 60079-10-1** [9] e reforçando a aplicabilidade prática do modelo de dimensionamento proposto.

A evolução cronológica das atividades académicas foi organizada de forma estruturada, conforme representado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Cronograma de Trabalhos.

Nº	Período	Descrição da Tarefa
1	07 outubro – 01 novembro	Formação e integração na empresa; formação nos softwares QuickFan e Microsoft Dynamics AX; ambientação ao contexto técnico-comercial.
2	01 novembro – 10 janeiro	Enquadramento teórico, estudo das normas ATEX e IEC 60079, e revisão bibliográfica para elaboração do relatório METIP.
3	10 janeiro – 24 fevereiro	Definição do desenvolvimento técnico; procura ativa de empresas colaboradoras e planeamento da solução.
4	24 fevereiro – 02 maio	Desenvolvimento técnico da solução: cálculos de ventilação, dimensionamento de zonas, classificação de risco segundo a norma IEC 60079-10-1.
5	02 maio – 15 julho	Modelação tridimensional em SolidWorks e simulações CFD em ANSYS Fluent para validação da solução proposta.
6	15 julho agosto – 20 agosto	Apresentação e validação dos resultados, comparação técnica entre soluções e conclusões
7	20 agosto – 14 setembro	Revisão técnica e formal da dissertação; correções finais e preparação da submissão.

3.2 Apresentação do Caso de Estudo

O caso de estudo corresponde a um sistema industrial de purificação de hidrogénio baseado na tecnologia *Vacuum Pressure Swing Absorption (VPSA)*, concebido para processar até 120 Nm³/h de hidrogénio com elevada pureza. A operação do sistema decorre sob uma pressão nominal de 10 bar, podendo variar entre 8 a 11 bar, e uma temperatura de funcionamento de $25 \pm 5^\circ\text{C}$, assegurando condições controladas para a eficiência do processo.

A composição da corrente de entrada apresenta níveis de pureza entre 99,0% e 99,9% (H₂), com teores residuais de azoto (1 000–10 000 ppm), oxigénio ($\leq 0,002\%$) e humidade limitada por ponto de orvalho máximo de 10°C.

O sistema está instalado a uma altitude de 1000 metros, numa zona com temperatura ambiente que varia entre -25°C e $+40^\circ\text{C}$, fatores que influenciam diretamente a densidade do ar e o desempenho dos sistemas de ventilação. Segundo informações fornecidas pela **SYSADVANCE**, importa ainda considerar que o sistema de ventilação é automaticamente desligado sempre que a temperatura exterior desce até aos 5°C ou menos, uma vez que o contentor onde se encontra a unidade de VPSA será equipado com sensores de hidrogénio capazes de acionar a ventilação apenas em caso de deteção de fuga. A figura 3.3 ilustra as condições climáticas mensais

no local da instalação, enquanto que a figura 3.4 mostra a velocidade média mensal do vento no local de instalação.

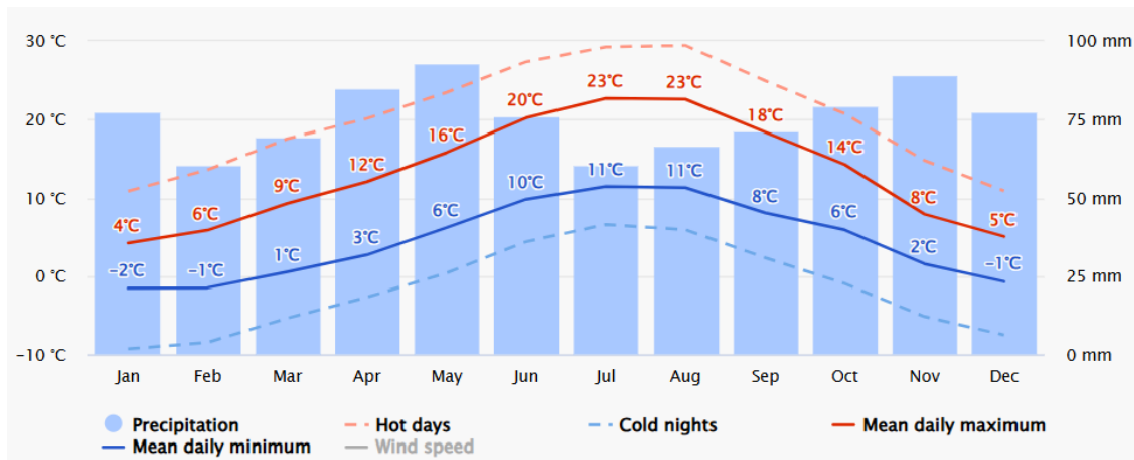


Figura 3.3: Condições climáticas no local de instalação.

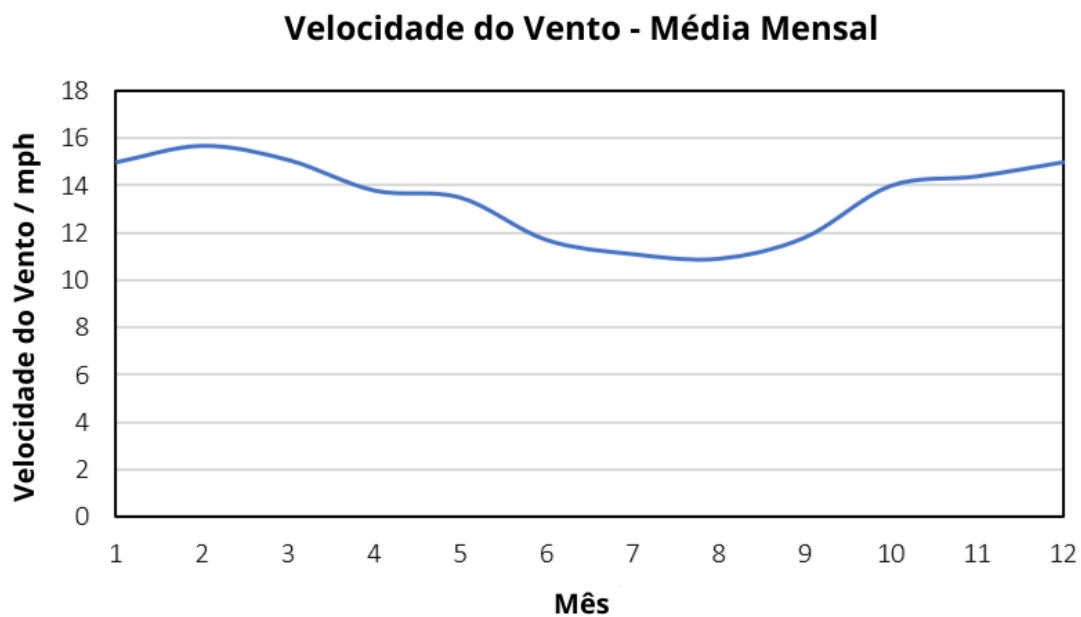


Figura 3.4: Variação da velocidade média do vento ao longo do ano no local de instalação

O sistema VPSA encontra-se alojada num contentor técnico com volume interno útil de aproximadamente $44,46 \text{ m}^3$, conforme as dimensões internas: $7,6 \text{ m} \times 2,6 \text{ m} \times 2,25 \text{ m}$. Este contentor encontra-se dividido em duas áreas funcionais distintas, sendo estas a zona de operação e a zona técnica, identificadas na figura 3.5 a azul e a vermelho, respetivamente. Ainda na figura 3.5, observa-se as colunas de adsorção (1) e as bombas de vácuo (2). As duas zonas estão separadas por uma parede metálica soldada que reforça a estrutura. A presença de um cordão de solda ao longo da estrutura de separação reforça a rigidez da divisão interna, garantindo que não há contacto entre os dois ambientes diferentes.

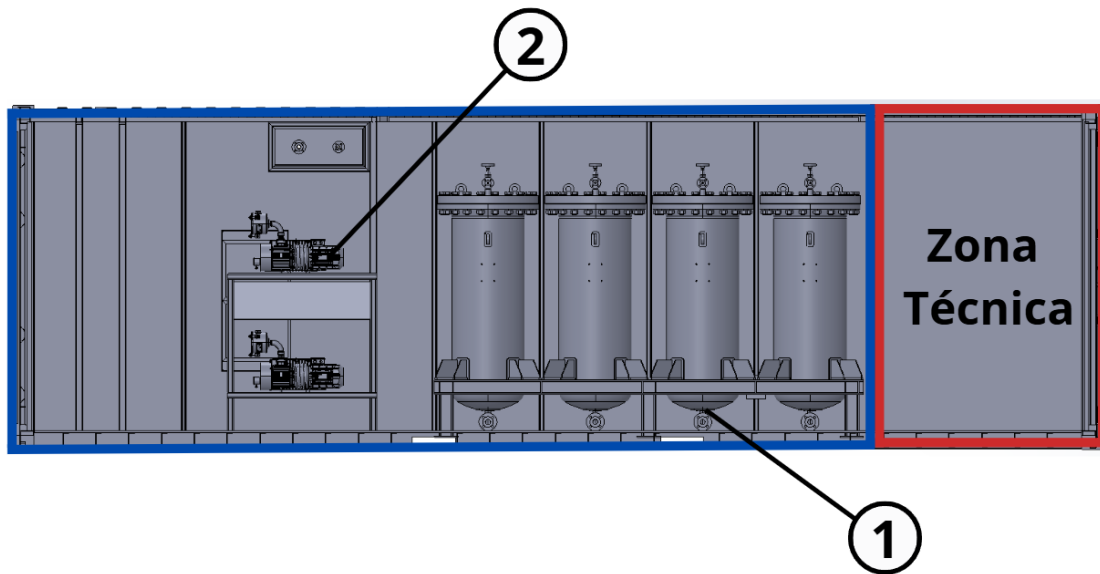


Figura 3.5: Vista de corte - interior do contentor técnico.

As quatro colunas de adsorção, alinhadas em série sobre uma estrutura metálica, representadas na figura 3.6, encontram-se equipadas com flanges (1) e entradas de válvulas inferiores (3), que possibilitam a sua ligação ao sistema de tubagens. Na base das colunas, existem saídas superiores (2), projetadas de forma a permitirem a evacuação controlada dos fluidos residuais durante a fase de regeneração do adsorvente.

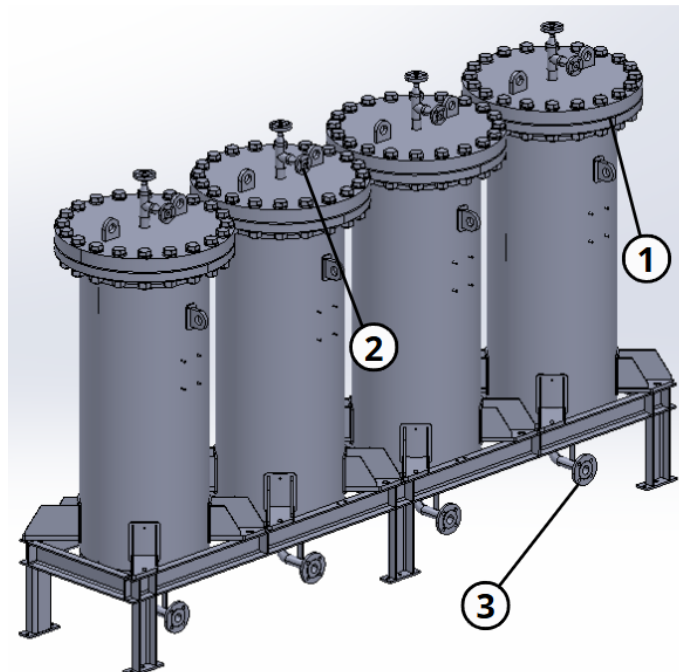


Figura 3.6: Vista isométrica das colunas de adsorção.

Para assegurar a regeneração eficiente do adsorvente, o sistema está equipado com duas bombas de vácuo, uma delas representada na figura 3.7, instaladas num suporte metálico independente dentro do contentor. Estas bombas são responsá-

veis por criar o diferencial de pressão necessário à remoção das impurezas retidas, restabelecendo a capacidade de separação do sistema antes do início de um novo ciclo.

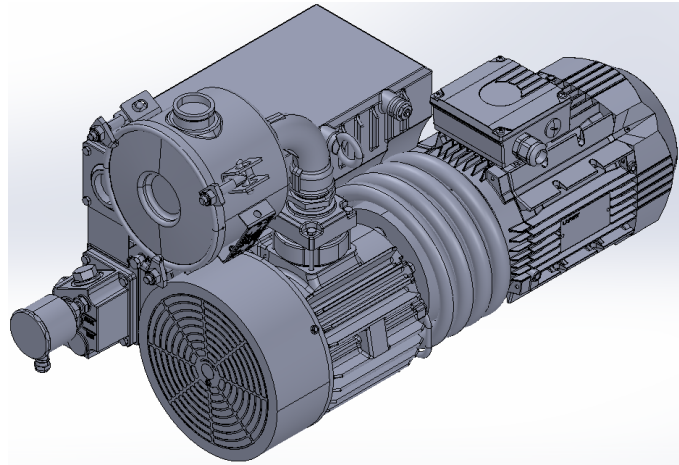


Figura 3.7: Vista isométrica de uma bomba de vácuo.

A Tabela 3.2 resume os principais parâmetros operacionais relevantes para a caracterização do sistema:

Tabela 3.2: Parâmetros operacionais do caso de estudo.

Parâmetro	Valor	Unidade
Capacidade máxima de tratamento	120	Nm ³ /h
Faixa de caudal de operação	72 - 120	Nm ³ /h
Pressão absoluta de operação mínima	8	bar
Pressão absoluta de operação máxima	11	bar
Pressão absoluta de operação	10	bar
Temperatura média de operação	25 ± 5	°C
Pureza do hidrogénio processado	99,0 - 99,9	%
Concentração de azoto	1.000 - 10.000	ppm
Concentração de oxigénio	≤ 0,002	%
Ponto de orvalho máximo da corrente	10	°C
Altitude da instalação	1000	m
Temperatura ambiente mínima	-25	°C
Temperatura ambiente máxima	40	°C

3.3 Dimensionamento

O processo de classificação proposto pela norma baseia-se na identificação das fontes de emissão e na avaliação do seu comportamento face à ventilação disponível e/ou induzida. Os passos a seguir neste desenvolvimento, conforme a **IEC 60079-10-1** [9], são os seguintes:

- Identificação das fontes de fuga de substâncias inflamáveis;
- Definição do grau de libertação, que pode ser contínuo, primário ou secundário;

- Definição do raio equivalente do orifício da fuga (S);
- Determinação da pressão crítica (p_c), e conseqüente definição da fuga, podendo ser sónica ou subsónica;
- Cálculo da taxa de fuga (W_g , em kg/s) e da característica volumétrica de emissão (Q_c);
- Análise e projeto de soluções de ventilação;
- Avaliação da eficiência e disponibilidade de ventilação, sendo esta mecânica ou natural;
- Determinação do grau de diluição;
- Classificação da zona de risco (Zonas 0, 1 e 2);
- Estimativa do raio de extensão da zona perigosa.

3.3.1 Classificação da Fuga

A análise deste caso de estudo, considerando as informações e equipamentos disponibilizados pela SYSADVANCE, indica que, nesta situação, as fugas poderão ocorrer maioritariamente nas flanges das colunas de adsorção.

De acordo com a **secção B.2**, da **IEC 60079-10-1** [9], flanges, conexões e uniões de tubulações são consideradas como fontes de emissão secundária, uma vez que, durante a operação normal do sistema, não são esperadas emissões de substâncias inflamáveis.

Apesar de existir a possibilidade destas ocorrências, a natureza interrupta e não sistemática destas possíveis fugas reforça a sua classificação como emissão secundária.

A **secção B.3** da mesma norma, destaca que a avaliação incorreta do grau de emissão pode comprometer toda a classificação e dimensionamento da zona perigosa, levando a subestimação ou superestimação do perigo real. Enquanto que a superestimação do grau de emissão leva a um dimensionamento excessivo das zonas de perigo, aumentando o custo de operações e de logística, a subestimação é mais grave, podendo resultar em zonas de perigo menores e menos restritivas, aumentando o risco de ignição acidental, no caso de ocorrer uma fuga prolongada e não detetada.

A **IEC 60079-10-1** [9] enfatiza que a classificação de uma fonte de emissão secundária pressupõe que a fuga ocorrerá por curtos períodos de tempo, e que medidas de manutenção serão tomadas no mais curto espaço de tempo. Esta suposição implica:

- A monitorização da estação de VPSA deve ser regular, de forma a conseguir detetar fugas antepadamente, antes que atinjam concentrações perigosas;
- Devem ser feitas inspeções periódicas às flanges, garantindo a integridade das mesmas.

Caso não haja monitorização adequada, uma emissão secundária pode persistir durante horas ou até mesmo dias sem ser detetada. No entanto, uma ausência de manutenção e monitorização adequada não justifica a reclassificação da emissão como primária ou contínua.

Segundo a secção B.4 da IEC 60079-10-1 [9], é improvável que mais de uma fonte secundária liberte substâncias inflamáveis simultaneamente. Desta forma, apenas a maior libertação secundária deve ser considerada na avaliação da zona perigosa.

Além disso, essa mesma secção determina que a libertação secundária total deve ser avaliada em conjunto com a libertação primária total, caso esta exista, garantindo uma análise conservadora do risco e permitindo que a classificação da zona seja dimensionada adequadamente.

Analisando o caso de estudo e tendo em conta as diretrizes da IEC 60079-10-1, conclui-se que uma possível fuga nas flanges das colunas de adsorção deve ser classificada como uma **emissão secundária**.

3.3.2 Área do Orifício da Fuga

A secção B.5 da norma IEC 60079-10-1 [9] estabelece que a correta estimativa do raio equivalente do orifício de uma fonte de emissão é um dos fatores determinantes na avaliação da taxa de fuga de uma substância inflamável, influenciando diretamente a classificação da zona de risco e a sua extensão. Embora a designação “raio do orifício” seja comum, a norma alerta para o facto de muitas fugas reais não ocorrerem por aberturas circulares. Nestes casos, recomenda-se a aplicação de um coeficiente de descarga (C_d) como fator de correção para o cálculo da taxa de fuga, considerando a forma da abertura e a resistência ao escoamento.

A estimativa da área de fuga depende do grau de emissão. Para emissões contínuas ou primárias, o tamanho da abertura é geralmente definido pela geometria de válvulas de alívio e outros elementos de libertação previsível. No caso de emissões secundárias, mais frequentes em juntas e ligações, a Tabela B.1 da IEC 60079-10-1 [9], representada na secção .13 do anexo A, fornece valores típicos para a área equivalente de fuga (S). Figura D.1 da norma, aplicada a este caso de estudo Na presente dissertação, considerou-se uma fuga secundária, conforme descrito no Capítulo 3.3.1, considerando que esta ocorre em flanges com juntas de fibra comprimida.

Assumindo um cenário de operação normal, ou seja, sem erosão ou falha progressiva, a norma IEC 60079-10-1 [9] estabelece o seguinte intervalo típico para a área de fuga equivalente:

$$0,025 \leq S \leq 0,25 \quad [\text{mm}^2] \quad (3.1)$$

Foi adotado o valor superior deste intervalo, por representar uma abordagem prudente mas compatível com o cenário esperado:

$$S = 0,25 \text{ mm}^2 \quad (3.2)$$

Assumindo que a área de fuga é circular, o raio equivalente é calculado por:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 0,282 \text{ mm} \quad (3.3)$$

e o diâmetro equivalente é dado por:

$$d = 2r = 5,64 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,564 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Este valor será utilizado nas simulações CFD realizadas no *ANSYS Fluent*, como base para a definição da fronteira de entrada de hidrogénio por fuga.

3.3.3 Pressão Crítica

Segundo a norma **IEC 60079-10-1**, a determinação da pressão crítica (p_c) é fundamental para avaliar o regime de escoamento de um gás quando há uma fuga súbita através, por exemplo, de uma válvula ou flange. A pressão crítica define o limite entre um escoamento subsónico, onde a velocidade do gás é inferior à velocidade do som, e um escoamento sónico (*choked flow*), onde a velocidade do gás atinge a velocidade do som no ponto de estrangulamento, impossibilitando aumentos adicionais da taxa de libertação mesmo que a pressão dentro do cilindro (p) aumente.

A equação para a pressão crítica é dada por:

$$p_c = p_a \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (\text{Pa}) \quad (3.5)$$

Nesta equação, os termos são definidos da seguinte forma:

- p_c representa a pressão crítica (Pa), isto é, o valor a partir do qual o escoamento se torna sónico;
- p_a corresponde à pressão atmosférica local. Em condições padrão ao nível do mar, assume-se $p_a = 101325 \text{ Pa}$; contudo, a uma altitude de 1000 metros, esse valor reduz-se para aproximadamente 89874 Pa , de acordo com a **U.S. Standard Atmosphere** [68];
- γ é a razão dos calores específicos do gás, que pode ser determinada pela seguinte relação:

$$\gamma = \frac{Mc_p}{Mc_p - R} \quad (3.6)$$

Para a aplicação desta expressão, foram utilizados os seguintes valores para o hidrogénio, conforme indicado no **CRC Handbook of Chemistry and Physics** [69]:

- $M_{H_2} = 2,016 \text{ kg/kmol}$, massa molar do hidrogénio;
- $c_p = 14\,304 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, calor específico a pressão constante;
- $R = 8\,314,5 \text{ J/(kmol}\cdot\text{K)}$, constante universal dos gases.

Aplicando estes dados na equação 3.6 no cálculo de γ , fica-se com o seguinte:

$$\gamma = \frac{(2,016)(14304)}{(2,016)(14304) - 8314,5} \Leftrightarrow \gamma = 1,405$$

Agora, substitui-se o valor de γ na equação 3.5:

$$p_c = 89874 \times \left(\frac{1,405 + 1}{2} \right)^{\frac{1,405}{1,405-1}} \Leftrightarrow p_c = 170396 \text{ Pa}$$

3.3.4 Taxa de Libertação

Segundo a Secção B.7.2.3.1 da norma **IEC 60079-10-1** [9], a velocidade do jato será sónica se a pressão de operação for superior à pressão crítica, e com base no valor calculado temos:

$$p > p_c \Leftrightarrow 10 > 1,70 \text{ (bar)}$$

Desta forma, a condição para um escoamento sónico é satisfeita. Pela informação presente na Secção B.7.2.3.3 da norma **IEC 60079-10-1** [9], conclui-se que, quando esta condição se cumpre, a velocidade do jato atingirá a velocidade do som no orifício de saída, e a taxa de fuga será governada exclusivamente pelas propriedades termodinâmicas do gás e pelas características geométricas da abertura.

A taxa de fuga (W_g) para um escoamento sónico pode ser determinada pela seguinte equação:

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (\text{kg/s})$$

De forma a que seja possível calcular esta taxa, é necessário, em primeira instância, determinar o coeficiente de descarga (C_d) e o fator de compressibilidade (Z).

Coeficiente de Descarga

Segundo a **IEC 60079-10-1** [9], o coeficiente de descarga (C_d) é um parâmetro empírico determinado experimentalmente para diferentes condições de libertação e geometrias de orifícios. A norma recomenda que, na ausência de dados específicos, seja adotado:

- $C_d \leq 1$ para aberturas regulares, como válvulas de alívio;
- $C_d = 0,75$ para orifícios irregulares, garantindo uma estimativa conservadora para o cálculo da taxa de fuga.

Não sendo possível determinar a geometria do orifício, e em conformidade com os exemplos normativos disponibilizados pela norma, definiu-se o coeficiente de descarga como:

$$C_d = 0,75$$

Fator de Compressibilidade

Segundo a **IEC 60079-10-1** [9], o fator de compressibilidade (Z) para gases ideais assume o valor de $Z = 1,0$. No entanto, para gases reais, este fator pode ser inferior ou superior a 1,0, dependendo do tipo de gás, da pressão e da temperatura.

A norma estabelece que, para pressões baixas a moderadas, a aproximação $Z = 1,0$ é geralmente aceitável. No entanto, para pressões elevadas, especialmente acima de 50 bar, e quando é necessária uma maior precisão nos cálculos, deve-se utilizar o fator de compressibilidade real. Para realizar uma pequena comparação e validação

deste valor, procedeu-se ao cálculo deste fator, recorrendo ao livro **Termodinâmica** (Yunus A. Çengel e Michael A. Boles) [70]. O livro define diversas maneiras de chegar ao valor de Z , pelo que a validação será feita apenas tendo em conta dois métodos:

1º Método - Princípio dos Estados Correspondentes

Este método baseia-se no princípio dos estados correspondentes, que afirma que todos os gases têm fatores de compressibilidade semelhantes quando comparados nas mesmas temperaturas e pressões reduzidas.

A temperatura reduzida é definida como:

$$T_R = \frac{T}{T_{Cr}} \quad (3.7)$$

A pressão reduzida é definida como:

$$p_R = \frac{p}{p_{Cr}} \quad (3.8)$$

Onde T_{Cr} e p_{Cr} são a temperatura e pressão críticas do gás, obtidas através da **Tabela A-1** do livro [70], representada nesta dissertação na secção [14] do anexo A, sendo que para o hidrogénio tomam os valores de:

$$T_{Cr} = 33,3 \text{ K} \quad p_{Cr} = 1,3 \text{ MPa}$$

Substituindo estes valores, juntamente com as condições de operação previamente estabelecidas no Capítulo 3.1, nas Equações [3.7] e [3.8], obtemos:

$$T_R = 8,954 \quad p_R = 0,692$$

Ao analisar a Figura A-15 do livro [70], representada nesta dissertação na secção [15] do anexo A, observa-se que o valor máximo de T_R apresentado é 5, para o qual o fator de compressibilidade Z é aproximadamente 1. Assim, para valores de T_R superiores a 5, como o obtido nesta análise, a tendência é que Z também se aproxime de 1, caracterizando um comportamento semelhante ao de um gás ideal. Esse resultado reforça a adoção de $Z = 1$ nas considerações deste caso de estudo.

2º Método - Equação de Van der Waals

O fator de compressibilidade Z pode ser calculado recorrendo à equação de Van der Waals, que é uma correção da equação dos gases ideais para considerar o volume das moléculas e as forças intermoleculares.

Primeiramente, deve-se calcular o volume específico (v), recorrendo à equação de Van der Waals, que é dada por:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (3.9)$$

onde:

- T – Temperatura de operação (K).
- a – Constante específica do hidrogénio no modelo de Van der Waals ($\text{Pa} \cdot \text{m}^6/\text{mol}^2$).
- b – Constante específica do hidrogénio no modelo de Van der Waals (m^3/mol).

As constantes de Van der Waals podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64p_{cr}} \qquad b = \frac{RT_{cr}}{8p_{cr}} \qquad (3.10)$$

Substituindo por valores já conhecidos, obtém-se:

$$a = 0.02487 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6/\text{mol}^2 \qquad b = 2.66207 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$$

Agora substituímos estes valores na equação [3.9](#):

$$\left(10 \times 10^5 + \frac{0,02487}{v^2} \right) (v - 2,66207 \times 10^{-5}) = (8,314 \times 298,15)$$

Resolvendo em ordem a v , obtém-se:

$$v = 0,00266 \text{ m}^3/\text{mol}$$

Com o volume específico já determinado, o fator de compressibilidade pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$Z = \frac{pv}{RT} \qquad (3.11)$$

Substituindo os valores:

$$Z = \frac{(10 \times 10^5) \times (0,00266)}{(8,314) \times (298,15)} \Leftrightarrow Z = 1,07$$

Portanto, o fator de compressibilidade obtido confirma que o hidrogénio, nas condições analisadas, apresenta um comportamento "quase ideal", pois Z está muito próximo de 1.

Com todos os parâmetros definidos, é possível proceder ao cálculo da taxa de fuga, aplicando a equação [3.3.4](#), previamente estabelecida:

$$W_g = (0,75)(0,25 \times 10^{-6})(1000000) \sqrt{1,405 \frac{2,016 \times 10^{-3}}{(1,07)(8,314)(298,15)} \left(\frac{2}{1,405 + 1} \right)^{\frac{1,405+1}{1,405-1}}}$$

$$W_g = 1,159 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

3.3.5 Caudal Volumétrico da Fuga

O caudal volumétrico da fuga (Q_g) é calculado com base na razão entre a taxa de libertação (W_g) e a densidade do gás hidrogénio (ρ_g), de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.12)$$

A densidade do hidrogénio à altitude da instalação (1000 metros acima do nível médio do mar) é determinada com recurso à equação de estado dos gases ideais:

$$\rho_g = \frac{p_a(1000) \cdot M_{H_2}}{R \cdot T} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (3.13)$$

A temperatura considerada corresponde à máxima registada no local da instalação ($T = 40^\circ\text{C}$), o que conduz a uma diminuição da densidade do gás e, conseqüentemente, a um aumento do caudal volumétrico em caso de fuga, garantindo uma análise mais conservadora do risco. Assim, a densidade do gás é:

$$\rho_g = \frac{89874 \cdot 0,002016}{8,314 \cdot 313,15} = 0,0691 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Substituindo os valores do caudal mássico previamente obtido ($W_g = 1,0402 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s}$):

$$Q_g = \frac{1,159 \times 10^{-4}}{0,0691} = 1,677 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 6,04 \text{ m}^3/\text{h}$$

3.3.6 Caudal Característico

Um dos parâmetros-chave definidos na norma **IEC 60079-10-1:2020** [9] para a classificação da extensão da zona perigosa é o caudal característico, designado por Q_c . Esta grandeza representa o potencial de risco associado à libertação de uma substância inflamável, sendo função da taxa de fuga, da densidade do gás e do respetivo LFL.

O seu cálculo é dado por:

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \cdot \text{LFL}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.14)$$

Substituindo na equação os dados já conhecidos obtém-se:

$$Q_c = \frac{1,159 \times 10^{-4}}{0,0773 \cdot 0,04} = 0,038 \text{ m}^3/\text{s}$$

O valor de Q_c será mantido constante ao longo desta dissertação. Esta grandeza é essencial para a determinação da extensão da zona perigosa, para a avaliação do grau de diluição e para o dimensionamento da ventilação, conforme definido na norma **IEC 60079-10-1** [9].

De acordo com a Figura D.1 da norma, o valor de Q_c deve ser introduzido em função do tipo de dispersão predominante (jato, difusiva ou gás pesado). No presente caso de estudo, o cenário mais representativo corresponde à dispersão do tipo *jet*.

No entanto, pela análise da figura D.1 da norma, verifica-se que esta função só é válida para caudais superiores a $Q_c = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, como se pode observar na figura 3.8. Como a extrapolação das curvas é desaconselhada pela norma, é recomendada, nestes casos, a adoção de uma abordagem conservadora, assumindo uma extensão mínima de 1 metro para a zona perigosa. A representação gráfica da zona perigosa encontra-se na secção 1 do Apêndice A.

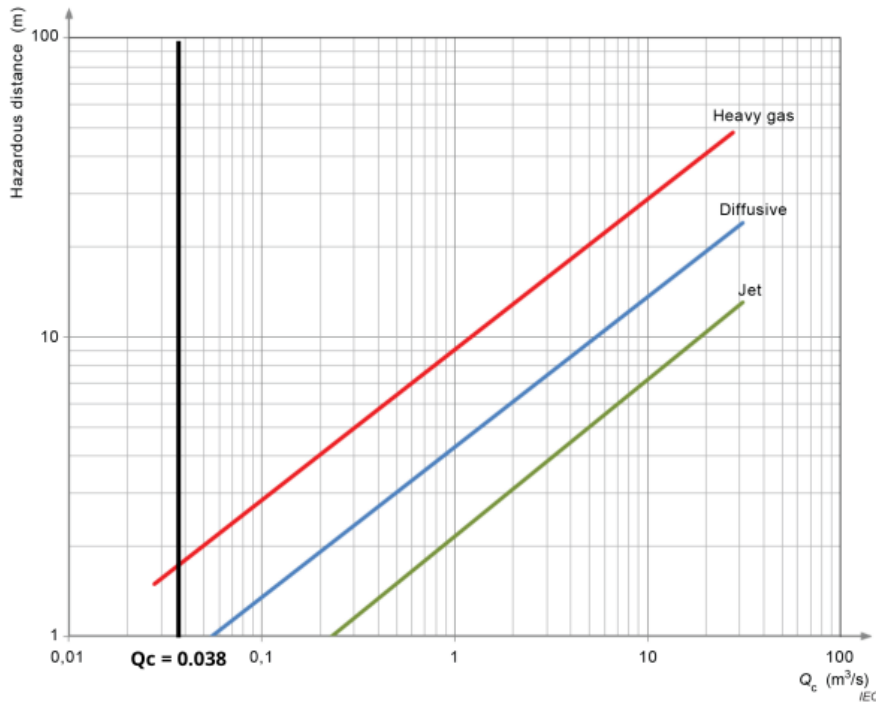


Figura 3.8: Figura D.1 da norma, aplicada a este caso de estudo [9].

Além disso, Q_c é também utilizado na Figura C.1 da norma, para avaliar o grau de diluição, em função da velocidade do ar de ventilação, como será mostrado no decorrer desta dissertação.

3.3.7 Taxa de Renovação - Renovações por Hora

A empresa **SYSADVANCE** impõe, como requisito mínimo para o funcionamento seguro e eficiente do sistema, a realização de pelo menos 50 renovações de ar por hora no interior do contentor técnico. Esta exigência visa assegurar a constante renovação do ar ambiente, evitando a acumulação de gases inflamáveis, como o hidrogénio.

Adicionalmente, esta taxa de renovação está diretamente associada à necessidade de dissipação do calor gerado pelos equipamentos instalados no interior do contentor. A extração contínua do ar aquecido permite manter as temperaturas de operação dentro dos limites admissíveis para os componentes elétricos e mecânicos, prevenindo falhas, aumentando a fiabilidade do sistema e assegurando o seu desempenho em regime contínuo.

De forma a cumprir esta exigência, é necessário determinar o caudal volumétrico mínimo de ar fresco, Q_a , que permita efetuar 50 renovações por hora. O cálculo segue a expressão:

$$Q_a = C \cdot V_0 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

em que:

- Q_a — caudal mínimo de ar fresco a garantir;
- $C = 50$ — número de renovações/hora;
- $V_0 = L \cdot B \cdot H = 7,6 \times 2,25 \times 2,6 = 44,46 \text{ m}^3$ — volume útil interno do contentor.

Substituindo:

$$Q_a = \frac{50}{3600} \times 44,46 = 2223,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

Este valor representa o caudal mínimo absoluto a garantir, independentemente do método de ventilação adotado (natural ou mecânico), devendo ser respeitado em todas as soluções desenvolvidas no âmbito deste estudo.

3.4 Projeto

Neste capítulo procede-se ao dimensionamento da ventilação da instalação VPSA, com o objetivo de garantir condições de segurança adequadas face ao risco de formação de atmosferas explosivas devido à presença de hidrogénio. Importa desde já referir que, embora a norma **IEC 60079-10-1:2020** recomende que o processo de classificação de áreas perigosas siga uma abordagem iterativa — iniciando-se com a definição da configuração física e avaliando-se depois a eficácia da ventilação obtida —, no presente trabalho opta-se por inverter essa lógica. Esta decisão decorre da imposição, por parte da empresa SYSADVANCE, de um valor mínimo de renovações de ar por hora a garantir na instalação, como critério de projeto. Assim, o dimensionamento apresentado parte de um caudal previamente definido, sendo posteriormente avaliado segundo os critérios da norma, de forma a verificar se garante a diluição do hidrogénio até concentrações inferiores ao seu limite inferior de inflamabilidade (LFL) e se permite uma correta classificação da zona de risco.

Com esse objetivo, são analisadas diferentes configurações de ventilação, considerando dois mecanismos principais:

- **Ventilação natural**, baseada em fenómenos físicos como o gradiente térmico e a ação do vento;
- **Ventilação mecânica**, baseada na utilização de equipamentos de extração forçada de ar.

Para cada um destes mecanismos, são estudadas duas soluções construtivas distintas, com diferentes configurações de aberturas e equipamentos. Cada solução será avaliada com base na eficácia da diluição do hidrogénio e na velocidade média do escoamento.

A análise será conduzida com base nas expressões fornecidas pela norma [\[9\]](#) para o dimensionamento de soluções de ventilação. Serão também consideradas as características geométricas do contentor e as condições ambientais associadas ao local de instalação.

3.5 Ventilação Natural

Este capítulo avalia, com base na norma **IEC 60079-10-1** [9], o desempenho de duas soluções de ventilação natural idealizadas — uma induzida pelo vento e outra pela convecção térmica. A análise considera condições exteriores não favoráveis, adotando uma abordagem conservadora, com o objetivo de estimar o caudal obtido, a diluição alcançada e a zona de risco atribuída. Trata-se de uma avaliação normativa e comparativa, sem intenção de propor uma solução real, já que, em contextos industriais — especialmente em espaços confinados —, a ventilação natural tende a ser substituída por soluções mecânicas mais fiáveis e controláveis.

3.5.1 1ª Solução: Induzida pelo Vento

A primeira solução considerada para ventilação natural consiste na instalação de grelhas de ventilação na parte superior de fachadas opostas do contentor. Esta disposição tem como objetivo promover a renovação do ar pela ação direta do vento, tirando partido da diferença de pressão gerada entre as fachadas barlavento e sotavento.

A escolha de posicionar as grelhas na parte superior justifica-se pelo facto de o hidrogénio ser um gás significativamente mais leve que o ar, acumulando-se preferencialmente nas zonas mais elevadas do volume confinado. Assim, a extração do gás será mais eficaz se feita junto ao teto do contentor.

De acordo com a norma **IEC 60079-10-1** [9], o caudal de ventilação natural induzido pelo vento pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$Q_{av} = C_d A_e u_w \sqrt{\Delta C_p} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.15)$$

Onde:

- Q_{av} – Caudal de ar induzido pelo vento [m^3/s]
- C_d – Coeficiente de descarga da abertura [adimensional]
- A_e – Área efetiva de ventilação [m^2]
- u_w – Velocidade média do vento [m/s]
- ΔC_p – Diferença de coeficientes de pressão entre fachadas opostas [adimensional]

Sendo:

$$A_e = \sqrt{\frac{A_1^2 \cdot A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \quad (\text{m}^2) \quad (3.16)$$

Onde:

- A_1 – Área das aberturas de entrada [m^2]
- A_2 – Área das aberturas de saída [m^2]

Nesta fase, serão primeiramente definidas as variáveis independentes da equação (3.15), nomeadamente o coeficiente de descarga C_d , a velocidade média do vento u_w e o diferencial de coeficientes de pressão ΔC_p , com base nas características do equipamento e nas condições do local de instalação. Estas definições permitirão posteriormente calcular a área efetiva necessária e, por conseguinte, estabelecer os requisitos geométricos mínimos para as aberturas de ventilação.

Adota-se um coeficiente de descarga de $C_d = 0,75$, conforme definido na IEC 60079-10-1 [9] para aberturas expostas à ação do vento.

A velocidade do vento a considerar será:

$$u_w = 4,87 \text{ m/s}$$

Este valor corresponde ao valor mais baixo registado no local de instalação e será adotado com base na informação meteorológica apresentada na secção 3.2, representando a situação menos favorável.

O diferencial de coeficientes de pressão ΔC_p entre as fachadas do contentor é um parâmetro essencial para o cálculo do caudal de ventilação induzido pelo vento. Este diferencial representa a diferença de pressão dinâmica entre a fachada onde o vento incide diretamente (barlavento) e a fachada oposta (sotavento), sendo responsável pela indução do escoamento natural de ar através das aberturas.

A determinação dos valores de C_p é feita com base na norma EN 1991-1-4 [71], que apresenta coeficientes de pressão externos médios ($C_{pe,10}$) para diferentes zonas de edifícios, em função da geometria e orientação relativa ao vento. Estes coeficientes são adequados para aplicações como ventilação, uma vez que representam pressões médias sobre superfícies de fachada ao longo de períodos típicos de 10 segundos, ao contrário dos coeficientes instantâneos ($C_{p,1}$) usados em verificações estruturais.

No caso em análise, as grelhas de ventilação serão colocadas nas fachadas longitudinais do contentor (7,6 m de comprimento), e assume-se que a orientação da instalação será tal que o vento incidirá perpendicularmente a essas fachadas, sendo esta a condição mais favorável à indução de ventilação. A Figura 3.9 ilustra esta configuração, na qual a direção do vento coincide com o eixo longitudinal da edificação, o que permite maximizar o diferencial de pressão entre as fachadas.

Segundo a EN 1991-1-4 [71], para fachadas com proporções semelhantes às do contentor (com $e < d$, onde e é a largura da fachada perpendicular ao vento e d é a profundidade do contentor), os coeficientes de pressão típicos nas zonas relevantes são:

- Fachada de entrada (zona D, barlavento): $C_{p,1} = +0,80$
- Fachada de saída (zona E, sotavento): $C_{p,2} = -0,50$

Com base nestes valores, o diferencial de pressão adotado será:

$$\Delta C_p = C_{p,1} - C_{p,2} = 0,80 - (-0,50) = 1,30 \quad (3.17)$$

Porém, existe um muro a sotavento, o que influencia significativamente a distribuição da pressão na fachada de saída. De acordo com a norma EN 1991-1-4 [71], a presença de obstáculos a montante pode atenuar a depressão esperada em fachadas sotavento, reduzindo o diferencial de pressão e, conseqüentemente, o caudal de ventilação induzido pelo vento.

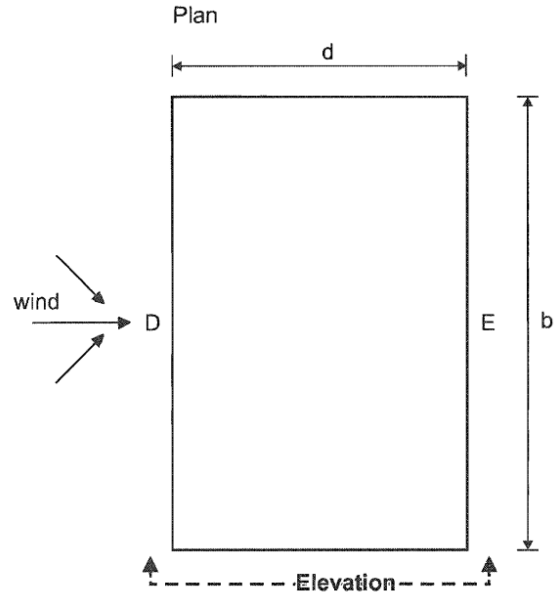


Figura 3.9: Ilustração explicativa retirada da norma EN 1991-1-4 [71].

A secção 7.4.2 da referida norma introduz o conceito de fator de abrigo (f_s), aplicável quando existe uma parede ou vedação com altura igual ou superior à estrutura analisada, e que se encontra a uma distância horizontal x da mesma. O coeficiente de pressão corrigido é dado por:

$$C_{p,2,\text{abrigado}} = f_s \cdot C_{p,2} \quad (3.18)$$

Neste caso, o muro encontra-se a uma distância de $x = 0,923$ m da fachada sotavento, cuja altura é $h = 5,0$ m, como se pode verificar nas figuras 3.10 e 3.11. Assim, a razão entre a distância e a altura é:

$$\frac{x}{h} = \frac{0,923}{5,0} = 0,18$$

Para este valor, a Figura 7.20 da norma EN 1991-1-4 [71] indica um fator de abrigo de aproximadamente $f_s = 0,3$, não importando a razão de solidez φ , como se pode observar na figura 3.12. Aplicando este fator ao coeficiente original da fachada sotavento:

$$C_{p,2,\text{abrigado}} = 0,3 \cdot (-0,50) = -0,15$$

Logo, o novo diferencial de pressão será:

$$\Delta C_p = C_{p,1} - C_{p,2,\text{abrigado}} = 0,80 - (-0,15) = 0,95$$

Com todas as variáveis independentes definidas, colocou-se a área efetiva de ventilação (A_e), em função do caudal de ar (Q_a) necessário para garantir uma renovação eficaz do ar no interior do contentor, tal como mostra a seguinte expressão:

$$A_e = \frac{Q_{av}}{0,75 \cdot 4,87 \cdot \sqrt{0,95}} \quad [\text{m}^2] \quad (3.19)$$

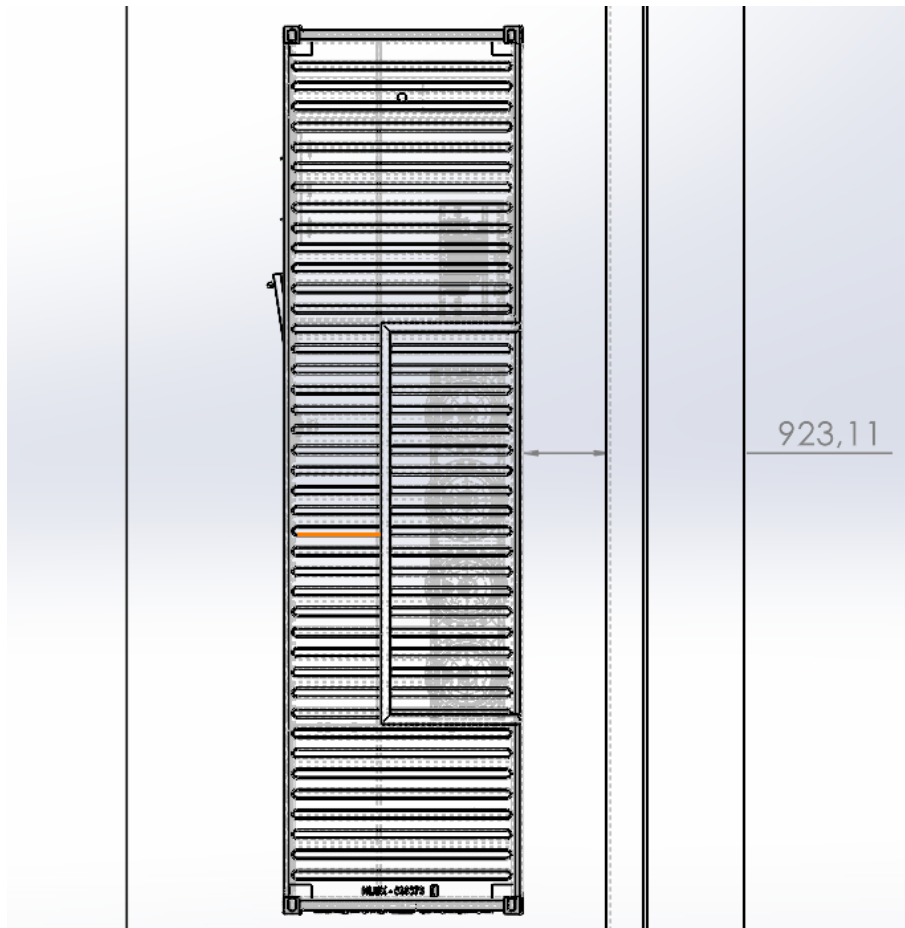


Figura 3.10: Distância "x" do Contentor ao Muro.

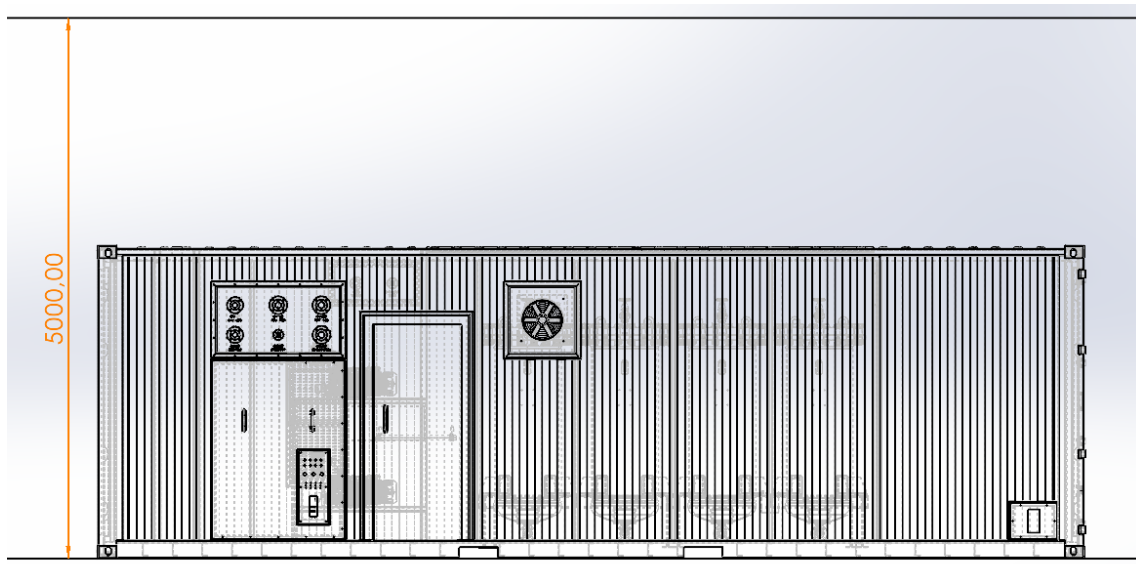


Figura 3.11: Altura "h" do Muro.

A representação gráfica desta equação encontra-se na Figura [3.13](#). O ponto a negro indica o caudal mínimo admissível, conforme definido na secção [3.3.7](#) desta dissertação.

A solução apresentada contempla a utilização de grelhas do modelo **TAE** da

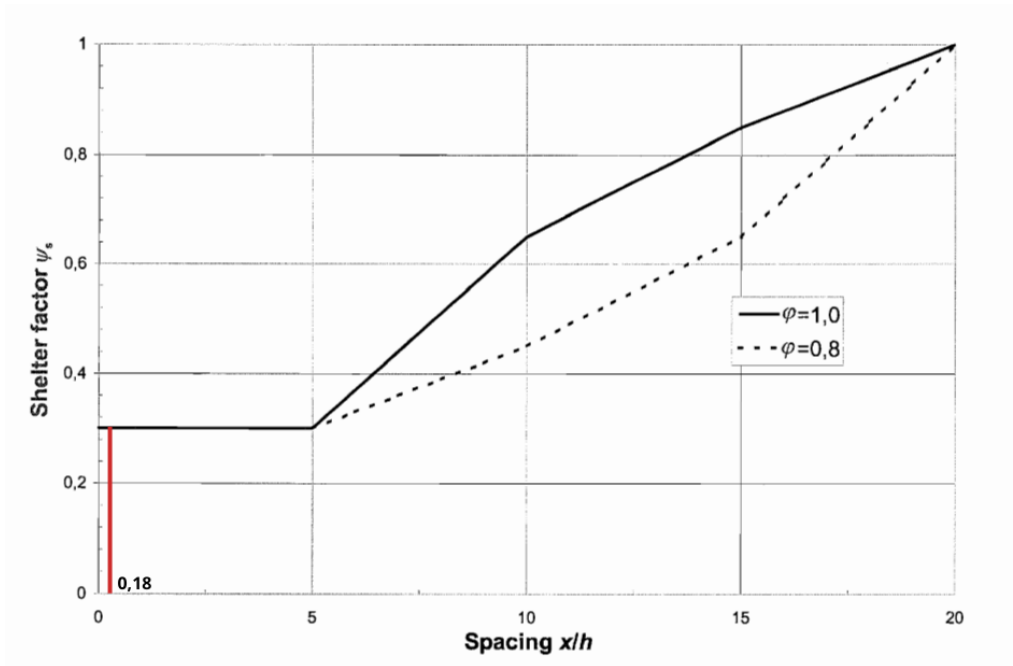
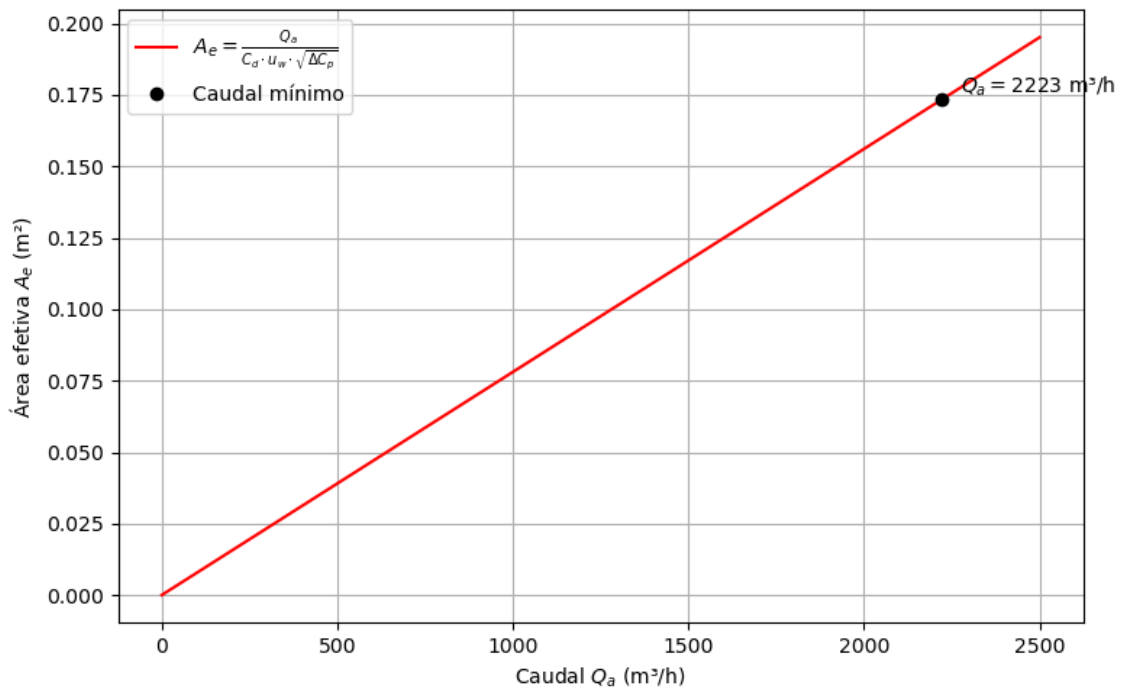


Figura 3.12: Figura 7.20 da EN 1991-1-4.

Figura 3.13: Área efetiva A_e em função do caudal Q_{av} , para ventilação natural induzida pelo vento.

marca **TradAir**, fabricadas em alumínio, com deflexão simples composta por alhetas horizontais fixas antichuva, inclinadas a 45° e espaçadas entre si 100 mm. A ficha técnica deste modelo de grelhas encontra-se representada na secção .16 do anexo B. Este modelo integra ainda uma malha metálica antipássaros, assegurando proteção adicional contra a intrusão de pequenos animais.

Com o objetivo de estudar a influência da geometria de instalação, foram anali-

sadas duas configurações distintas: **v0.1** - com quatro grelhas idênticas (duas para admissão e duas para extração), e **v0.2** - com seis grelhas idênticas (três para admissão e três para extração), com o objetivo de avaliar o impacto do número de grelhas tanto na performance aerodinâmica como no custo da solução, permitindo maior flexibilidade na escolha final.

Para cada configuração considerada, foi determinada a área efetiva total A_e , através da equação 3.16, o caudal de ar induzido Q_{av} resultante da ação do vento, pela equação 3.19, bem como o custo total da solução, estando os resultados obtidos sintetizados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Configuração das soluções v0.1 e v0.2: área efetiva total, caudal induzido e custo da solução.

v0.1 - 4 grelhas			
Modelo	A_e [m ²]	Q_{av} [m ³ /h]	Preço [€]
TAE 500 x 200	0,0368	471,6	286,24
TAE 500 x 300	0,0735	942,0	341,64
TAE 600 x 300	0,0891	1141,9	387,32
TAE 700 x 300	0,1032	1322,6	416,48
TAE 800 x 300	0,1188	1522,6	445,52
TAE 800 x 400	0,1781	2282,5	536,08
TAE 900 x 400	0,2008	2573,5	570,96
TAE 900 x 500	0,2687	3443,7	637,80
v0.2 - 6 grelhas			
Modelo	A_e [m ²]	Q_{av} [m ³ /h]	Preço [€]
TAE 500 x 200	0,0552	706,86	429,36
TAE 500 x 300	0,1103	1413,72	512,46
TAE 600 x 300	0,1336	1712,78	580,98
TAE 700 x 300	0,1549	1984,65	624,72
TAE 800 x 300	0,1782	2283,71	668,28
TAE 800 x 400	0,2673	3425,56	804,12
TAE 900 x 400	0,3012	3860,55	856,44
TAE 900 x 500	0,4031	5165,52	956,70

As figuras 3.14 e 3.15 ilustram a relação entre a área efetiva A_e e o caudal Q_{av} induzido pelo vento, para cada uma das configurações avaliadas.

Com base nos critérios de seleção considerados — nomeadamente o caudal induzido e o custo de implementação — a configuração escolhida foi a **v0.1 - TAE 800 × 400**, por se apresentar como a solução mais económica capaz de garantir o caudal mínimo exigido para a renovação do ar.

De acordo com a norma **IEC 60079-10-1** [9], para determinar o tipo de diluição proporcionado por esta solução, é necessário, numa primeira fase, calcular a velocidade média do escoamento. Para tal, divide-se o caudal volumétrico pelo área da secção atravessada pelo escoamento, conforme ilustrado na equação seguinte:

$$u_w = \frac{Q_{av}}{A} \quad (3.20)$$

Considerando que, para este caso, $A = L \times H$, temos:

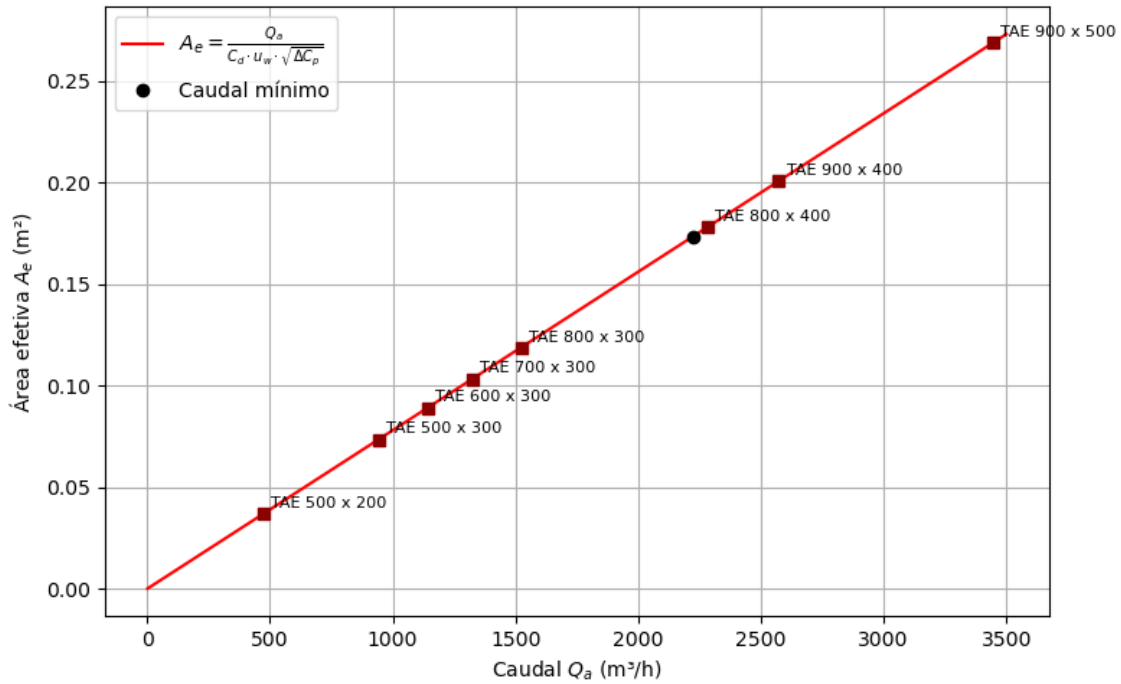


Figura 3.14: Relação entre área efetiva A_e e caudal Q_{av} para as configurações v0.1.

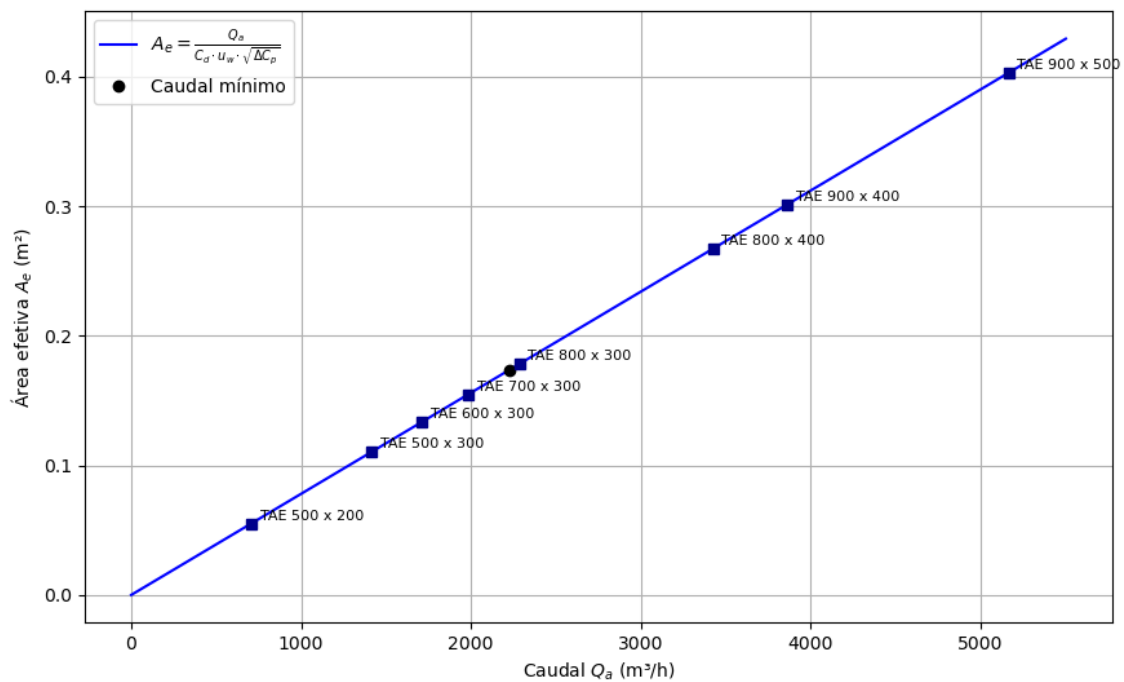


Figura 3.15: Relação entre área efetiva A_e e caudal Q_{av} para as configurações v0.2.

$$u = 0,0321 \text{ m/s}$$

Este valor foi validado graficamente na Figura [3.16](#), onde se conclui que a velocidade obtida se insere na gama correspondente a uma diluição média, de acordo com o Gráfico C.1 da norma **IEC 60079-10-1**.

Importa, no entanto, salientar que a classificação da zona perigosa não depende

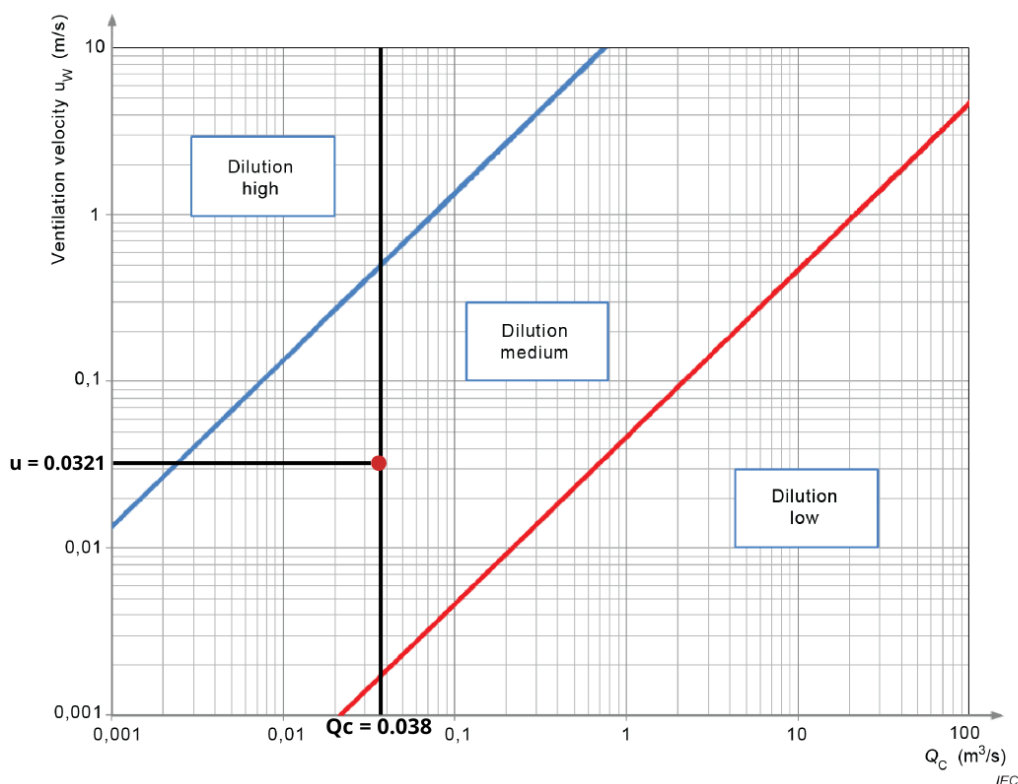


Figura 3.16: Classificação do grau de diluição em função do caudal e da velocidade de escoamento (IEC 60079-10-1, Gráfico C.1).

unicamente da eficácia da diluição. De acordo com a secção C.3.7.1 da mesma norma, é também necessário considerar a disponibilidade da ventilação, ou seja, a sua capacidade de se manter ativa de forma contínua e previsível. Esta disponibilidade é classificada como boa, justa ou pobre.

No caso em estudo, a ventilação natural no interior do contentor depende diretamente de variáveis atmosféricas (como direção e intensidade do vento), pelo que não pode ser considerada como permanentemente assegurada. Assim, assume-se uma disponibilidade justa.

Combinando esta disponibilidade justa com a diluição média anteriormente verificada, e segundo a Tabela D.1 da **IEC 60079-10-1**, representada na secção **.17** do anexo B, conclui-se que a classificação da zona de risco é a de uma **Zona 2**.

Embora a norma **IEC 60079-10-1** **9** apenas exija a verificação da concentração média de fundo X_b para situações de emissão contínua, considerou-se pertinente realizar esta validação também neste caso.

Para tal, recorreu-se à equação:

$$X_b = \frac{f \cdot Q_g}{Q_{av}} \quad (3.21)$$

Assumindo:

- $f = 1$ – fator de ineficiência da ventilação;
- $Q_g = 5,418 \text{ m}^3/\text{h}$ – caudal volúmico da fuga;

- $Q_{av} = 2282,5 \text{ m}^3/\text{h}$ – caudal de ar garantido pela configuração v0.1 - TAE 800×400 .

Substituindo os valores:

$$X_b = \frac{1 \cdot 6,04}{2282,5} = 0,00265 \quad \Rightarrow \quad X_b = 0,265\% \text{ (v/v)}$$

O valor crítico definido pela norma é:

$$X_{\text{crit}} = 0,25 \cdot \text{LFL}_{\text{H}_2} = 0,25 \cdot 4,0\% = 1,0\% \text{ (v/v)}$$

Comparando os dois valores:

$$X_b = 0,265\% < X_{\text{crit}} = 1,0\%$$

Conclui-se, portanto, que a solução adotada satisfaz também este critério adicional de segurança. Por fim, falta apenas determinar a extensão da zona perigosa associada à libertação contínua de hidrogénio. Conforme estabelecido no capítulo [3.3.6](#), e de acordo com os critérios da norma **IEC 60079-10-1**, a extensão da zona será considerada como 1 metro, uma vez que o caudal característico de libertação ($Q_c = 0,038 \text{ m}^3/\text{s}$) se encontra fora do intervalo representado nos gráficos da norma, exigindo a adoção de uma abordagem conservadora.

3.5.2 2ª Solução: Induzida pelo Gradiente Térmico

A segunda solução é considerada para a ventilação induzida por gradiente térmico, e resulta da existência de massas de ar, dentro do contentor, com diferentes temperaturas e composições. Gases mais quentes e menos densos, como é o caso do hidrogénio, tendem a ascender, enquanto que os menos densos tendem a descer, criando um movimento convectivo natural que proporciona uma certa ventilação natural. O caudal induzido por este tipo de ventilação pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$Q_{ac} = C_d A_e \sqrt{\frac{4\Delta T}{(T_{\text{in}} + T_{\text{out}})} gH} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.22)$$

Onde:

- Q_{ac} – Caudal de ar induzido pelo gradiente térmico (m^3/s)
- C_d – Coeficiente de descarga da abertura (adimensional)
- A_e – Área efetiva de ventilação (m^2)
- ΔT – Diferença de temperatura entre o interior e o exterior ($T_{\text{in}} - T_{\text{out}}$) (K)
- T_{in} – Temperatura interior (K)
- T_{out} – Temperatura exterior (K)
- g – Aceleração da gravidade ($9,80665 \text{ m/s}^2$)
- H – Altura entre as aberturas de entrada e saída (m)

Tal como na solução baseada na ação do vento, inicia-se a análise da ventilação natural por convecção com a definição das variáveis independentes que condicionam o escoamento e, conseqüentemente, o caudal de ar Q_{ac} resultante.

A primeira variável a considerar é o coeficiente de descarga C_d , que tal como na solução anterior, é definido como:

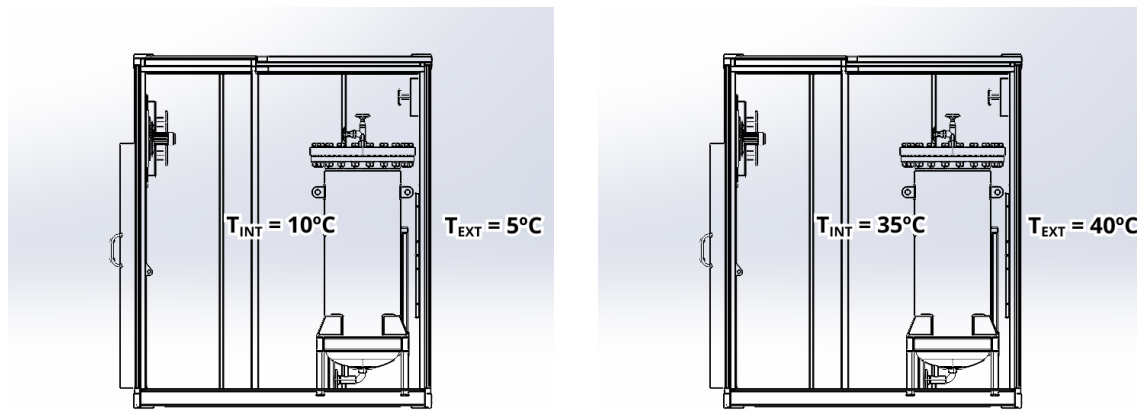
$$C_d = 0,75$$

A determinação das temperaturas interior e exterior é essencial para o cálculo da ventilação natural induzida pela convecção. Segundo informações fornecidas pela **SYSADVANCE**, os limites de temperatura exterior ao longo do ano variam entre os -25°C e os 40°C . No entanto, importa considerar que, por norma, o sistema de ventilação é automaticamente desligado sempre que a temperatura exterior for igual ou inferior a 5°C , visto que existem sensores de hidrogénio no interior do contentor capazes de acionar a ventilação apenas em caso de deteção de fuga.

Assim, para efeitos de dimensionamento da ventilação natural por convecção, será apenas considerada a faixa de funcionamento do sistema, ou seja, para temperaturas exteriores $\geq 5^{\circ}\text{C}$. Neste caso, assume-se, com base na dissipação térmica dos equipamentos internos e na prática da **SYSADVANCE**, que:

- No inverno, a temperatura interior é cerca de 5°C superior à exterior, devido ao funcionamento dos equipamentos e ao isolamento térmico do contentor;
- No verão, a temperatura interior é cerca de 5°C inferior à exterior, devido à ação do sistema de ventilação e eventual arrefecimento passivo.

Estes pressupostos podem ser visualizados na figura [3.17](#).



(a) Exemplo de situação no inverno: $T_{\text{int}} = 10^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ext}} = 5^{\circ}\text{C}$.

(b) Exemplo de situação no verão: $T_{\text{int}} = 35^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ext}} = 40^{\circ}\text{C}$.

Figura 3.17: Temperaturas interior e exterior assumidas no dimensionamento da ventilação natural pela convecção térmica.

Contudo, para que exista ventilação natural por convecção, a condição fundamental é que a temperatura no interior do contentor seja superior à temperatura exterior ($T_{\text{in}} > T_{\text{out}}$), de forma a gerar um gradiente de densidade que impulsione o escoamento ascendente do ar. Esta diferença cria um efeito chaminé que permite o movimento convectivo necessário ao funcionamento da solução.

Verifica-se, portanto, que no cenário de verão — apesar de representar a condição menos favorável para o dimensionamento — o gradiente térmico real inviabiliza fisicamente o desenvolvimento de ventilação por convecção, uma vez que $T_{in} < T_{out}$. Assim, esta hipótese deixa de ser válida e reforça a necessidade da existência de ventilação mecânica durante os meses mais quentes do ano.

Posto isto, a solução de ventilação natural por convecção será analisada para os restantes meses do ano, onde este mecanismo é efetivamente viável. Considerando a definição comum em projetos de ventilação, assume-se que:

- **Verão:** meses de junho a setembro (inclusive);
- **Inverno:** restante período do ano (outubro a maio).

Para garantir o dimensionamento mais conservador possível dentro do período de inverno, adota-se como referência a situação com a temperatura exterior mais elevada dentro desse intervalo. Pela consulta da Figura 3.3, essa condição ocorre no final do mês de maio, com uma temperatura exterior de aproximadamente 25°C. Mantendo a diferença típica de +5°C para a temperatura interior, obtém-se:

$$T_{out} = 25^{\circ}\text{C} = 298,15\text{ K} \quad \text{e} \quad T_{in} = 30^{\circ}\text{C} = 303,15\text{ K}$$

$$\Delta T = T_{in} - T_{out} = 5\text{ K} \quad \text{e} \quad T_{in} + T_{out} = 601,3\text{ K}$$

Para se proceder ao dimensionamento da ventilação natural induzida por convecção, colocou-se a área efetiva de ventilação (A_e) em função do caudal de ar (Q_{ac}) e da diferença de alturas entre as aberturas de entrada e saída (H), como indicado na expressão seguinte:

$$A_e = \frac{Q_{ac}}{0,75 \sqrt{\frac{4 \cdot 5}{(303,15 + 298,15)} \cdot 9,81 \cdot H}} \quad [\text{m}^2] \quad (3.23)$$

Esta equação permite expressar A_e em do caudal induzido Q_{ac} , para diferentes valores de H . A representação gráfica desta equação encontra-se na Figura 3.18, para valores de H de 0,5;1;1,5;2. O ponto a negro indica o caudal mínimo admissível, conforme definido no capítulo 3.3.7 desta dissertação

A solução apresentada contempla, mais uma vez, a utilização de grelhas do modelo **TAE** da marca **Tradair**. A partir da análise do gráfico da Figura 3.18, conclui-se que, para garantir o caudal de ar necessário por via da ventilação natural induzida pela convecção, a área efetiva A_e deverá ser substancialmente superior à observada no caso de ventilação induzida pelo vento. Perante esta limitação, foram analisadas duas alternativas construtivas com vista a aumentar a área efetiva disponível: **v0.3** - com seis grelhas idênticas (três para admissão e três para extração), e **v0.4** - com oito grelhas idênticas (quatro para admissão e quatro para extração)

Para cada configuração considerada, foi determinada a área efetiva total A_e , através da equação 3.16, o caudal de ar induzido Q_{ac} resultante da ação dos movimentos convectivos, pela equação 3.23, bem como o custo total da solução, para os diferentes valores de H , estando os resultados obtidos sintetizados na Tabela 3.4

A análise desses dados revela que nenhuma das soluções avaliadas permite atingir o caudal mínimo estabelecido no capítulo 3.3.7 apenas por efeito da ventilação natural induzida por convecção.

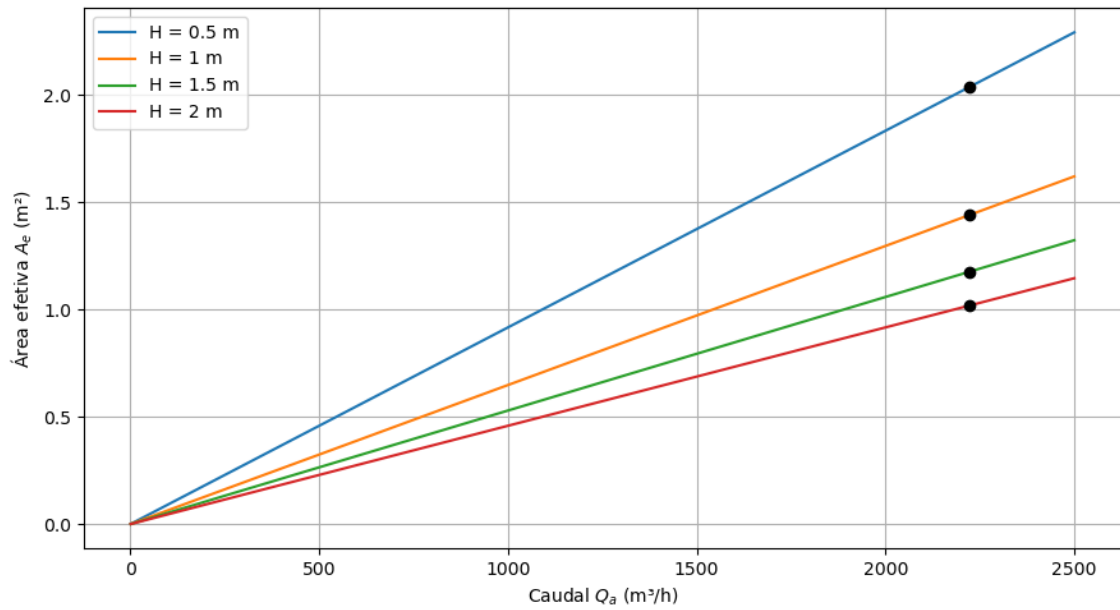


Figura 3.18: Área efetiva A_e em função do caudal Q_{ac} , para ventilação natural induzida pela convecção térmica.

Esta limitação é confirmada graficamente nas Figuras 3.19 e 3.20, que representam a relação entre a área efetiva total A_e e o caudal Q_{ac} para as configurações com 6 e 8 grelhas, respetivamente, em diferentes alturas H . Na Figura 3.19, observa-se que nenhum dos modelos analisados cruza a linha de referência do caudal mínimo, mesmo nas condições mais favoráveis (como $H = 2$ m). O mesmo padrão é verificado na Figura 3.20, onde, apesar do aumento da área efetiva e do caudal induzido, os valores continuam aquém do necessário.

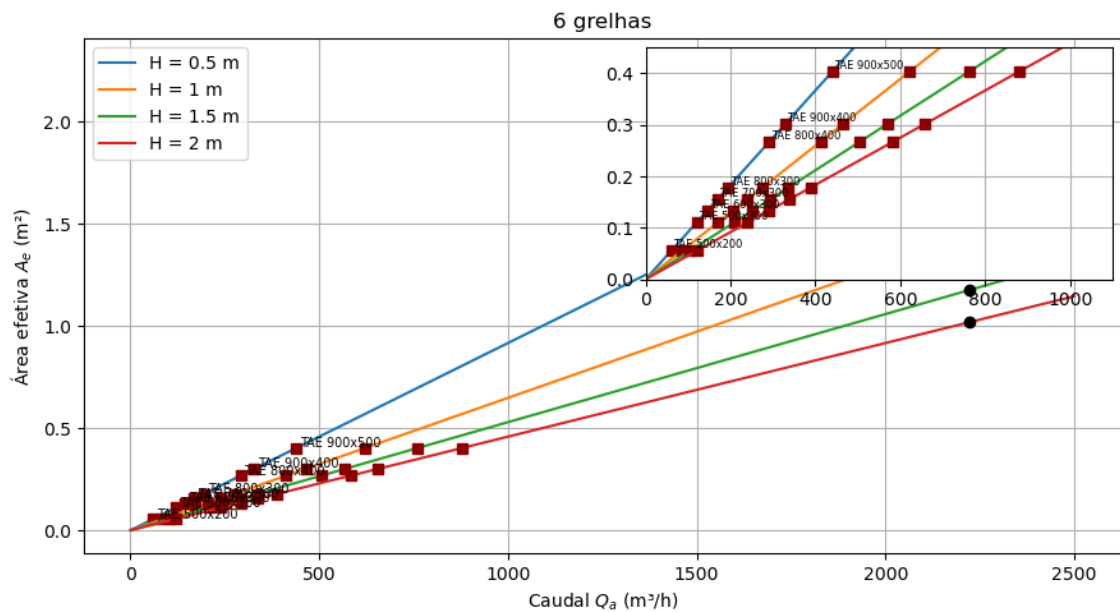


Figura 3.19: Comparação entre as áreas efetivas A_e requeridas e os modelos de grelha TradAir disponíveis (pontos) para diferentes alturas H , para as configurações v0.3.

Tabela 3.4: Configuração das soluções v0.3 e v0.4: área efetiva total, caudal induzido e custo da solução.

		Caudal Q_{ac} [m ³ /h]				Preço [€]
	A_e [m ²]	H = 0,5	H = 1	H = 1,5	H = 2	Total
v0.3 - 6 Grelhas						
TAE 500x200	0,0552	60,19	85,12	104,25	120,38	429,36
TAE 500x300	0,1103	120,27	170,09	208,31	240,54	512,46
TAE 600x300	0,1336	145,68	206,02	252,32	291,35	580,98
TAE 700x300	0,1549	168,90	238,86	292,54	337,80	624,72
TAE 800x300	0,1782	194,31	274,79	336,55	388,61	668,28
TAE 800x400	0,2673	291,46	412,19	504,82	582,92	804,12
TAE 900x400	0,3012	328,42	464,46	568,85	656,85	856,44
TAE 900x500	0,4031	439,53	621,59	761,29	879,01	956,70
v0.4 - 8 Grelhas						
TAE 500x200	0,0735	80,14	113,34	138,81	160,29	572,48
TAE 500x300	0,1471	160,40	226,83	277,81	320,79	683,28
TAE 600x300	0,1782	194,31	274,79	336,55	388,61	774,64
TAE 700x300	0,2065	225,16	318,43	390,00	450,33	832,96
TAE 800x300	0,2376	259,07	366,39	448,73	518,15	891,04
TAE 800x400	0,3564	388,61	549,58	673,10	777,22	1072,16
TAE 900x400	0,4016	437,94	619,34	758,53	875,87	1141,92
TAE 900x500	0,5374	585,97	828,69	1014,93	1171,94	1275,60

Apesar de nenhuma das configurações cumprir integralmente o caudal mínimo necessário, optou-se por dar continuidade à análise das restantes variáveis de projeto — nomeadamente, a eficácia de diluição, a disponibilidade da ventilação, a classificação da zona de emissão e a concentração de gás resultante — com o objetivo de avaliar em que medida estas soluções naturais podem contribuir para a redução do risco global associado à presença de atmosferas potencialmente explosivas.

Entre as configurações avaliadas, a que proporciona o maior caudal induzido

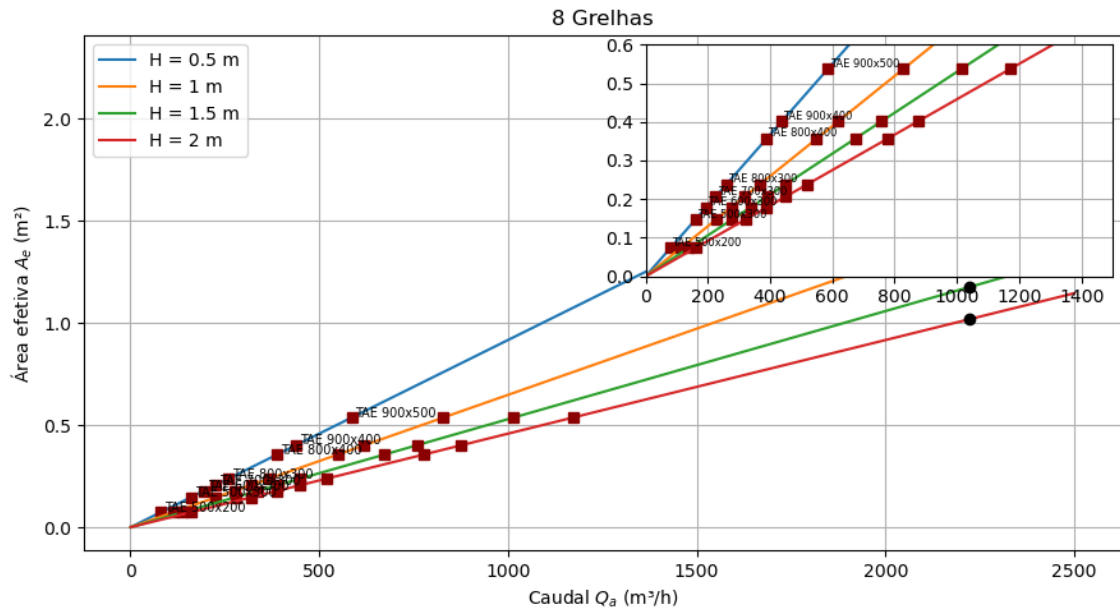


Figura 3.20: Comparação entre as áreas efetivas A_e requeridas e os modelos de grelha TradAir disponíveis (pontos) para diferentes alturas H , para as configurações v0.4.

corresponde à instalação de **v0.4 - TAE 900 × 500**, posicionadas com uma diferença de altura de 2 m, permitindo escoar um caudal total de aproximadamente $1172 \text{ m}^3/\text{h}$. Aplicando a Equação 3.20 e considerando $A = L \times B$, obtém-se uma velocidade média de escoamento igual a:

$$u = 0,0190 \text{ m/s}$$

Este valor foi validado graficamente na Figura 3.21, onde se conclui que a velocidade obtida se insere na gama correspondente a uma diluição média, de acordo com o Gráfico C.1 da norma **IEC 60079-10-1** [9].

Considerando adicionalmente uma disponibilidade de ventilação fraca, devido à variabilidade das condições de temperatura, a classificação da área ventilada corresponde a uma Zona 2, nos termos definidos pela mesma norma.

Embora não seja exigida pela norma para emissões consideradas secundárias, como já referido anteriormente, procedeu-se ainda à verificação da concentração de fundo resultante, com o objetivo de complementar a caracterização do risco e garantir uma avaliação conservadora das condições de operação.

Recorrendo à equação 3.21, e assumindo:

- $f = 1$ – fator de ineficiência da ventilação;
- $Q_g = 6,04 \text{ m}^3/\text{h}$ – caudal de emissão contínua;
- $Q_{ac} = 1171,94 \text{ m}^3/\text{h}$ – caudal de ar garantido pela configuração v0.4 - TAE 900×500 ($H = 2 \text{ m}$).

Substituindo os valores:

$$X_b = \frac{1 \cdot 6,04}{1171,94} = 0,00515 \quad \Rightarrow \quad X_b = 0,515\% \text{ (v/v)}$$

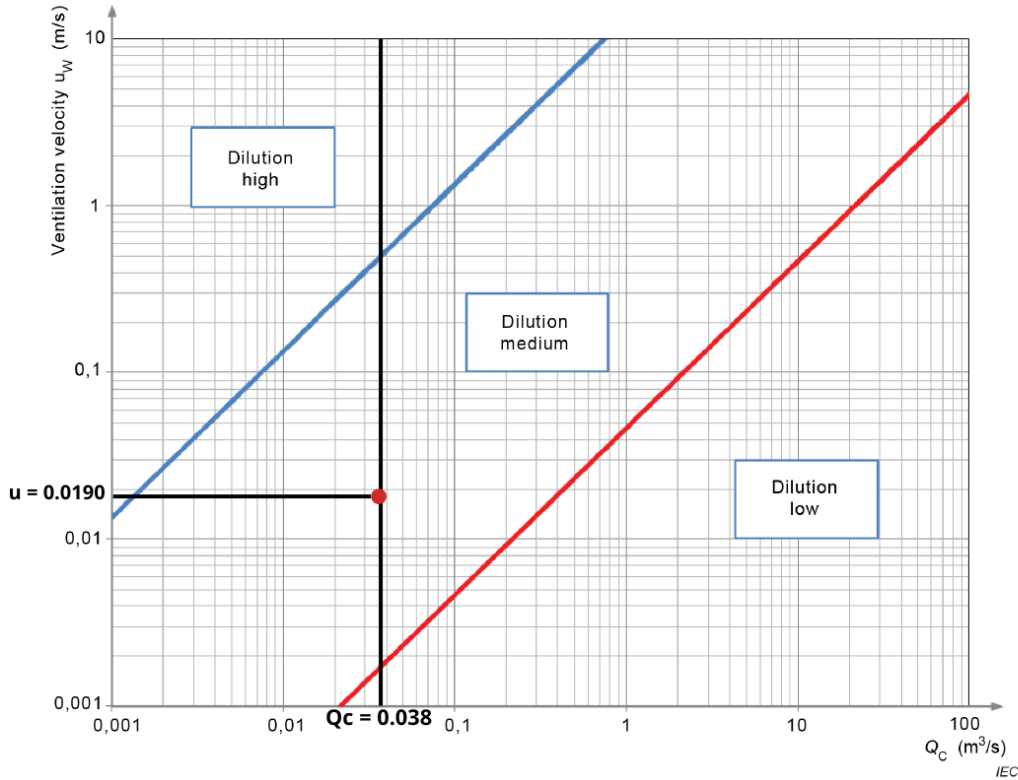


Figura 3.21: Classificação do grau de diluição em função do caudal e da velocidade de escoamento (IEC 60079-10-1, Gráfico C.1).

O valor crítico definido pela norma é:

$$X_{\text{crit}} = 0,25 \cdot \text{LFL}_{\text{H}_2} = 0,25 \cdot 4,0\% = 1,0\% \text{ (v/v)}$$

Comparando os dois valores:

$$X_b = 0,515\% < X_{\text{crit}} = 1,0\%$$

Fica, assim, claro que a solução adotada cumpre os critérios definidos na norma [9], assegurando uma diluição aceitável e uma classificação adequada da zona de risco, apesar de não satisfazer o número mínimo de renovações por hora imposto pela **SYSADVANCE**. Esta limitação deverá ser considerada na fase de projeto detalhado, podendo justificar a integração de ventilação mecânica complementar para garantir os requisitos internos de desempenho definidos pelo fabricante.

3.6 Ventilação Mecânica

Quando a ventilação natural se revela insuficiente para garantir a renovação mínima de ar exigida, torna-se necessário recorrer a ventilação mecânica. O dimensionamento e a análise das soluções adotadas foram realizados com base nos critérios estabelecidos pela norma **IEC 60079-10-1** [9], tendo por objetivo assegurar a segurança do contentor técnico em contextos com risco de atmosferas explosivas.

Neste capítulo são analisadas duas configurações de ventilação mecânica forçada: a primeira baseada na instalação de um ventilador axial mural ATEX; a segunda com recurso a um ventilador de cobertura com descarga vertical. Ambas as soluções

foram projetadas para garantir o caudal mínimo requerido definido na Secção 3.3.7, considerando uma perda de carga de referência de 50 Pa, atribuída exclusivamente à presença de equipamentos no interior do contentor, desconsiderando as perdas induzidas pelas grelhas.

Cada solução foi desenvolvida segundo uma metodologia completa e iterativa, que incluiu: modelação CAD simplificada do contentor e dos componentes de ventilação; seleção técnico-económica dos ventiladores e grelhas de admissão; simulação CFD em regime estacionário, com análise dos campos de velocidade e concentração de hidrogénio; e, por fim, proposta de melhoria da configuração inicial, com nova simulação comparativa.

A avaliação técnica foi orientada por parâmetros críticos definidos na norma, nomeadamente o caudal efetivo, a velocidade média de escoamento, o grau de diluição, a concentração de fundo de hidrogénio e a classificação final da zona de risco.

3.6.1 Simulação CFD

Foi realizada uma simulação CFD para cada uma das soluções de ventilação propostas, utilizando um regime estacionário, com 200 iterações, dado que a simulação transiente se revelou inviável face às limitações de capacidade computacional disponíveis.

O principal objetivo destas simulações foi avaliar o comportamento global do sistema de ventilação, nomeadamente a distribuição dos campos de velocidade e a concentração de hidrogénio no interior do contentor técnico, permitindo uma análise comparativa com os resultados obtidos pelos métodos analíticos definidos na norma IEC 60079-10-1 [9].

A malha foi gerada com recurso ao módulo *ANSYS Meshing*, sendo a sua qualidade condicionada pela versão educacional da plataforma (*ANSYS Student*), que impõe um limite máximo de 1 040 000 elementos. Para garantir uma representação mais precisa das regiões com maior sensibilidade aerodinâmica, foi aplicado *face sizing* nos elementos críticos, com os seguintes tamanhos característicos:

- **Ventilador:** 0,005 m
- **Grelhas de ventilação:** 0,005 m
- **Fuga de hidrogénio:** 0,001 m

Para a modelação do escoamento turbulento, foi adotado o modelo *k*-realizável, em conjugação com a abordagem de parede *Standard Wall Functions* (SWF). Este modelo de turbulência apresenta um bom compromisso entre robustez e eficiência computacional em escoamentos confinados com gradientes significativos, sendo amplamente validado na literatura para simulações em ambiente industrial. A opção pelo modelo SWF justificou-se pela ocorrência de instabilidades numéricas relevantes na fração mássica de hidrogénio quando se aplicou o *Enhanced Wall Treatment* (EWT), com previsões não físicas junto às superfícies sólidas. De acordo com Versteeg e Malalasekera [72], a SWF oferece maior estabilidade em simulações com malhas de resolução limitada nas proximidades das paredes, o que é coerente com a limitação de elementos anteriormente referida. Péraud *et al.* [73] reforçam que a escolha do modelo de parede tem impacto direto na previsão da dispersão de hidrogénio em espaços confinados. A realização prática de simulações com ambos

os modelos confirmou estas observações, tendo a SWF permitido obter resultados fisicamente mais consistentes neste caso específico.

Adicionalmente, foi ativado o modelo de transporte de espécies (*species transport*), de modo a permitir a simulação da dispersão do hidrogénio no interior do contentor.

As geometrias das soluções de ventilação foram modeladas no *SolidWorks* e posteriormente importadas para o *ANSYS Fluent*. A discretização espacial, bem como as condições de fronteira, foram definidas com base nas características específicas de cada configuração, garantindo coerência com os objetivos de avaliação comparativa entre norma e simulação. As condições de fronteira foram implementadas da seguinte forma:

- **Grelhas de ventilação:** definidas como *inlet vent* com coeficiente de perda de carga associado;
- **Ventilador:** definido como *mass flow outlet*, com imposição do caudal de extração correspondente a cada solução;
- **Fuga de hidrogénio:** definida como *mass flow inlet*, com caudal mássico fixo de hidrogénio puro a 25 °C;
- **Restantes superfícies:** definidas como *wall*, sem escoamento nem transferência de massa.

Para os mapas de velocidade e de concentração de hidrogénio, foram definidas escalas fixas, de modo a uniformizar a leitura comparativa entre as diferentes soluções simuladas. A escala de velocidade foi estabelecida entre 0 e 0,02 m/s, pois considerou-se ser uma velocidade aceitável para os requisitos do projeto. Para a concentração de hidrogénio, foi adotada a escala de 0 a 1%, uma vez que este intervalo compreende os valores críticos de interesse normativo, situando-se abaixo do limite inferior de inflamabilidade do hidrogénio em ar.

3.6.2 Modelação CAD

Apesar de se ter acesso ao modelo real do contentor técnico fornecido pela SYSADVANCE, optou-se por desenvolver uma representação geométrica simplificada no *SolidWorks*. Esta decisão teve como principal objetivo reduzir os custos computacionais associados tanto à montagem da solução como ao processo de simulação CFD, facilitando a geração de malhas compatíveis com as limitações da versão educacional do software e permitindo tempos de cálculo mais reduzidos.

Para cada solução proposta, foram modelados o corpo do contentor, o volume interior correspondente e as grelhas de ventilação específicas. Na representação exterior, foram incluídos apenas os elementos geométricos que interferem diretamente na colocação e integração das grelhas de admissão e extração. No volume interior, foram também representadas, de forma simplificada, as colunas de adsorção e as bombas de vácuo, com o objetivo de captar os principais obstáculos à circulação do ar e garantir a coerência física do escoamento simulado. Os desenhos técnicos do contentor base modelado encontram-se representados nas secções [.2](#) e [.3](#) do Apêndice A. Em seguida, foi realizada a montagem final (*assembly*) de cada configuração,

assegurando a continuidade entre superfícies, a correta sobreposição de volumes e a representatividade funcional da geometria adotada.

Os modelos CAD resultantes foram posteriormente exportados em formato compatível com o *ANSYS Fluent*, assegurando a integridade dos volumes e superfícies relevantes para a malha e para a aplicação das condições de fronteira.

3.6.3 Solução 1 - Ventilador Axial

Apresentação da Solução

A solução base (**v1.0**) contempla a instalação de um ventilador axial ATEX na parte superior da parede lateral do contentor, centrado em relação ao volume interior e localizado na fachada oposta ao muro existente. Como complemento à ventilação mecânica, pretende-se integrar duas grelhas TradAir do modelo **TAE**, de pequenas dimensões, na base da fachada oposta à do ventilador, com o objetivo de assegurar a admissão de ar fresco, promover um varrimento transversal eficaz ao longo do volume útil e reduzir a ocorrência de recirculações e zonas mortas.

A representação tridimensional desta configuração encontra-se ilustrada na Figura 3.22, sendo que o desenho técnico respetivo se encontra representado na secção 4 do Apêndice A.

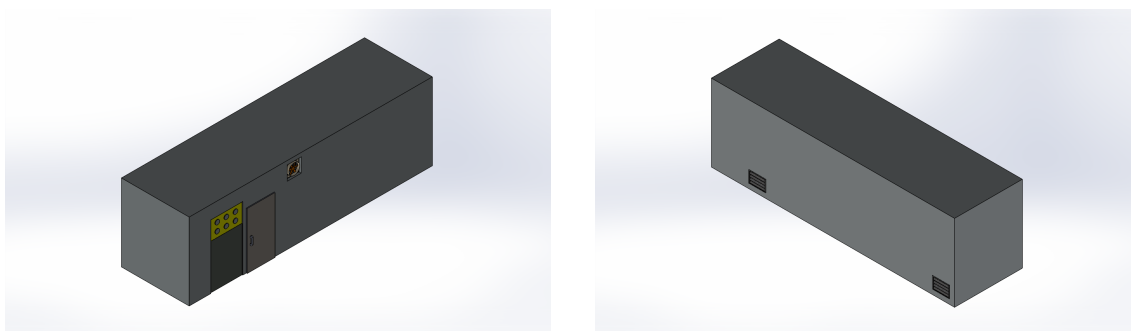


Figura 3.22: Vistas isométricas da solução **v1.0**.

Dimensionamento Analítico da Solução

Como explicado na Secção 3.3.7, o caudal mínimo de ventilação exigido é de $Q_a = 2223 \text{ m}^3/\text{h}$.

Considerando a presença de duas grelhas de admissão de ar fresco, cada unidade deve assegurar aproximadamente metade deste valor, ou seja, cerca de $1111,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Admitindo-se uma tolerância operacional de $\pm 10\%$, o intervalo de funcionamento aceitável por grelha situa-se entre $1000,4 \text{ m}^3/\text{h}$ e $1222,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

A Tabela 3.5 apresenta os modelos TradAir TAE de menor dimensão e custo unitário que satisfazem o intervalo de caudal admissível definido para esta solução. São incluídas, para cada modelo, a respetiva área efetiva, a gama de caudais suportados, as perdas de carga associadas ao seu funcionamento e o preço unitário de fornecimento.

Com base nas exigências de caudal e nas perdas de carga estimadas para cada configuração, procedeu-se à seleção do ventilador axial ATEX mais adequado recorrendo ao software *SODECA QuickFan Selector*. A análise apontou como solução

Tabela 3.5: Modelos TradAir TAE compatíveis com a solução **v1.0**, considerando um caudal de referência por grelha de $Q_{\text{grelha}} = 1111,5 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.

Modelo	Área efetiva [m ²]	Caudal [m ³ /h]	Δp [Pa]	Preço [€]
TAE 500 × 400	0,078	281 – 1684	25	99,31
TAE 500 × 500	0,104	375 – 2246	13	113,40
TAE 600 × 300	0,063	226 – 1354	40	96,83
TAE 600 × 400	0,094	339 – 2031	16	112,07
TAE 600 × 500	0,125	452 – 2709	8	125,44
TAE 700 × 300	0,073	265 – 1586	28	104,12
TAE 700 × 400	0,110	397 – 2379	11	124,38
TAE 700 × 500	0,147	529 – 3172	5	140,86

tecnicamente mais apropriada um modelo da gama **HCDF/ATEX**, compatível com instalação mural direta e certificado segundo a Diretiva 2014/34/EU [8] para atmosferas potencialmente explosivas, cuja ficha técnica se encontra representada na secção [18] do Anexo B.

A Tabela [3.6] apresenta as diferentes configurações de grelhas TradAir TAE consideradas nesta solução, incluindo os respetivos modelos de ventilador axial ATEX compatíveis, o preço unitário de cada ventilador, a perda de carga total estimada para o sistema e o custo global da solução de ventilação.

Tabela 3.6: Ventiladores axiais selecionados para a solução **v1.0**, indicando a perda de carga total do sistema, o preço unitário de cada ventilador e o custo total da solução.

Configuração	Δp_{total} [Pa]	Modelo de ventilador	Preço do ventilador [€]	Preço total [€]
TAE 500 × 400	75	HCDF-45-4T/2G ex db	1678,10	1876,72
TAE 500 × 500	63	HCDF-40-4T/2G ex db	1534,65	1761,45
TAE 600 × 300	90	HCDF-45-4T/2G ex db	1678,10	1871,76
TAE 600 × 400	66	HCDF-40-4T/2G ex db	1534,65	1758,79
TAE 600 × 500	58	HCDF-40-4T/2G ex db	1534,65	1785,53
TAE 700 × 300	78	HCDF-45-4T/2G ex db	1678,10	1886,34
TAE 700 × 400	61	HCDF-40-4T/2G ex db	1534,65	1783,41
TAE 700 × 500	55	HCDF-40-4T/2G ex db	1534,65	1816,37

Entre as opções viáveis, a configuração composta pelas grelhas **TAE 600 × 400**, cujo desenho técnico se encontra representado na secção [5] do Apêndice A, e pelo ventilador **HCDF-40-4T/2G** revelou-se a mais económica, com um custo total de **1758,79 €** e uma perda de carga total de $\Delta P = 66$ Pa.

Tal como os restantes modelos da gama HCDF, este ventilador opera a velocidade constante, sendo o seu ponto de funcionamento determinado pela interseção entre a curva característica do ventilador e a curva do sistema. Para a configuração considerada, a simulação no *SODECA QuickFan Selector* indicou um ponto de equilíbrio hidráulico com caudal efetivo de $Q = 2311 \text{ m}^3/\text{h}$ e pressão estática de 71,32 Pa, conforme ilustrado na Figura [3.23].

Desenvolvimento

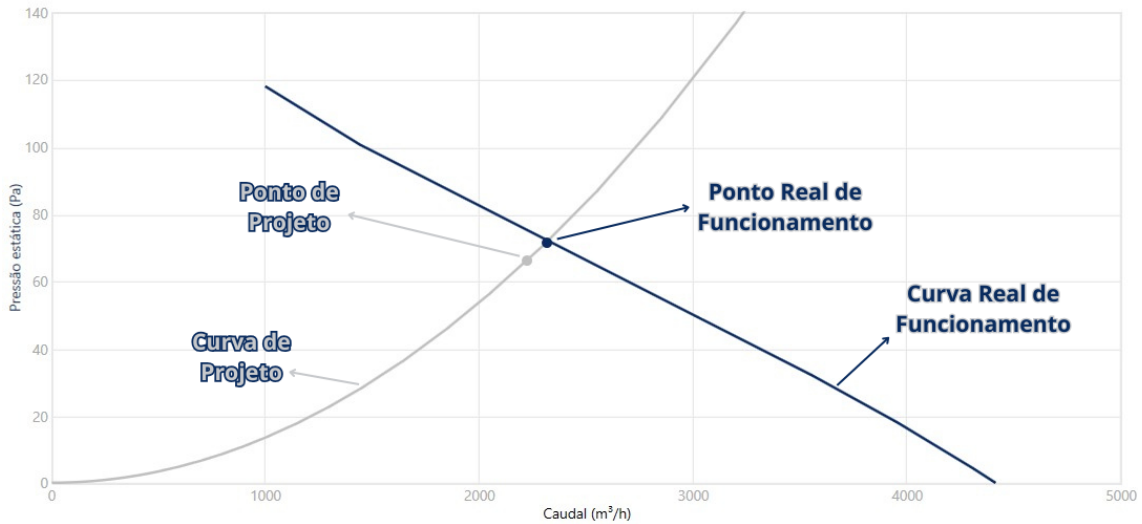


Figura 3.23: Ponto de funcionamento real do ventilador HCDF-40-4T/2G para a configuração com grelhas TAE 600 × 400.

Este caudal, correspondente a $Q = 0,6419 \text{ m}^3/\text{s}$, é distribuído ao longo da área frontal do contentor, calculada a partir da sua secção transversal como $A = 2,6 \times 7,6 = 19,76 \text{ m}^2$, resultando, segundo a equação 3.20, numa velocidade média de escoamento de $u = 0,0324 \text{ m/s}$. Segundo o Gráfico C.1 da norma IEC 60079-10-1 [9], esta velocidade é compatível com um grau de diluição médio, como se pode observar na figura 3.24.

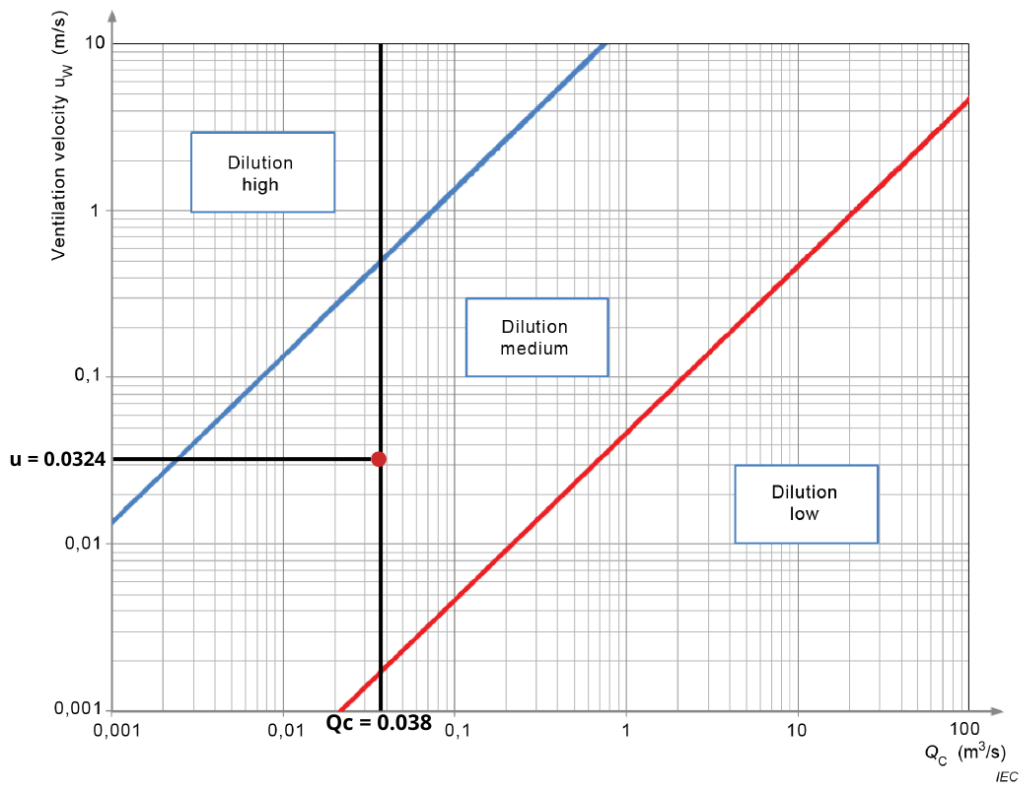


Figura 3.24: Classificação do grau de diluição (Gráfico C.1, IEC 60079-10-1) - v1.0.

Adicionalmente, uma vez que a ventilação é assegurada por um ventilador mecânico de funcionamento contínuo, considera-se uma disponibilidade forte. Combinando este parâmetro com a diluição média obtida e com o facto de a libertação de gás ser secundária, conclui-se, com base na Tabela B.1 da norma **IEC 60079-10-1** [9], que a zona deve ser classificada como:

Zona 2

Aplicando a equação 3.21 e assumindo um fator de ineficiência da ventilação de $f = 1$, estima-se uma concentração de fundo de hidrogénio de $X_b = 0,261\%$ para esta configuração. Este valor encontra-se abaixo do limite crítico definido pela norma, ou seja, $X_b = 0,261\% < X_{crit} = 1,0\%$, confirmando o cumprimento do critério de segurança aplicável.

Simulação CFD da Solução

As Figuras 3.25 e 3.26 apresentam o mapa de velocidades médias no interior do contentor, à cota do ventilador e das grelhas, respetivamente. A Figura 3.27 mostra a distribuição da fração mássica de hidrogénio, considerando uma fuga na flange de uma coluna de adsorção, na situação menos favorável.

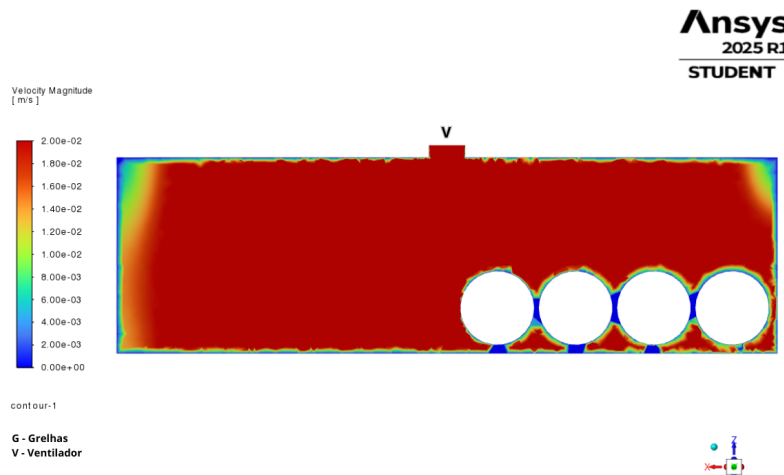


Figura 3.25: Corte horizontal (xz) à cota do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar – v1.0.

Proposta de Melhoria da Solução

Apesar de a solução v1.0 garantir um caudal de ventilação suficiente e assegurar um grau de diluição compatível com a norma IEC 60079-10-1, a simulação CFD evidencia limitações relevantes na distribuição do escoamento, nomeadamente zonas mortas junto ao teto e nos cantos superiores do contentor, bem como um escoamento não homogéneo na parte central da cota inferior. Este comportamento pode resultar da geometria compacta das grelhas TAE 600×400 utilizadas, que, embora dimensionadas para o caudal requerido, induzirão velocidades locais elevadas e trajetórias preferenciais, podendo comprometer a eficácia da renovação do ar.

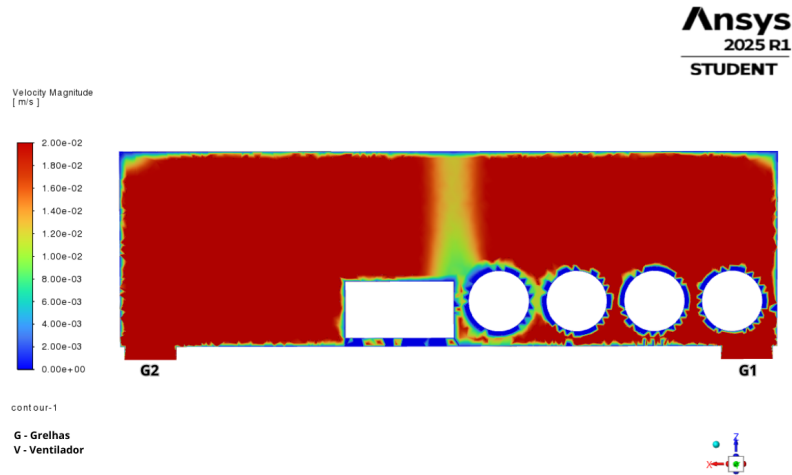


Figura 3.26: Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar – v1.0.

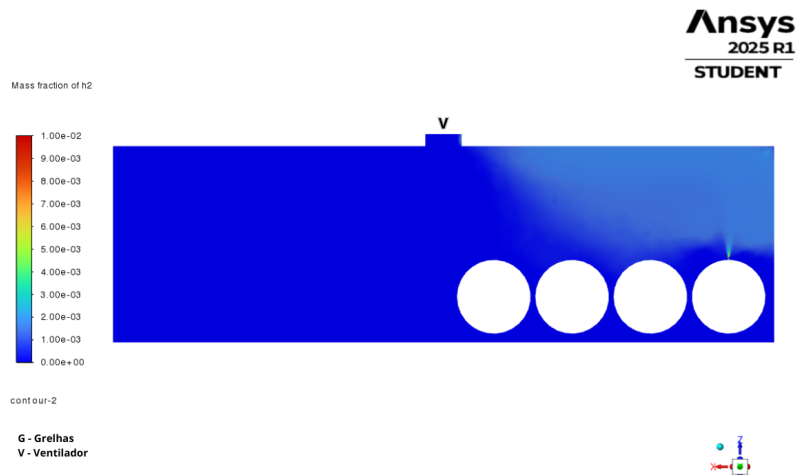


Figura 3.27: Corte horizontal (xz) à cota da fuga – Concentração média de H_2 – v1.0.

Com intenção de melhorar o escoamento do ar, será adotada uma alternativa **v1.1** baseada na manutenção das duas grelhas existentes e na adição de uma terceira grelha TradAir TAE, posicionada sensivelmente a meio do comprimento do contentor. Esta nova grelha de admissão será instalada igualmente na base da fachada oposta ao ventilador, com o objetivo de reforçar o varrimento na região central do volume interior e obter uma distribuição mais homogênea da velocidade, sem necessidade de alterar o ventilador ou comprometer o equilíbrio orçamental da instalação.

Para implementar a solução com três grelhas de admissão (**v1.1**), será necessário redimensionar a configuração com base no caudal total de ventilação exigido e nos custos associados. O caudal total de admissão, de $Q_a = 2223 \text{ m}^3/\text{h}$, será desta vez distribuído por três grelhas, o que corresponde a um caudal médio de aproximadamente $741 \text{ m}^3/\text{h}$ por grelha. Considerando uma margem de tolerância de $\pm 10\%$, cada grelha deverá garantir um caudal dentro do intervalo admissível de $[666,9; 815,1] \text{ m}^3/\text{h}$.

A Tabela 3.7 apresenta os modelos TradAir TAE compatíveis com o intervalo de funcionamento definido para esta solução, incluindo a área efetiva de cada grelha, a gama de caudais admissíveis, as perdas de carga associadas e os respetivos preços unitários de fornecimento.

Recorrendo ao *SODECA QuickFan Selector*, procedeu-se então à seleção do ventilador ATEX mais adequado para cada caso.

A Tabela 3.8 sintetiza os resultados obtidos, indicando o modelo selecionado, o seu preço unitário, a perda de carga total e o custo total da solução.

Tabela 3.7: Modelos TradAir TAE compatíveis com a solução v1.1, considerando um caudal de referência por grelha de $Q_{\text{grelha}} = 741,0 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.

Modelo	Área efetiva [m ²]	Caudal [m ³ /h]	Δp [Pa]	Preço [€]
TAE 500 × 400	0,078	281 – 1684	10	99,31
TAE 500 × 500	0,104	375 – 2246	5	113,40
TAE 600 × 300	0,063	226 – 1354	16	96,83
TAE 600 × 400	0,094	339 – 2031	6	112,07
TAE 600 × 500	0,125	452 – 2709	3	125,44
TAE 700 × 300	0,073	265 – 1586	11	104,12
TAE 700 × 400	0,110	397 – 2379	4	124,38
TAE 700 × 500	0,147	529 – 3172	1	140,86

Tabela 3.8: Ventiladores axiais selecionados para a solução v1.1, indicando a perda de carga total do sistema, o preço unitário de cada ventilador e o custo total da solução.

Configuração	Δp_{total} [Pa]	Modelo de ventilador	Preço do ventilador [€]	Preço total [€]
TAE 500 × 400	60	HCDF-40-4T/2G ex db	1534,65	1832,58
TAE 500 × 500	55			1874,85
TAE 600 × 300	66			1825,14
TAE 600 × 400	56			1870,86
TAE 600 × 500	53			1919,97
TAE 700 × 300	61			1847,01
TAE 700 × 400	54			1907,79
TAE 700 × 500	51			1957,23

Analisando os resultados apresentados na Tabela 3.8, constata-se que a configuração com três grelhas TradAir TAE 600×300, cujo desenho técnico se encontra representado na secção .6 do Apêndice A, representa a opção mais económica, com um custo total estimado de 1825,14 €. Esta solução permitirá garantir a compatibilidade com o intervalo de caudal admissível por grelha e recorrerá ao mesmo ventilador axial ATEX selecionado para a configuração base.

Para esta configuração, a perda de carga total do sistema será de 66 Pa, o que conduzirá a um ponto de funcionamento do ventilador de projeto igual a $Q = 2311 \text{ m}^3/\text{h}$ e $P_e = 71,32 \text{ Pa}$. Curiosamente, este ponto coincidirá exatamente com o ponto de

funcionamento real obtido na solução **v1.0**, o que implica que os parâmetros de desempenho global da ventilação permanecerão inalterados. A velocidade média do escoamento será, assim, de $u_w = 0,0324$ m/s e a concentração de fundo de hidrogénio será $X_b = 0,261\%$. Desta forma, a nova configuração permitirá atingir os mesmos resultados teóricos em termos de diluição e renovação do ar, com uma melhoria esperada na homogeneidade do escoamento.

Mais uma vez, foi realizada a modelação CAD da solução **v1.1**, representada na Figura 3.28, cujo desenho técnico se encontra representado na secção 7 do Apêndice A, e efetuada a simulação CFD correspondente, cujos resultados gráficos se encontram apresentados nas Figuras 3.29, 3.31 e 3.31.



Figura 3.28: Vistas isométricas da solução **v1.1**.

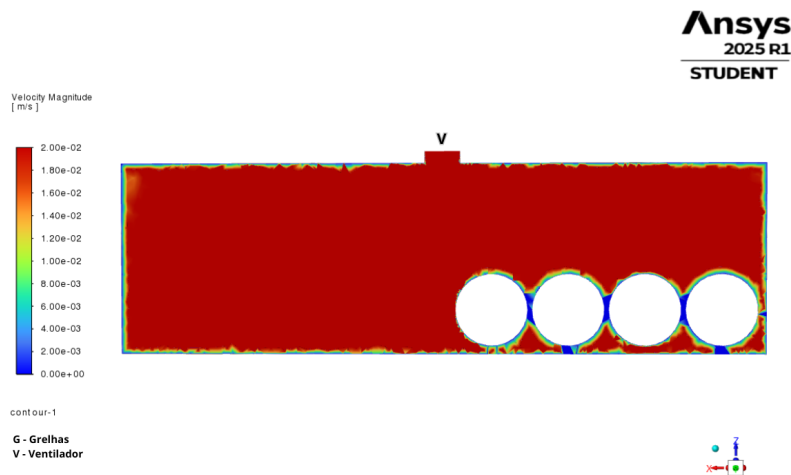


Figura 3.29: Corte horizontal (xz) à cota do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar – v1.1.

A análise dos mapas de velocidade e de concentração de hidrogénio revelou que a introdução de uma terceira grelha de admissão, com posterior otimização do seu modelo, contribuiu decisivamente para a resolução das limitações anteriormente identificadas. Verificou-se uma melhoria significativa na homogeneidade do escoamento, com varrimento eficaz ao longo do volume interior, incluindo a região central do contentor. As linhas de corrente tornaram-se mais uniformes, reduzindo a ocorrência de zonas de estagnação na base e entre os equipamentos. Adicionalmente, as zonas superiores laterais — anteriormente críticas para a acumulação de hidrogénio —

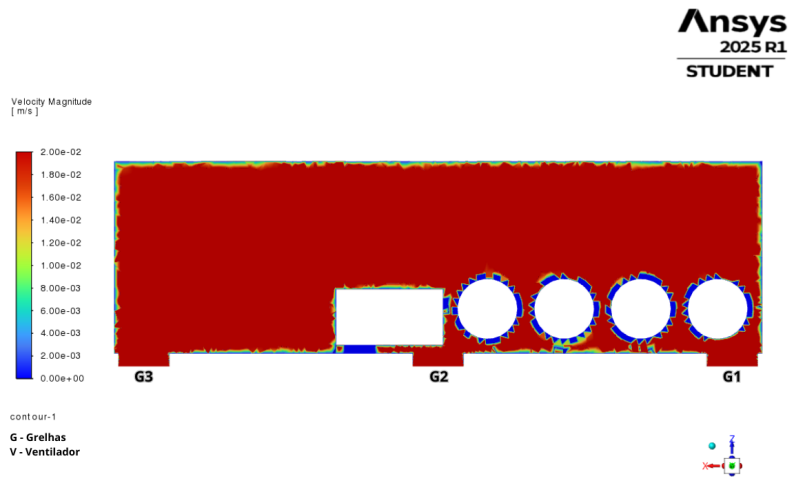


Figura 3.30: Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar – v1.1.

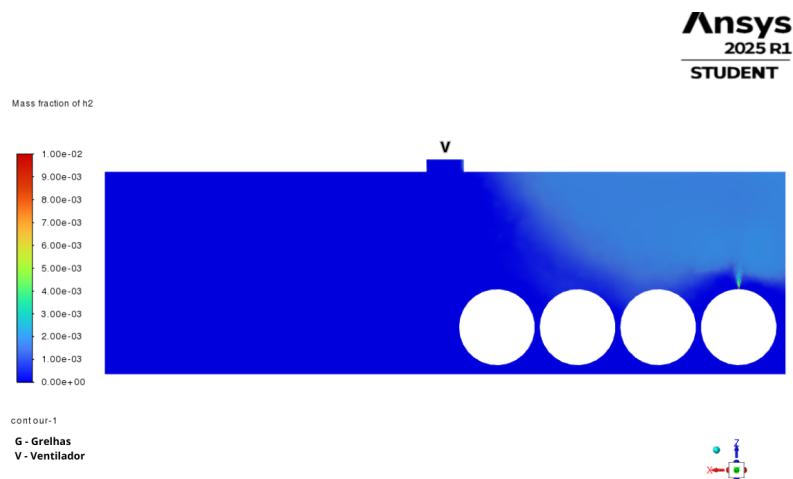


Figura 3.31: Corte horizontal (xz) à cota da fuga – Concentração média de H_2 – v1.1.

passaram a apresentar velocidades de escoamento adequadas, eliminando as zonas mortas detetadas nas simulações iniciais.

Com base na análise técnico-económica, optou-se definitivamente pela solução composta por **três grelhas TradAir TAE 600×300**, que garante uma ventilação adequada e um custo competitivo. Esta configuração permitiu manter o ventilador axial ATEX previamente selecionado — modelo **HCDF-40-4T/2G** —, operando no mesmo ponto de funcionamento da solução base: $Q = 2311 \text{ m}^3/\text{h}$ e $\Delta P = 71,32 \text{ Pa}$. A solução final adotada assegura, assim, uma ventilação eficaz, robusta e bem distribuída, satisfazendo plenamente os critérios de diluição, renovação de ar e segurança em contexto ATEX.

3.6.4 Solução 2 - Ventilador de Cobertura

Apresentação da Solução

A segunda solução **v2.0** contempla a instalação de um ventilador de cobertura, posicionado na parte superior central do contentor técnico. O objetivo principal consiste em promover um escoamento ascendente do ar, assegurando a extração eficaz de eventuais acumulações de hidrogénio nas zonas superiores do volume confinado.

Complementarmente, será assegurada a ventilação natural por via da integração de quatro grelhas TradAir modelo TAE, dispostas simetricamente nas faces laterais inferiores do contentor — duas grelhas em cada fachada. Esta configuração visa induzir um varrimento vertical contínuo, forçando a entrada de ar fresco pelas grelhas inferiores e a sua extração pelo ventilador de cobertura instalado no topo.

A solução foi concebida para tirar partido do menor peso molecular do hidrogénio, promovendo a ascensão natural do gás e garantindo que o escoamento forçado atua sobre as zonas críticas, como as flanges das colunas de adsorção. A representação tridimensional da solução **v2.0** encontra-se ilustrada na Figura 3.32, sendo que o seu desenho técnico se encontra representado na secção 8 do Apêndice A.

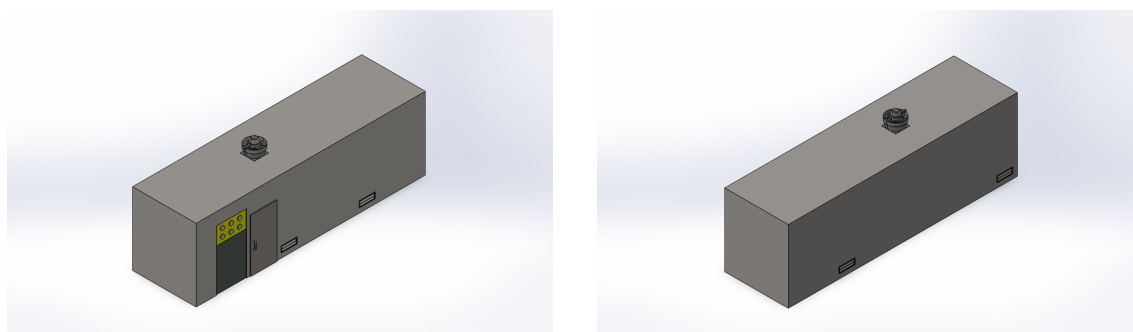


Figura 3.32: Vistas isométricas da solução **v2.0**.

Dimensionamento Analítico da Solução

Tal como definido na Secção 3.3.7, o caudal mínimo exigido para garantir a ventilação segura do contentor técnico é de $Q_a = 2223 \text{ m}^3/\text{h}$. Como esta solução utiliza quatro grelhas TAE, cada unidade deve assegurar, em média, $555,75 \text{ m}^3/\text{h}$. Considerando uma tolerância de $\pm 10\%$, o intervalo admissível para cada grelha situa-se entre $500,2 \text{ m}^3/\text{h}$ e $611,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

A tabela 3.9 mostra os modelos TAE da TradAir que satisfazem este intervalo, bem como as perdas de carga associadas e os preços referentes a quatro unidades.

Com base nos requisitos de caudal e nas perdas de carga previstas, foi selecionado, através do software *SODECA QuickFan Selector*, um modelo da gama **CVT/ATEX**, cuja ficha técnica se encontra representada na secção 19 do Anexo B. Este modelo, com descarga vertical e campânula protetora, é adequado para instalação em cobertura e encontra-se certificado segundo a Diretiva 2014/34/EU 8 para atmosferas potencialmente explosivas (Zona 2, Categoria 2G).

A Tabela 3.10 apresenta as diferentes dimensões de grelhas TradAir TAE consideradas, juntamente com os respetivo modelo de ventilador compatível, as perdas de carga totais associadas e o custo global da solução.

Tabela 3.9: Modelos TradAir TAE compatíveis com a solução **v2.0**, considerando um caudal de referência por grelha de $Q_{\text{grelha}} = 555,75 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.

Modelo	Área efetiva [m ²]	Caudal [m ³ /h]	Δp [Pa]	Preço [€]
TAE 500 × 300	0,052	188 – 1123	13	85,41
TAE 500 × 400	0,078	281 – 1684	5	99,31
TAE 600 × 200	0,031	113 – 677	40	81,99
TAE 600 × 300	0,063	226 – 1354	8	96,83
TAE 600 × 400	0,094	339 – 2031	3	112,07
TAE 600 × 500	0,125	452 – 2709	1	125,44
TAE 700 × 300	0,073	265 – 1586	5	104,12
TAE 700 × 400	0,110	397 – 2379	1	124,38

Tabela 3.10: Ventilador de Cobertura selecionado para a solução **v2.0**, indicando a perda de carga total do sistema, o preço unitário de cada ventilador e o custo total da solução.

Configuração	Δp_{total} [Pa]	Modelo de ventilador	Preço do ventilador [€]	Preço total [€]
TAE 500 × 300	63	CVT/ATEX 250-4T/2G Ex db	2191,10	2532,74
TAE 500 × 400	55			2588,34
TAE 600 × 200	90			2519,06
TAE 600 × 300	58			2578,42
TAE 600 × 400	53			2639,38
TAE 600 × 500	51			2692,86
TAE 700 × 300	55			2607,58
TAE 700 × 400	51			2688,62

Entre as configurações analisadas, a combinação composta por quatro grelhas TradAir TAE 600 × 200, cujo desenho técnico se encontra representado na secção [.9](#) do Apêndice A, e pelo ventilador CVT/ATEX-250-4T/2G Ex db revelou-se a mais económica, apresentando um custo total de **2519,06 €** e uma perda de carga total de $\Delta P = 90 \text{ Pa}$.

O ventilador selecionado opera a velocidade constante, sendo o ponto de funcionamento determinado pela interseção entre a curva característica do ventilador e a curva do sistema. Para a configuração selecionada, o *SODECA QuickFan Selector* indica um ponto de equilíbrio com um caudal efetivo de $Q_a = 2653 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma pressão estática de 128,2 Pa, conforme representado na figura [3.33](#).

Este caudal, correspondente a $Q_a = 0,7369 \text{ m}^3/\text{s}$, origina um escoamento predominantemente ascendente no interior do contentor. Considerando uma secção útil de passagem vertical definida pela altura e comprimento internos do volume ($H \times B = 7,6 \times 2,25 = 17,1 \text{ m}^2$), e aplicando a equação [3.20](#), obtém-se uma velocidade média de escoamento de $u = 0,0431 \text{ m/s}$.

Segundo o Gráfico C.1 da norma **IEC 60079-10-1**, esta velocidade é compatível com um grau de diluição médio, como se pode observar na figura [3.34](#).

Uma vez que a ventilação é mecânica e contínua, considera-se uma disponibili-

Desenvolvimento

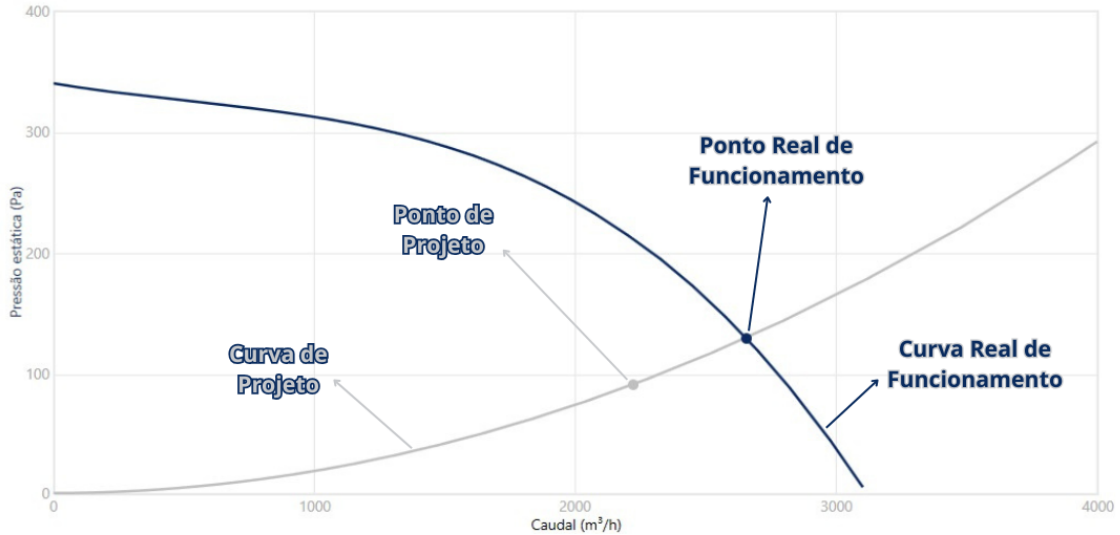


Figura 3.33: Ponto de funcionamento real do ventilador CVT/ATEX-250-4T/2G Ex db para $Q_{Min} = 2223 \text{ m}^3/\text{h}$ e $\Delta P = 90 \text{ Pa}$.

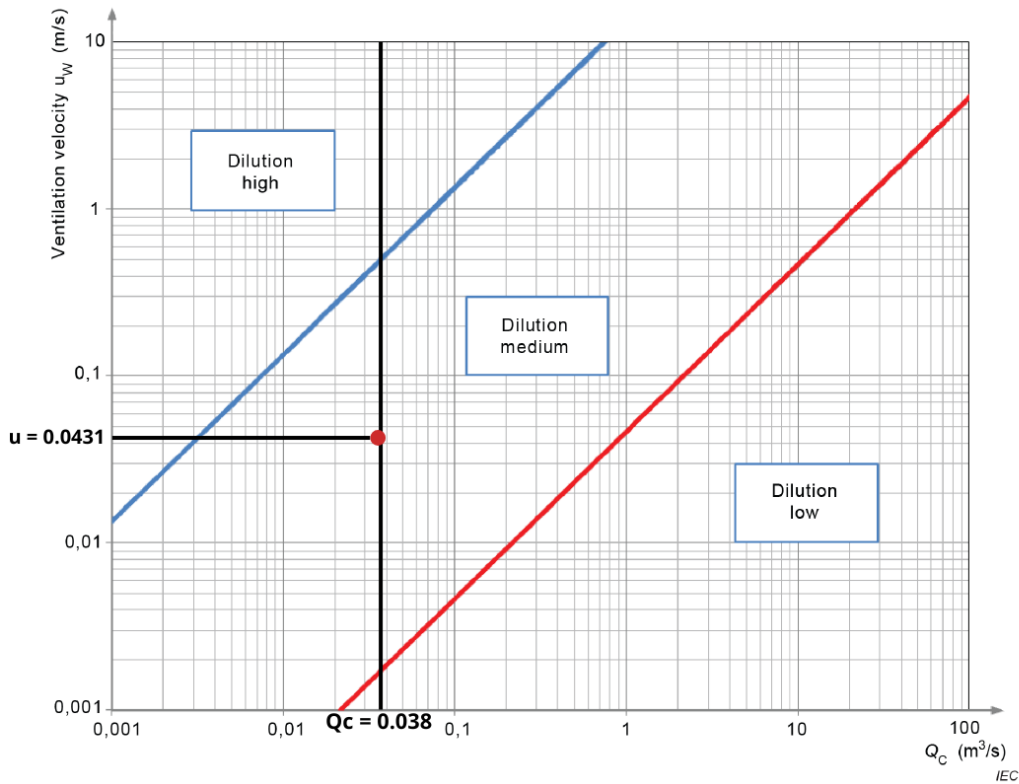


Figura 3.34: Classificação do grau de diluição (Gráfico C.1, IEC 60079-10-1) - **v2.0**.

dade forte. Combinando esta disponibilidade com a diluição média obtida e o facto de a libertação de gás ser secundária, a zona de risco é classificada como:

Zona 2

Com recurso à equação [3.21](#), e considerando um fator de ineficiência da ventilação de $f = 1$, obtém-se, para esta solução, uma concentração de fundo de hidrogénio de $X_b = 0,227\%$. Comparando este valor com o limite crítico estabelecido pela norma,

conclui-se que $X_b = 0,227\% < X_{crit} = 1,0\%$, satisfazendo o critério de segurança exigido.

Simulação CFD da Solução

As figuras 3.35, 3.36, 3.37 e 3.38 ilustram, por esta ordem: (i) o corte horizontal (plano xz) à cota superior do contentor; (ii) o corte horizontal (plano xz) à cota das grelhas; (iii) o corte vertical longitudinal (plano xy) coincidente com o eixo do ventilador — todos com o campo de velocidades da solução **v2.0**; e (iv) o corte horizontal (plano xz) à cota da fuga, com o mapa de concentração de H_2 .

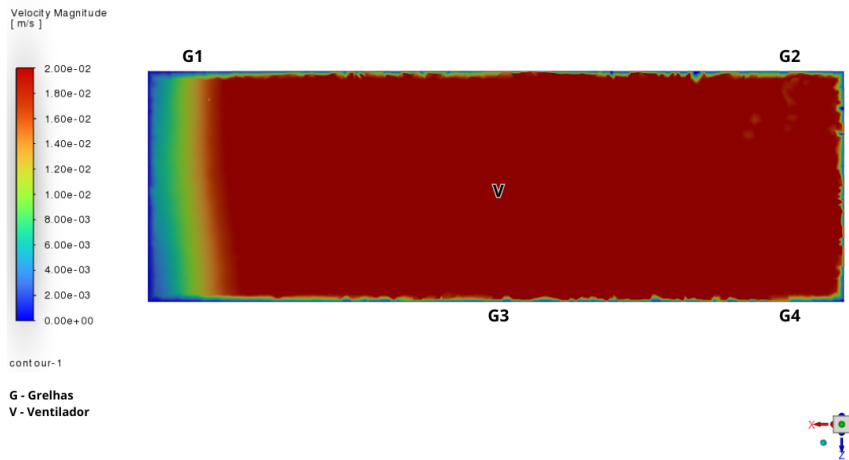


Figura 3.35: Corte horizontal (xz) à cota superior do contentor - Distribuição da velocidade média do ar – v2.0.

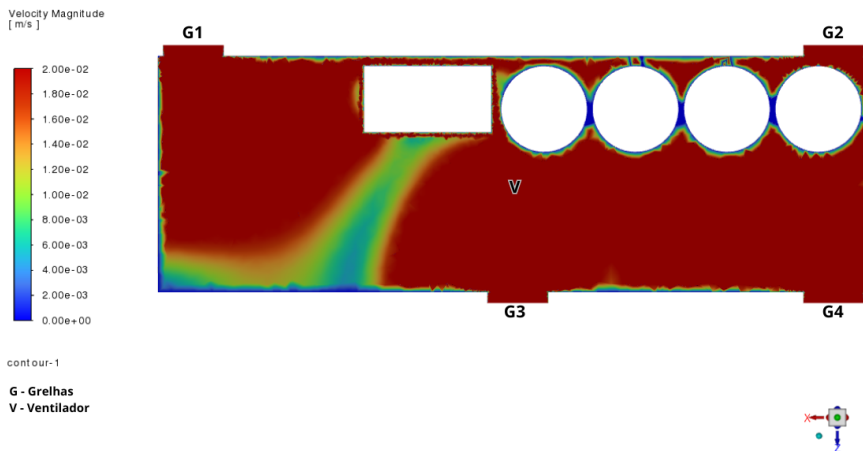


Figura 3.36: Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar – v2.0.

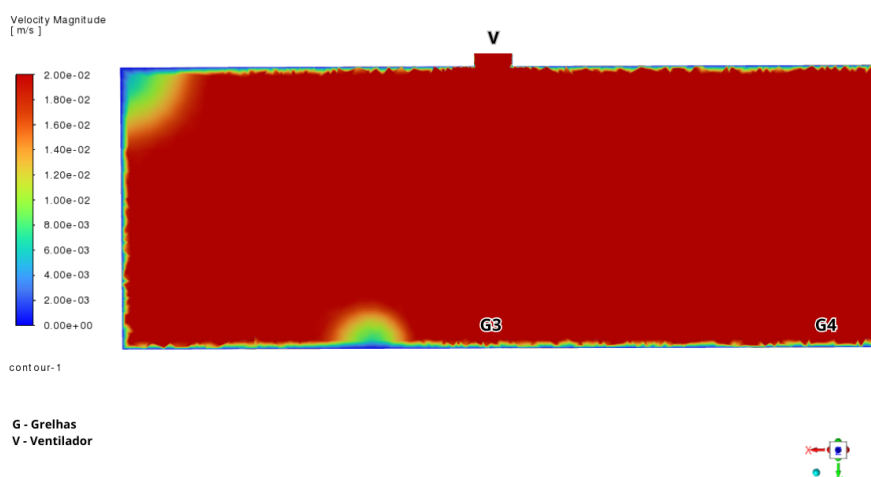


Figura 3.37: Corte vertical (xy) longitudinal ao eixo do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar – v2.0.



Figura 3.38: Corte horizontal (xz) à cota da fuga - Concentração média de H₂ – v2.0.

Proposta de Melhoria da Solução

A análise dos resultados obtidos por simulação CFD permitiu identificar uma zona morta na parte superior esquerda do contentor, localizada sensivelmente acima da grelha G1. Tal comportamento é atribuído à posição da grelha G3, instalada ao centro da fachada devido às condicionantes construtivas já referidas no capítulo [3.6.2](#), o que compromete a ventilação homogénea dentro do contentor.

De modo a tentar resolver esta limitação, será implementada uma nova configuração **v2.1** com apenas duas grelhas de admissão, posicionadas nos extremos inferiores das fachadas (G1 e G4), substituindo as quatro grelhas anteriormente distribuídas. A escolha incidirá sobre modelos com maior área efetiva de admissão, de forma a

garantir um caudal mais elevado por unidade e promover um varrimento ascendente mais eficaz ao longo do volume interior.

A análise do catálogo da TradAir revelou que o modelo TAE 700×500, cujo desenho técnico se encontra representado na secção [.10](#) do Apêndice A, apresenta uma área efetiva aproximadamente 2,66 vezes superior à combinada de duas grelhas TAE 600×200, com um custo global cerca de 4 euros inferior. Esta solução **v2.1** permite, assim, reduzir o número de componentes, simplificar a instalação e potencialmente reforçar o desempenho da ventilação, sem comprometer a viabilidade económica. Considerando, mais uma vez, um caudal mínimo de ventilação de $Q = 2223 \text{ m}^3/\text{h}$, cada grelha deverá assegurar aproximadamente $Q_{\text{grelha}} = 1111,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabela 3.11: Especificações técnicas do modelo TAE 500×700, para $Q_{\text{grelha}} = 1111,5 \pm 10\% \text{ m}^3/\text{h}$.

Modelo	Área efetiva [m ²]	Caudal [m ³ /h]	Δp [Pa]	Preço [€]
TAE 500 × 700	0,156	562 – 3369	5	160,17

Neste regime, as grelhas TAE 700×500 impõem uma perda de carga individual de apenas 5 Pa, como se pode observar na tabela [3.11](#), resultando numa perda de carga total estimada de $\Delta P_{\text{total}} = 55 \text{ Pa}$. Com base nestes dados, e recorrendo ao *SODECA QuickFan Selector*, verifica-se que o ventilador CVT/ATEX selecionado operará com um caudal efetivo de $Q = 2816 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma pressão disponível de $\Delta P = 88,25 \text{ Pa}$.

Aplicando a equação [3.20](#), obtém-se uma velocidade média de escoamento de $u_w = 0,045 \text{ m/s}$. Por sua vez, recorrendo à equação [3.21](#) e considerando um fator de ineficiência de ventilação $f = 1$, estima-se uma concentração de fundo de hidrogénio de $X_b = 0,214\%$.

A representação tridimensional desta solução (**v2.1**) está representada na figura [3.39](#), sendo que o seu desenho técnico se encontra representado na secção [.11](#) do Apêndice A.

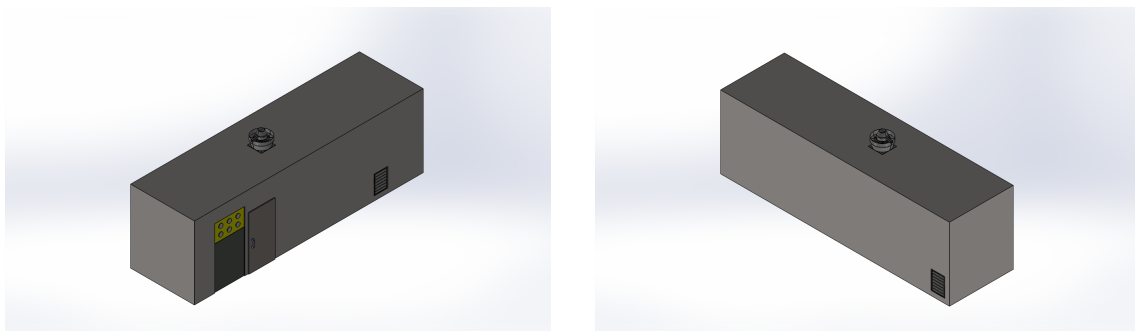


Figura 3.39: Vistas isométricas da solução **v2.1**.

As figuras [3.40](#), [3.41](#), [3.42](#) e [3.43](#) ilustram, por esta ordem: (i) o corte horizontal (plano xz) à cota superior do contentor; (ii) o corte horizontal (plano xz) à cota das grelhas; (iii) o corte vertical longitudinal (plano xy) coincidente com o eixo do ventilador — todos com o campo de velocidades da solução **v2.1**; e (iv) o corte horizontal (plano xz) à cota da fuga, com o mapa de concentração de H_2 .

Com base na análise comparativa dos mapas de velocidade obtidos para as versões 2.0 e 2.1 da configuração de ventilação, observa-se uma melhoria clara no desem-

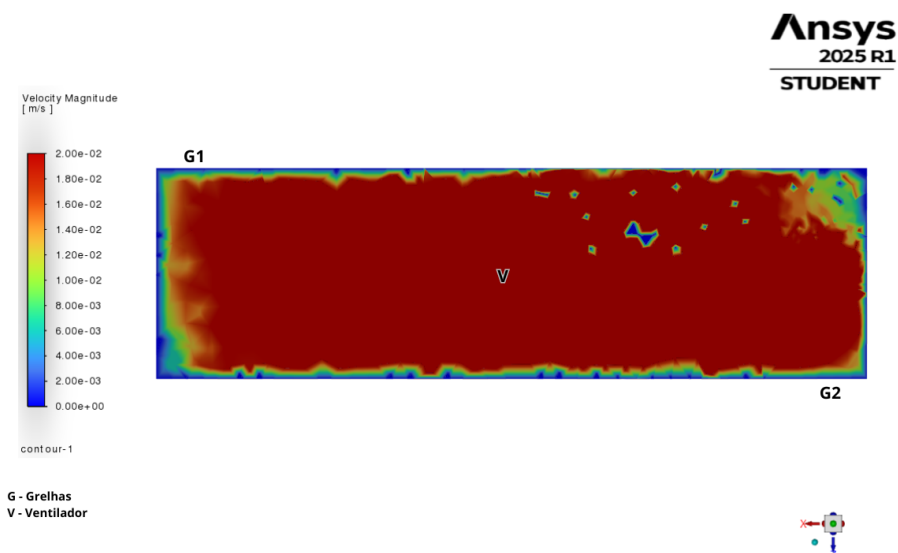


Figura 3.40: Corte horizontal (xz) à cota superior do contentor - Distribuição da velocidade média do ar – v2.1.

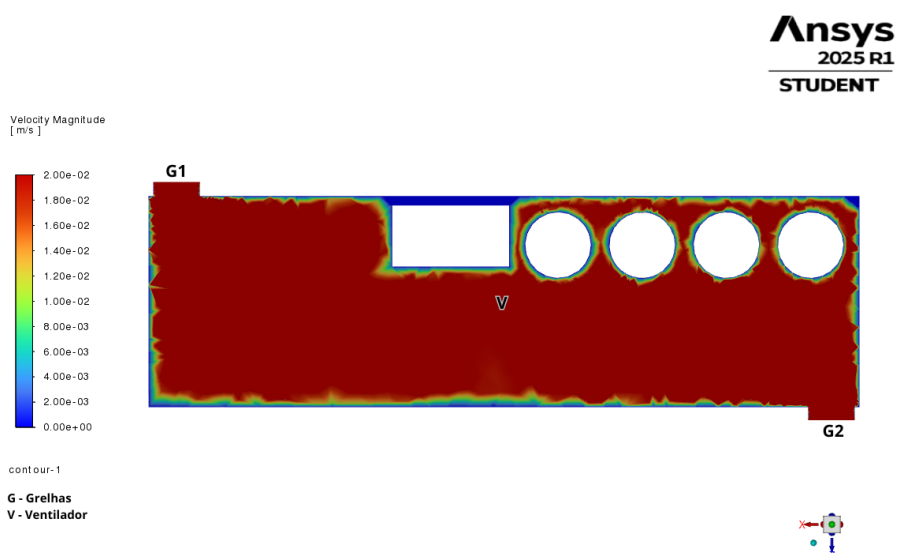


Figura 3.41: Corte horizontal (xz) à cota das grelhas - Distribuição da velocidade média do ar – v2.1.

penho da solução com a substituição das quatro grelhas TAE 600×200 por apenas duas grelhas TAE 700×500.

Com a implementação da versão 2.1, verificou-se uma melhoria significativa na homogeneidade do escoamento, em particular na eliminação das zonas estagnadas anteriormente identificadas, apesar deste não ser perfeito. A maior área efetiva das grelhas TAE 700×500, aliada à sua localização nos extremos G1 e G4, permitiu um reforço do fluxo ascendente, garantindo uma renovação mais eficiente do ar na zona central e superior.

A nova configuração proporcionou também uma redução da complexidade da instalação (menos unidades) e uma ligeira melhoria no desempenho, mantendo a perda de carga total em níveis semelhantes e assegurando a compatibilidade com o

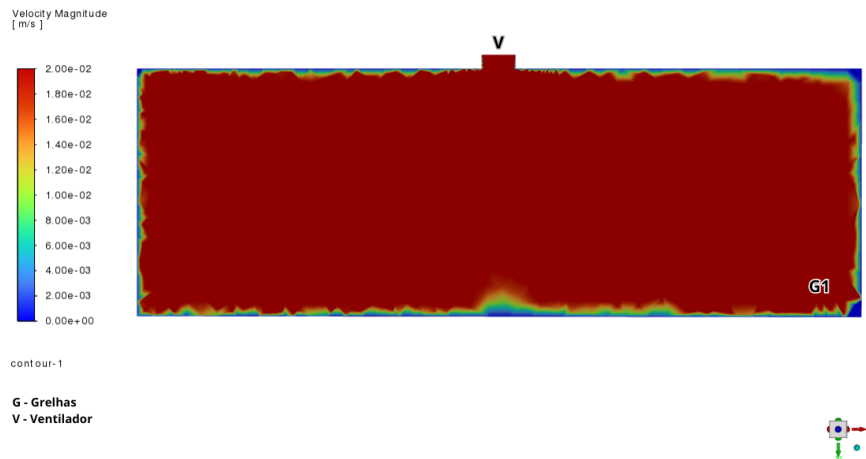


Figura 3.42: Corte vertical (xy) longitudinal ao eixo do ventilador - Distribuição da velocidade média do ar – v2.1.



Figura 3.43: Corte horizontal (xz) à cota da fuga - Concentração média de H_2 – v2.1.

ventilador CVT/ATEX já dimensionado. Esta adaptação comprova-se, assim, como uma solução mais eficiente e tecnicamente equilibrada.

As tabelas A.1 e A.2 da IEC 60079-10-1 [9], foram preenchidas de forma igual para todas as soluções, e estão representadas na secção .12 do Apêndice A.

4 Discussão dos Resultados

Este capítulo apresenta uma análise crítica das soluções de ventilação desenvolvidas, com base na comparação entre os resultados normativos, obtidos pela aplicação da IEC 60079-10-1 [9], e os resultados numéricos provenientes da simulação CFD. A análise inicia-se com a avaliação das duas configurações de ventilação natural consideradas, cujo desempenho foi estimado exclusivamente por via analítica, com base nos critérios definidos na norma, nomeadamente o caudal obtido, a concentração de fundo e a classificação da zona de risco.

Seguidamente, procede-se à análise detalhada das soluções de ventilação mecânica, estas sim complementadas por simulações CFD, permitindo uma avaliação mais abrangente da eficácia na diluição do hidrogénio, da distribuição do escoamento e do caudal admitido por grelha. São ainda incluídas comparações internas entre as versões base e melhoradas de cada solução (v1.0 vs v1.1 e v2.0 vs v2.1), de modo a evidenciar o impacto da otimização do escoamento no desempenho global do sistema. O objetivo é aferir a coerência entre a modelação analítica e o comportamento simulado, identificando os benefícios técnicos e operacionais resultantes do processo iterativo de projeto.

4.1 Análise de Ventilação Natural Induzida pelo Vento

A solução de ventilação natural induzida pelo vento foi dimensionada com base na aplicação direta da IEC 60079-10-1 [9] e da EN 1991-1-4 [71], contemplando fatores como o diferencial de pressão entre fachadas opostas, o fator de abrigo resultante da proximidade de um muro, e a área efetiva de ventilação associada a diferentes configurações de grelhas TradAir TAE.

Os resultados evidenciaram que várias das configurações estudadas são capazes de satisfazer o caudal mínimo exigido ($2223 \text{ m}^3/\text{h}$), o que demonstra que, mesmo em condições menos favoráveis, a ventilação induzida pelo vento pode constituir uma alternativa eficaz, reduzindo significativamente a necessidade de recorrer de forma integral à ventilação mecânica.

Apesar de a velocidade média do escoamento obtida permitir classificar a diluição como média, e de a concentração de fundo estimada ($X_b = 0,265\%$) satisfazer os requisitos normativos, a principal limitação desta solução resulta da dependência da ventilação relativamente à velocidade e à direção do vento, cuja variabilidade não permite assegurar a sua disponibilidade contínua no funcionamento da instalação.

Conclui-se, portanto, que, embora esta solução cumpra os critérios de diluição e concentração de fundo, não se apresenta viável para garantir de forma contínua a segurança da atmosfera interior. A classificação da zona como Zona 2 continua a ser admissível, mas apenas sob uma abordagem conservadora e sem garantia de robustez em condições meteorológicas adversas.

4.2 Análise da Solução Natural Induzida pela Convecção Térmica

A segunda solução de ventilação natural foi dimensionada com base no efeito de convecção térmica, resultante do gradiente de temperatura entre o interior do contentor e o exterior.

Os resultados demonstram que, mesmo para a configuração mais favorável, v0.4 - TAE 900×500 com altura vertical $H = 2,0$ m entre entradas e saídas, o caudal máximo de ventilação obtido ($1172 \text{ m}^3/\text{h}$) permanece significativamente abaixo do valor mínimo de referência ($2223 \text{ m}^3/\text{h}$). Esta limitação decorre da reduzida diferença de temperatura interior-exterior em condições reais de operação, que conduz a velocidades de escoamento muito baixas ($u = 0,0190 \text{ m/s}$).

Apesar de a velocidade obtida permitir classificar a diluição como média, e de a concentração de fundo resultante ($X_b = 0,515\%$) satisfazer os critérios da norma IEC 60079-10-1 [9], a solução falha no cumprimento do requisito interno de número mínimo de renovações por hora definido pela SYSADVANCE.

Conclui-se, portanto, que esta solução, embora tecnicamente admissível em termos normativos, não é suficiente para assegurar de forma contínua o número de renovações/hora imposto pela SYSADVANCE. A sua implementação isolada não seria recomendada face às exigências funcionais do sistema, apesar de garantir a segurança operacional em conformidade com os critérios ATEX.

4.3 Avaliação da Solução - Ventilador Axial

4.3.1 Análise Comparativa: Norma vs CFD

A solução com ventilador axial foi avaliada em duas versões distintas: a configuração base (v1.0), composta por duas grelhas TAE 600×400 , e a versão otimizada (v1.1), que substitui as duas grelhas anteriores por três TAE 600×300 na mesma fachada. Ambas recorrem ao ventilador axial HCDF-40-4T/2G ex db, operando com o mesmo ponto de funcionamento, previamente validado no software *SODECA QuickFan Selector*.

A comparação entre os dois métodos é apresentada na Tabela 4.1, que permite verificar diretamente as diferenças entre os valores teóricos previstos e calculados através da norma e os resultados numéricos obtidos por simulação computacional.

Esta comparação evidencia as diferenças metodológicas entre a abordagem normativa e a simulação CFD, confirmando a utilidade de integrar ambas as ferramentas no processo de validação de soluções de ventilação em atmosferas explosivas. Enquanto que a norma fornece um critério de dimensionamento geral, o CFD permite aperfeiçoar o desempenho e antecipar fenómenos que escapam à modelação analítica tradicional.

4.3.2 Caudal Admitido por Grelha

A simulação CFD possibilitou a quantificação do caudal admitido por cada grelha TradAir TAE localizada na fachada contrária ao ventilador axial, permitindo validar a consistência entre os valores teóricos de projeto e os valores obtidos através da simulação.

Tabela 4.1: Comparação entre os critérios normativos e os resultados CFD para as soluções v1.0 e v1.1

Grandeza	Solução v1.0		Solução v1.1	
	Norma	CFD	Norma	CFD
Caudal [m ³ /h]	2311		2311	
Perda de Carga Total [Pa]	71,32		71,32	
Velocidade Média do Escoamento [m/s]	0,032	0,062	0,032	0,128
Concentração de Fundo [% massa]	0,261	0,011	0,261	0,01
Tipo de Diluição	Média	Média	Média	Média
Classificação da Zona	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2
Preço [€]	1758,79		1825,14	

Na solução v1.0, o caudal de referência por grelha é 1111,5 m³/h. Os valores CFD encontram-se dentro da margem admissível de $\pm 10\%$, com ligeira assimetria entre grelhas. Já na solução v1.1, versão otimizada, o valor teórico por grelha desce para 741 m³/h, onde se observam desvios particularmente acentuados na grelha G1, a qual apresenta um caudal inferior ao previsto. Este desvio, ainda que inesperado, revela a complexidade dos padrões internos de escoamento e reforça a importância de ferramentas como o CFD na análise de ventilação localizada. Tal comportamento poderá dever-se à obstrução provocada pelas colunas de adsorção adjacentes.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados de ambas as versões, com respetivo erro relativo face ao valor teórico.

Tabela 4.2: Caudal admitido por grelha nas soluções v1.0 e v1.1 e respetivo erro relativo face ao valor teórico

Grelha	v1.0 (Ref. 1111,5 m ³ /h)		v1.1 (Ref. 741 m ³ /h)	
	Caudal [m ³ /h]	Erro [%]	Caudal [m ³ /h]	Erro [%]
G1	1069,2	3,8	511,2	31,0
G2	1004,4	9,6	745,2	0,6
G3	—	—	817,2	10,3

Em termos de caudal total admitido, a versão v1.0 apresenta 2073,6 m³/h, correspondendo a cerca de 89,8% do caudal de projeto (2311 m³/h). Na versão v1.1, o valor obtido é idêntico (2073,6 m³/h), mantendo-se ligeiramente abaixo do previsto em projeto. Esta diferença poderá resultar de simplificações inerentes à modelação numérica, da definição das condições de contorno ou de perdas de carga adicionais introduzidas pela geometria das grelhas. Ainda assim, ambas as versões asseguram um caudal próximo do requerido.

A análise comparativa destes resultados permite concluir que, embora as duas configurações cumpram o objetivo de admissão de caudal, a v1.1 revela uma distribuição mais equilibrada em termos de ventilação do volume interno. Contudo, esta versão também evidencia efeitos locais indesejáveis, que deverão ser considerados em futuros ajustes de geometria ou de posicionamento das grelhas. Importa

ainda salientar que os valores obtidos na simulação CFD se enquadram na faixa de funcionamento das grelhas, reforçando a coerência e a validade do caso em estudo.

4.3.3 Discussão Global da Solução

A versão v1.1 demonstrou-se tecnicamente superior à v1.0, não só pela melhoria da homogeneidade do escoamento, mas também pela redução da concentração de hidrogénio e pela eliminação de zonas estagnadas. A integração da terceira grelha permitiu um varrimento mais eficiente, com um aumento de custo relativamente reduzido (+66 €) e sem necessidade de alterar o ventilador de projeto ou os componentes associados.

Em termos operacionais, ambas as versões apresentam o mesmo ponto de funcionamento; contudo, observa-se na v1.1 um aumento superior a 100% na velocidade média do escoamento relativamente à v1.0. A concentração de fundo também diminui na versão melhorada, ainda que de forma pouco expressiva.

No que respeita ao enquadramento normativo, ambas as soluções cumprem os critérios de diluição média, a classificação da zona como Zona 2 e o limite de concentração de fundo.

Conclui-se, portanto, que a melhoria introduzida na solução v1.0, apesar do acréscimo de apenas 66 €, se encontra plenamente justificada, uma vez que a configuração v1.1 se apresenta como uma solução economicamente equilibrada e tecnicamente eficaz para aplicação em contentores técnicos sujeitos a risco de atmosfera explosiva por hidrogénio.

4.4 Avaliação da Solução - Ventilador de Cobertura

4.4.1 Análise Comparativa: Norma vs CFD

A solução com ventilador de cobertura foi analisada em duas configurações distintas: a versão base (v2.0), equipada com quatro grelhas TAE 600×200 , e a versão otimizada (v2.1), que utiliza apenas duas grelhas TAE 700×500 dispostas nos extremos inferiores das fachadas. Ambas integram o ventilador CVT/ATEX-250-4T/2G Ex db, instalado no topo central do contentor e operando a velocidade constante.

A comparação entre os valores previstos pela norma e os resultados obtidos por simulação é apresentada na Tabela 4.3. Esta tabela permite, mais uma vez, verificar diretamente as diferenças entre os dados calculados analiticamente e obtidos através de simulação.

A análise comparativa permite salientar as discrepâncias entre a abordagem normativa e a simulação CFD, demonstrando que a aplicação da norma conduz, em geral, à subavaliação da velocidade do escoamento e à sobreavaliação da concentração de fundo. Tais evidências corroboram a pertinência do processo iterativo de projeto e sublinham a utilidade da simulação CFD enquanto instrumento de suporte à decisão em situações de elevado rigor em matéria de segurança.

4.4.2 Caudal Admitido por Grelha

Na configuração v2.0, estabeleceu-se um caudal de referência de $555,75 \text{ m}^3/\text{h}$ por grelha, tendo os resultados numéricos obtidos por CFD permanecido dentro da margem de tolerância de $\pm 10\%$, ainda que com algumas assimetrias entre os diferentes elementos. Na versão v2.1, otimizada, o caudal de referência duplicou para

Tabela 4.3: Comparação entre os critérios normativos e os resultados CFD para as soluções v2.0 e v2.1

Grandeza	Solução v2.0		Solução v2.1	
	Norma	CFD	Norma	CFD
Caudal [m ³ /h]	2653		2816	
Perda de Carga Total [Pa]	128,2		88,25	
Velocidade Média do Escoamento [m/s]	0,043	0,062	0,045	0,074
Concentração de Fundo [% massa]	0,227	0,009	0,214	0,009
Tipo de Diluição	Média	Média	Média	Média
Classificação da Zona	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2
Preço [€]	2519,06		2511,44	

1111,5 m³/h; contudo, observaram-se desvios superiores a 10%, uma vez que os valores CFD registados se mantiveram ligeiramente acima do valor de projeto.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados das duas versões, com respetivo erro relativo face ao valor de referência.

Tabela 4.4: Caudal admitido por grelha nas soluções v2.0 e v2.1 e respetivo erro relativo face ao valor teórico

Grelha	v2.0 (Ref. 555,8 m ³ /h)		v2.1 (Ref. 1111,5 m ³ /h)	
	Caudal [m ³ /h]	Erro [%]	Caudal [m ³ /h]	Erro [%]
G1	590,4	6,2	1263,6	13,7
G2	586,8	5,6	1263,6	13,7
G3	590,4	6,2	—	—
G4	590,4	6,2	—	—

Em termos de caudal total admitido, a versão v2.0 apresenta 2357,6 m³/h, valor ligeiramente inferior ao previsto em projeto (2653 m³/h). Esta diferença pode estar associada a simplificações da malha, definição das condições de contorno ou perdas adicionais não consideradas no modelo teórico. Ainda assim, a distribuição entre as quatro grelhas mostra-se bastante homogénea. Já na versão v2.1, o caudal total obtido pela simulação é de 2527,2 m³/h, também inferior ao valor de referência de 2816 m³/h.

Estas diferenças podem estar, mais uma vez, associadas a simplificações da malha, definição das condições de contorno ou perdas adicionais não consideradas no modelo teórico.

Importa salientar que, apesar destas diferenças, os valores obtidos em CFD encontram-se dentro da faixa de caudais admissível para as grelhas TradAir TAE, o que confirma a coerência dos resultados e a validade do caso em estudo.

4.4.3 Discussão Global da Solução

A solução com ventilador de cobertura demonstrou ser uma abordagem robusta para promover o escoamento vertical e assegurar a extração eficiente de hidrogénio nas zonas elevadas do contentor. Ambas as versões garantiram a classificação da zona como Zona 2, com diluição média e concentrações de fundo inferiores a 1%, reforçando a segurança do sistema.

A versão v2.1, apesar de contar com menor número de grelhas, revelou-se mais eficaz do ponto de vista aerodinâmico e económico, atingindo melhores valores de velocidade média e distribuição simétrica dos caudais. O ponto de funcionamento registou um aumento tanto no caudal como na perda de carga, consequência direta da melhoria proposta. Em termos de velocidade do escoamento, a versão otimizada promoveu um acréscimo de aproximadamente 16% (de 0,062 m/s para 0,072 m/s), enquanto a concentração de fundo se manteve praticamente inalterada. Do ponto de vista orçamental, a solução otimizada revelou-se ainda cerca de 8 € mais barata, o que reforça a sua atratividade técnica e económica. Esta otimização evidencia a importância do posicionamento estratégico dos elementos de admissão, em complemento à seleção do ventilador.

Deste modo, a solução v2.1 constitui uma resposta técnica eficaz e validada, adequada para integração em sistemas ATEX, sendo recomendada para implementação futura sempre que se pretenda escoamento vertical ascendente com controlo de segurança para atmosferas explosivas.

4.5 Comparação Técnica entre Soluções

Neste capítulo procede-se à comparação técnica das quatro soluções de ventilação propostas — v1.0 e v1.1 (ventilador axial), v2.0 e v2.1 (ventilador de cobertura) — com base nos critérios normativos definidos pela norma IEC 60079-10-1, nos resultados obtidos por simulação CFD e nos fatores de custo-benefício. A Tabela [4.5](#) apresenta um resumo comparativo entre as diferentes versões.

4.6 Discussão Global das Soluções

A comparação entre os resultados obtidos pelas simulações CFD e os critérios definidos na norma IEC 60079-10-1 evidencia a importância de abordagens complementares na avaliação da eficácia da ventilação em atmosferas explosivas. Embora todas as soluções analisadas assegurem uma diluição média adequada e cumpram os requisitos de concentração de fundo ($X_b < 1,0\%$), sendo classificadas como **Zona 2**, os resultados CFD demonstram que tais condições não garantem, por si só, um desempenho aerodinâmico equivalente nem uma segurança efetiva comparável.

Com efeito, para um mesmo caudal de extração (e, portanto, uma renovação de ar teoricamente idêntica), observam-se variações consideráveis nas velocidades médias do escoamento e, sobretudo, nas concentrações residuais de hidrogénio no interior do contentor. Esta disparidade decorre essencialmente da configuração geométrica da ventilação — posição, número e dimensão das grelhas, bem como da localização do ventilador — confirmando que a abordagem normativa, ao centrar-se apenas em caudal mínimo e concentração média, não é sensível às diferenças internas de desempenho. Tal como referido por Carcassi e Frosina [\[66\]](#) e reforçado por Mauri e van Wingerden [\[27\]](#), a norma **IEC 60079-10-1** [\[9\]](#) apresenta limitações

Tabela 4.5: Resumo técnico comparativo entre as quatro soluções propostas, com base nos critérios da IEC 60079-10-1 e validação CFD.

Parâmetro	v1.0	v1.1	v2.0	v2.1
Caudal total [m ³ /h]	2311	2311	2653	2816
Número de grelhas	2	3	4	2
Caudal por grelha [m ³ /h]	1111,5	741,0	555,8	1111,5
Classificação da zona	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2
Extensão da zona [m]	1	1	1	1
Grau de diluição	Média	Média	Média	Média
Velocidade do escoamento u_w [m/s] (IEC)	0,032	0,032	0,043	0,045
Velocidade do escoamento u_w [m/s] (CFD)	0,062	0,128	0,062	0,074
Concentração de fundo X_b [%] (IEC)	0,261	0,261	0,227	0,214
Concentração de fundo X_b [%] (CFD)	0,011	0,01	0,009	0,009
Custo total [€]	1758,79	1825,14	2519,06	2511,44

na representação tridimensional do escoamento, desconsiderando fenômenos como recirculações, zonas estagnadas e assimetrias na distribuição.

No caso das soluções com ventilador axial, a versão **v1.0** apresenta zonas mortas persistentes junto ao teto e estagnações na base, mesmo cumprindo os critérios normativos. A versão **v1.1**, ao recorrer a três grelhas de admissão em vez de duas maiores, promoveu um escoamento mais homogêneo, com menor concentração de hidrogênio e melhor varrimento do ar, sem acréscimo relevante de custos. De modo análogo, nas configurações com ventilador de cobertura, a versão **v2.0** cumpriu os requisitos mínimos, mas evidenciou distribuição assimétrica e formação de zonas críticas, atribuídas à posição das grelhas. A versão **v2.1**, ao adotar apenas duas grelhas de maior dimensão e melhor simetria de instalação, eliminou essas limitações e reforçou o escoamento ascendente, garantindo uma ventilação mais eficaz, homogênea e economicamente competitiva.

Importa, contudo, salientar que, apesar de as soluções com ventilador de co-

bertura serem teoricamente mais robustas no controlo da estratificação de gases, e também mais onerosas, tal não se traduz necessariamente em melhor desempenho global. Comparando as versões otimizadas **v1.1** e **v2.1**, observa-se que a solução **v1.1**, além de ser quase 700 € mais barata, assegura velocidades médias significativamente superiores e uma concentração apenas ligeiramente mais elevada, o que demonstra que, para este projeto em particular, esta solução se revela a mais vantajosa entre as alternativas consideradas.

Neste sentido, a simulação CFD revela-se indispensável como ferramenta de apoio à decisão, permitindo não só validar o cumprimento dos critérios normativos, mas também otimizar a configuração geométrica do sistema para assegurar uma diluição eficaz e uniforme. A evidência de que diferentes geometrias podem produzir desempenhos substancialmente distintos, mesmo sob as mesmas condições de operação, confirma que a aplicação da **IEC 60079-10-1** [9] deve ser complementada com modelações CFD, de forma a garantir que o desempenho real do sistema de ventilação reflita o nível de segurança exigido pelas características do gás, da instalação e do regime de funcionamento.

5 Conclusão

O presente trabalho teve como principal objetivo a análise e validação de soluções de ventilação para atmosferas potencialmente explosivas associadas ao manuseamento de hidrogénio numa instalação de VPSA, aplicando os critérios da norma IEC 60079-10-1 em conjugação com simulações CFD. O estudo incidiu sobre um contentor técnico, típico de aplicações industriais, tendo sido propostas, modeladas e comparadas diferentes configurações de ventilação natural e mecânica.

Inicialmente, foram realizados os dimensionamentos analíticos com base nos métodos normativos, considerando caudais mínimos, critérios de diluição e classificação de zonas. Em seguida, cada solução foi modelada em ambiente CAD e simulada no *ANSYS Fluent*, permitindo uma análise tridimensional detalhada dos campos de velocidade e da distribuição do hidrogénio no interior do contentor.

A comparação entre os resultados normativos e os obtidos por simulação CFD evidenciou a importância da modelação computacional para a validação de sistemas de ventilação em atmosferas explosivas. Verificou-se que, mesmo com caudais equivalentes e classificações de zona idênticas, a geometria e configuração das aberturas de ventilação influenciam significativamente a eficácia da diluição, a formação de zonas mortas e a distribuição da concentração de hidrogénio. A simulação CFD revelou-se, assim, uma ferramenta essencial para complementar a abordagem normativa, fornecendo uma representação mais realista do comportamento do gás e dos escoamentos internos.

Do ponto de vista prático, a tese permitiu identificar soluções mais eficazes em termos de desempenho aerodinâmico, segurança e custo. Destaca-se, nesse sentido, a importância de integrar, desde as fases iniciais do projeto, critérios de otimização da ventilação com recurso a modelação numérica, em especial para aplicações envolvendo gases leves e altamente inflamáveis como o hidrogénio.

Como perspetiva futura, sugere-se o aprofundamento da modelação transiente, a análise de cenários com fontes de ignição, e a consideração de efeitos térmicos mais complexos. A validação experimental dos resultados CFD constituiria também um passo importante para consolidar a aplicabilidade dos modelos utilizados e aumentar a fiabilidade das classificações definidas.

Em síntese, esta dissertação contribuiu para uma melhor compreensão da interação entre normas, projeto técnico e simulação computacional no domínio da segurança em atmosferas explosivas, promovendo uma abordagem integrada e tecnicamente fundamentada à avaliação do risco associado à ventilação de sistemas com hidrogénio.

Para além dos contributos técnicos e científicos, este trabalho permitiu-me crescer em contexto empresarial, proporcionando contacto direto com a dinâmica real de projetos industriais e fomentando competências interpessoais essenciais. A integração na empresa possibilitou não apenas o desenvolvimento de autonomia e responsabilidade profissional, mas também o fortalecimento das relações dentro da equipa

e o estabelecimento de contacto com outros representantes do setor, enriquecendo a minha visão global sobre a indústria e consolidando competências fundamentais para o exercício da Engenharia Mecânica em ambiente empresarial.

5.1 Trabalhos Futuros

Como desenvolvimento futuro, recomenda-se a recolha e análise de dados anemométricos do local de instalação, de forma a caracterizar o regime anual do vento, incluindo direções predominantes, frequência de ocorrência e velocidades médias sazonais. Esta informação permitiria avaliar em que períodos do ano a ventilação induzida pelo vento poderia funcionar como complemento à ventilação mecânica, contribuindo para reduzir consumos energéticos e aumentar a eficiência global do sistema.

Adicionalmente, poderá ser considerada a integração de uma estação meteorológica local equipada com anemómetro e sensor de direção do vento (rosa-dos-ventos digital), ligada ao sistema de controlo do ventilador. Esta abordagem permitiria ajustar dinamicamente o funcionamento do ventilador com base no caudal naturalmente induzido em tempo real, potenciando a ventilação natural sempre que as condições externas sejam favoráveis e reduzindo o consumo elétrico associado à ventilação mecânica. Tal solução representaria uma estratégia de ventilação híbrida inteligente, com ganhos ao nível da sustentabilidade e da automação industrial.

Como continuidade deste estudo, seria pertinente considerar a monitorização em tempo real das temperaturas no interior e exterior do contentor, associada a um sistema de controlo térmico que avalie a viabilidade momentânea da ventilação por fluutuabilidade. Tal como sugerido para a solução induzida pelo vento, poderá equacionar-se a implementação de uma lógica de controlo híbrida, em que a ventilação natural seja ativada sempre que as condições térmicas permitam gerar um caudal útil, reduzindo o tempo de funcionamento do ventilador mecânico. Esta abordagem poderia ser suportada por sensores de temperatura conectados ao sistema de controlo da ventilação, permitindo decisões automáticas de ativação/desativação dos ventiladores com base em limiares definidos. A integração deste tipo de controlo inteligente poderá contribuir para uma gestão mais eficiente do sistema, otimizando o consumo energético sem comprometer os requisitos de segurança.

No que respeita à ventilação mecânica, seria também relevante estudar a viabilidade da regulação do ventilador através de inversores de frequência, permitindo adaptar o caudal extraído em função das condições de operação (por exemplo, taxa de fuga de hidrogénio estimada, temperatura interna ou ocupação da instalação). Esta solução permitiria não apenas uma redução dos consumos energéticos durante os períodos de menor exigência, como também uma maior flexibilidade na resposta a cenários de emergência, em que um aumento imediato da ventilação pode ser necessário.

Outro aspeto a considerar será a implementação de algoritmos de otimização multiobjetivo que integrem critérios de segurança (concentração de fundo de hidrogénio), desempenho aerodinâmico (velocidade do ar) e eficiência energética (potência absorvida), com base em dados recolhidos por sensores distribuídos no interior do contentor. Estes algoritmos poderão ser integrados em controladores programáveis industriais (PLCs) ou sistemas de supervisão SCADA, promovendo uma gestão inteligente e adaptativa do sistema de ventilação.

Por fim, recomenda-se a realização de testes experimentais em ambiente controlado, com recurso a sensores de concentração de H_2 , para validação dos modelos CFD utilizados neste estudo.

Conclusão

Referências

- [1] International Energy Agency, “Global Hydrogen Review 2021,” International Energy Agency, Tech. Rep., 2021. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>
- [2] —, “Global hydrogen review 2022,” Paris, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- [3] I. Dincer, “Green methods for hydrogen production,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1954–1971, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911019823>
- [4] D. A. Crowl, “Minimize the risks of flammable materials,” *Chemical Engineering Progress*, 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/279540428_Minimize_the_Risks_of_Flammable_Materials
- [5] A. Król, M. Gajec, J. Holewa-Rataj, E. Kukulska-Zajac, and M. Rataj, “Hydrogen purification technologies in the context of its utilization,” *Energies*, vol. 17, no. 15, p. 3794, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/15/3794>
- [6] A. Singh, A. M. Shivapuji, and S. Dasappa, “Vpsa process characterization for iso quality green hydrogen generation using two practical multi-component biomass gasification feeds,” *Separation and Purification Technology*, 2023, published online 15 June 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586623005750>
- [7] *Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1999 on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres*, 1999. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0092>
- [8] *Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres*, 2014. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0034>
- [9] *Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres*, Std. IEC 60 079-10-1:2020, 2020.

- [10] C. de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (CATIM), *ATEX - Atmosphères Explosibles*, 2025. [Online]. Available: <https://www.catim.pt/pt-pt/node/848>
- [11] E.-O. e Agência Portuguesa do Ambiente (APA), *Manual de Proteção Contra Explosões*, 2019. [Online]. Available: <https://siliamb.apambiente.pt/consultapublica/?code=5b83a9bbc08a1bf9ea56d374f5dfae&file=true>
- [12] R. K. Eckhoff, “Differences and similarities of gas and dust explosions,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, pp. 553–560, 2006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423006000027>
- [13] J. D. Jr., J. G. Hansel, and T. Philips, “Temperature influence on the flammability limits of heat treating atmospheres,” *Air Products and Chemicals, Inc.*, 2003, publication No. 330-11-001-US. [Online]. Available: <https://www.airproducts.com/>
- [14] J. R. Galdini and L. A. Silva, “Determinação dos limites de inflamabilidade de hidrocarbonetos por meio do cálculo do equilíbrio químico,” in *X Congresso Brasileiro de Termodinâmica Aplicada & VI Escola de Termodinâmica*. Diadema, Brasil: Universidade Federal de São Paulo, 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/338084357_DETERMINACAO_DOS_LIMITES_DE_INFLAMABILIDADE_DE_HIDROCARBONETOS_POR_MEIO_DO_CALCULO_DO_EQUILIBRIO_QUIMICO
- [15] *IEC 60079-20-1: Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data*, 1st ed., International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, Jan. 2010, iEC 60079-20-1:2010.
- [16] International Electrotechnical Commission, *IEC 60079-14:2013 — Explosive atmospheres – Part 14: Electrical installations design, selection and erection*, 5th ed., IEC, Geneva, Switzerland, 2013, norma internacional para a concepção, seleção e instalação de equipamentos elétricos em atmosferas explosivas.
- [17] *IEC 60079-10-2:2015 – Explosive atmospheres – Part 10-2: Classification of areas – Explosive dust atmospheres*, 2nd ed., International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2015.
- [18] H. Sousa, *Sensibilização ATEX*, Portugal, 2015, relatório de sensibilização publicado em Julho de 2015.
- [19] Ultech Engineering Sdn. Bhd., *Hazardous Area Guide for ATEX IECEx (Zones/Groups)*, Miri, Sarawak, Malaysia, n.d., guia técnico sobre áreas perigosas, disponível para consulta. [Online]. Available: <https://www.ultech-engineering.com>
- [20] Indusmelec, *ATEX - Atmosferas Explosivas*, 2014, documento técnico sobre atmosferas explosivas e normas ATEX. [Online]. Available: https://www.indusmelec.pt/newsletter/11/ATEX-Atmosferas_Explosivas.pdf

- [21] S. Quesnel, E. Vyazmina, D. Houssin, D. T. Beltran, and S. Pique, “Multhyfuel d3.6 – risk assessment review of critical scenarios and hazardous area classification,” MultHyFuel Project Consortium, Deliverable D3.6, June 2024. [Online]. Available: <https://www.multhyfuel.eu>
- [22] E. R. Junior, “Hazardous area classification: Points to consider,” *Hazardex*, November 2017. [Online]. Available: <https://www.hazardexonthenet.net/article/143320/Hazardous-area-classification--points-to-consider.aspx>
- [23] B. Marchand, “Discussing hydrogen hazardous area classification design with allan bozek,” *Electrical Industry News Week*, February 2022. [Online]. Available: <https://electricalindustry.ca/latest-articles/9214-discussing-hydrogen-hazardous-area-classification-design-with-allan-bozek/>
- [24] G. W. Howard, A. V. Tchouvelev, Z. Cheng, and V. M. Agranat, “Defining hazardous zones – electrical classification distances,” in *15th World Hydrogen Energy Conference (WHEC 15)*. Yokohama, Japan: International Association for Hydrogen Energy, June 2004, comparação entre IEC 60079-10 e resultados de modelação CFD para fugas de hidrogénio comprimido. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/410092>
- [25] A. Bozek, “Application of iec 60079-10-1 edition 2.0 for hazardous area classification,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8226777>
- [26] J.-Y. Choi and S.-H. Byeon, “Specific process conditions for non-hazardous classification of hydrogen handling facilities,” *Safety and Health at Work*, vol. 12, pp. 416–420, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791121000408>
- [27] L. Mauri and K. van Wingerden, “A closer look to some aspects of the methodology of hazardous area classification using cfd,” in *Hazards 27, Symposium Series No. 162*. Birmingham, UK: IChemE, 2017. [Online]. Available: <https://www.icheme.org/media/15488/paper-36.pdf>
- [28] International Electrotechnical Commission, *Explosive atmospheres – Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures “d”*, Std. IEC 60 079-1:2014, 2014, geneva, Switzerland.
- [29] —, *Explosive atmospheres – Part 7: Equipment protection by increased safety “e”*, Std. IEC 60 079-7:2015, 2015, geneva, Switzerland.
- [30] —, *IEC 60079-31:2022 – Explosive atmospheres – Part 31: Equipment dust ignition protection by enclosure “t”*, 3rd ed., IEC, Geneva, Switzerland, 2022.
- [31] *BS EN 60079-15:2010 – Explosive atmospheres – Part 15: Equipment protection by type of protection “n”*, 4th ed., British Standards Institution / International Electrotechnical Commission, London, UK / Geneva, Switzerland, 2010.
- [32] Desconhecido, “Contributos para a implementação da directiva atex estudo de caso no sector industrial,” 2011.

Referências

- [33] P. E. Pascon, “Flixborough – 25 anos,” *Processos - Soluções de Engenharia S/C Ltda.*, 2000. [Online]. Available: <https://www.processos.eng.br>
- [34] L. Centemeri, “Seveso: o desastre e a directiva,” *Laboreal*, vol. 6, no. 2, pp. 1–7, 2010. [Online]. Available: <https://journals.openedition.org/laboreal/8938>
- [35] J. N. Chu, “Análise de riscos nas indústrias petroquímicas: Atmosferas explosivas,” Master’s thesis, Instituto Politécnico de Setúbal, 2014. [Online]. Available: <https://pt.scribd.com/document/332799680/ARIndustriaPetroquimica-Jorge-Chu-Final-pdf>
- [36] A. T. T. Cunha, “Implementação da diretiva atex no setor industrial,” Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia de Coimbra, 2014. [Online]. Available: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/38464>
- [37] J. Sarilho, “Manual de proteção contra explosões - instalação piloto síntese,” Master’s thesis, Instituto Politécnico de Setúbal, 2018. [Online]. Available: <https://comum.rcaap.pt/entities/publication/7aa0bf38-11ad-4bbb-b14b-5fc2813c232c>
- [38] P. E. Pascon, “Flixborough – 25 anos,” *Processos - Soluções de Engenharia S/C Ltda.*, 2000. [Online]. Available: <https://www.processos.eng.br>
- [39] R. Turney, “Flixborough: Lessons which are still relevant today,” *ICHEME Safety Symposium XXIV*, pp. 60–66. [Online]. Available: <https://www.icheme.org/media/8955/xxiv-paper-60.pdf>
- [40] B. D. Marchi, S. Funtowicz, and J. Ravetz, “O acidente industrial ampliado de seveso: paradigma e paradoxo,” *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, vol. 6, pp. 1–15, 2020. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/109064415>
- [41] L. Centemeri, “Seveso: o desastre e a directiva,” *Laboreal*, vol. 6, no. 2, pp. 1–7, 2010. [Online]. Available: <https://journals.openedition.org/laboreal/8938>
- [42] E. R. Jr., M. C. M. Costa, and M. D. Godini, “Acidentes ampliados à luz da "diretiva seveso" e da convenção nº 174 da oit,” *Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente*, vol. 1, 2006. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/77904616>
- [43] T. E. R. Estêvão, “O hidrogénio como combustível,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008, dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58102>
- [44] F. M. S. M. dos Santos and F. A. C. M. dos Santos, “O combustível hidrogénio,” *Educação, Ciência e Tecnologia*. [Online]. Available: <https://revistas.rcaap.pt/millennium/article/download/8428/6014/23844>
- [45] L. M. B. Monteiro, “Tecnologias de produção de hidrogénio verde - estudo energético e viabilidade económica,” Master’s thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2021. [Online]. Available: <https://recipp.ipp.pt/entities/publication/b90464bb-273b-44e9-84b1-134a62b682b7>

- [46] N. Pal and M. Agarwal, “Advances in materials process and separation mechanism of the membrane towards hydrogen separation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/352497591_Advances_in_materials_process_and_separation_mechanism_of_the_membrane_towards_hydrogen_separation
- [47] F. V. S. Lopes, C. A. Grande, and A. E. Rodrigues, “Fast-cycling vpsa for hydrogen purification,” *Fuel*, vol. 91, pp. 510–523, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111003692>
- [48] D. Nikolic, A. Giovanoglou, M. C. Georgiadis, and E. S. Kikkinides, “Purification of hydrogen by pressure swing adsorption,” *Separation Science and Technology*, vol. 35, no. 5, pp. 667–687, 2000. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/SS-100100183>
- [49] W.-H. Chen, W.-H. Chen, R.-Y. Chein, A. T. Hoang, K. Manatura, and S. R. Naqvi, “Optimization of hydrogen purification via vacuum pressure swing adsorption,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, p. 100459, 2023, open access article under the CC BY-NC-ND license. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100459>
- [50] T. Keller and G. Shahani. (2019) Pressure swing adsorption technology. By Linde Engineering and Shure-Line Construction. Accessed: 2025-03-03. [Online]. Available: <https://www.chemengonline.com/psa-article/>
- [51] F. V. S. Lopes, “New pressure swing adsorption cycles for hydrogen purification from steam reforming off-gases,” Ph.D. dissertation, University of Porto, 2010. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61875/1/000143205.pdf>
- [52] E²G | The Equity Engineering Group. (2024) Psa on psa: Reliability issues in pressure swing adsorption systems. [Online]. Available: <https://e2g.com/industry-insights-ar/psa-on-psa-reliability/>
- [53] AS-Schneider Group. (2023) Is hydrogen embrittlement a threat to valves? [Online]. Available: <https://as-schneider.blog/2023/04/12/is-hydrogen-embrittlement-a-threat-to-valves/>
- [54] O’Donnell Consulting Engineers, Inc. Failure analysis – psa vessels. [Online]. Available: <https://www.odonnellconsulting.com/projects/failure-analysis-psa-vessels/>
- [55] Valve World Americas. (2023) Three steps to ensure control valve reliability in psa applications. [Online]. Available: <https://valve-world-americas.com/three-steps-to-ensure-control-valve-reliability-in-psa-applications/>
- [56] Hazardex. (2024) The future is with hydrogen. [Online]. Available: <https://www.hazardexonthenet.net/article/206355/The-future-is-with-hydrogen.aspx>
- [57] D.-G. de Energia e Geologia (DGEG). (2025) Estratégia nacional para o hidrogénio (en-h2). Acessado em 10 de janeiro de 2025. [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-transversais/relacoes-internacionais/politica-energetica/estrategia-nacional-para-o-hidrogenio-en-h2/>

- [58] A. para a Energia (ADENE). (2025) Setor energético - bloco 4. Acessado em 10 de janeiro de 2025. [Online]. Available: <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-4/>
- [59] A. K. Runchal, “Evolution of cfd as an engineering science: a personal perspective with emphasis on the finite volume method,” *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 350, no. S1, pp. 233–258, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5802/crmeca.240>
- [60] L. F. Richardson, “The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, vol. 210, pp. 307–357, 1911. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rsta.1911.0009>
- [61] M. Kawaguti, “Numerical solution of the navier–stokes equations for the flow around a circular cylinder at reynolds number 40,” *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 8, no. 6, pp. 747–757, 1953. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1143/JPSJ.8.747>
- [62] B. E. Launder and D. B. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [63] D. Kwak, “Cfd – mature technology?” *NASA Technical Report*, no. NASA/CP-2005-213863. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20060052403>
- [64] L. van Hoecke, “Computational fluid dynamics/finite volume method (cfd/fvm),” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, pp. 545–561, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cjce.23250>
- [65] A. Schubiger, N. Wörner, and D. Lucas, “Evaluation of the lattice boltzmann method for wind modelling in complex terrain,” *Wind Energy Science*, vol. 5, no. 4, pp. 1507–1525, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/wes-5-1507-2020>
- [66] A. Tchouvelev, G. Howard, and V. Agranat, “Comparison of standards requirements with cfd simulations for determining sizes of hazardous locations in hydrogen energy station,” 2004. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/229035409_Comparison_of_standards_requirements_with_CFD_simulations_for_determining_sizes_of_hazardous_locations_in_hydrogen_energy_station
- [67] A. O. de Souza, A. Luiz, A. Neto, A. Araujo, H. Silva, S. Silva, and J. Alves, “Cfd predictions for hazardous area classification,” *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 21–31, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.06.002>
- [68] N. NOAA and U.S. Air Force, *U.S. Standard Atmosphere, 1976*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1976. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770009539>

- [69] D. R. Lide, Ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, internet version 2005 ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005. [Online]. Available: <http://www.hbcpnetbase.com>
- [70] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Termodinâmica*, 7th ed., 2013, cDU 621.43.016:536. [Online]. Available: https://pt.slideshare.net/slideshow/termodinamica-yunus-cengel-7-edicao_unlocked-pdf/278574697
- [71] *Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-4: General actions — Wind actions*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2010. [Online]. Available: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-1-actions-structures>
- [72] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Pearson Education, 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/44491110_An_introduction_to_computational_fluid_dynamics_the_finite_volume_method_H_K_Versteeg_and_W_Malalasekera
- [73] H. E. Fossum, E. Akervik, M. Henriksen, and D. Bjerketvedt, “Numerical simulation of hydrogen dispersion in an open-ended channel,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 92, pp. 544–559, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924042290>

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do Politécnico do Porto (P.PORTO) e do Instituto Superior de Engenharia da Porto (ISEP).

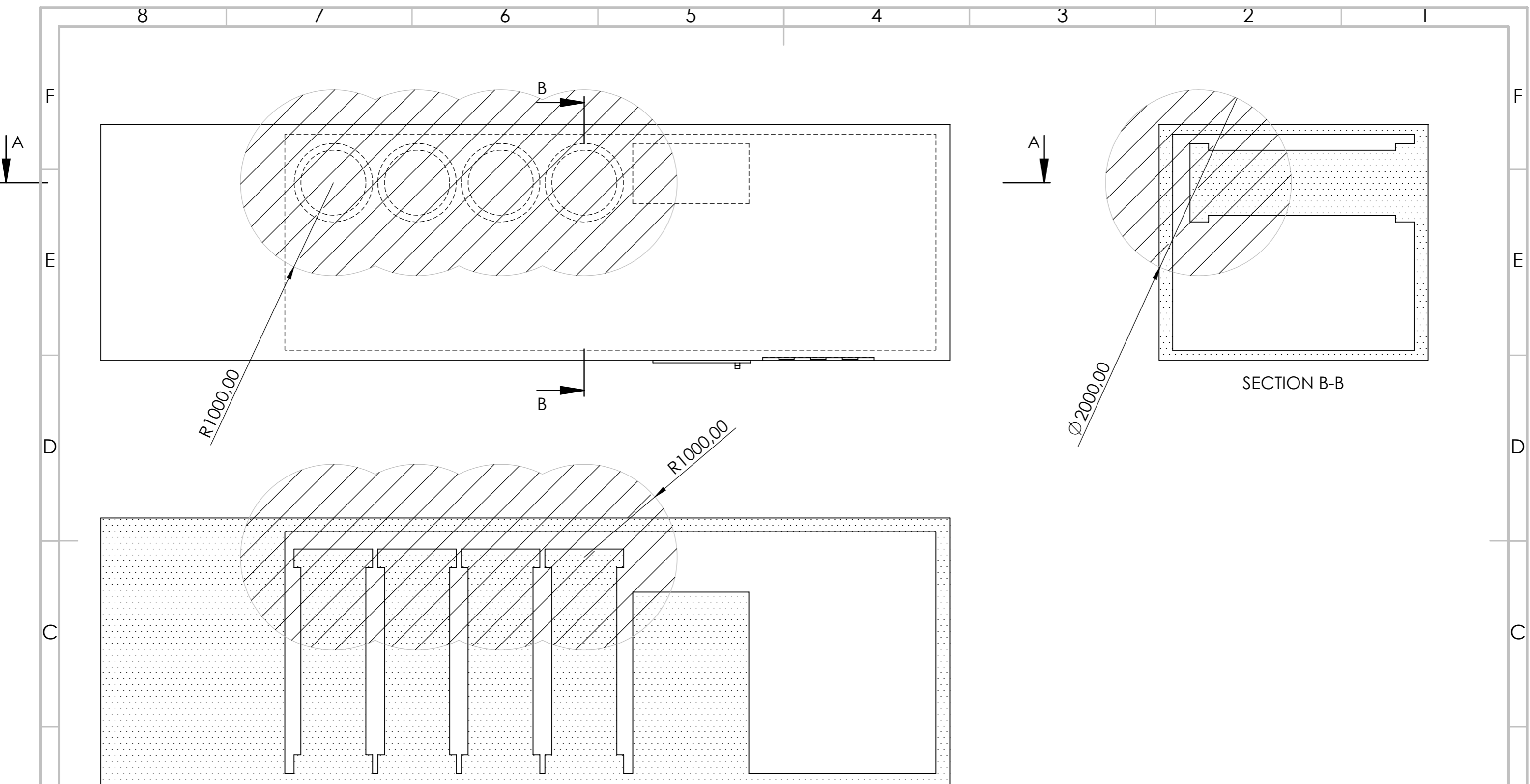
Duarte Rosa Sanches

Porto, 14 de Setembro de 2025

Declaração de Integridade

Apendice A - Primeiro apêndice

.1 Desenho Técnico - Zona Perigosa



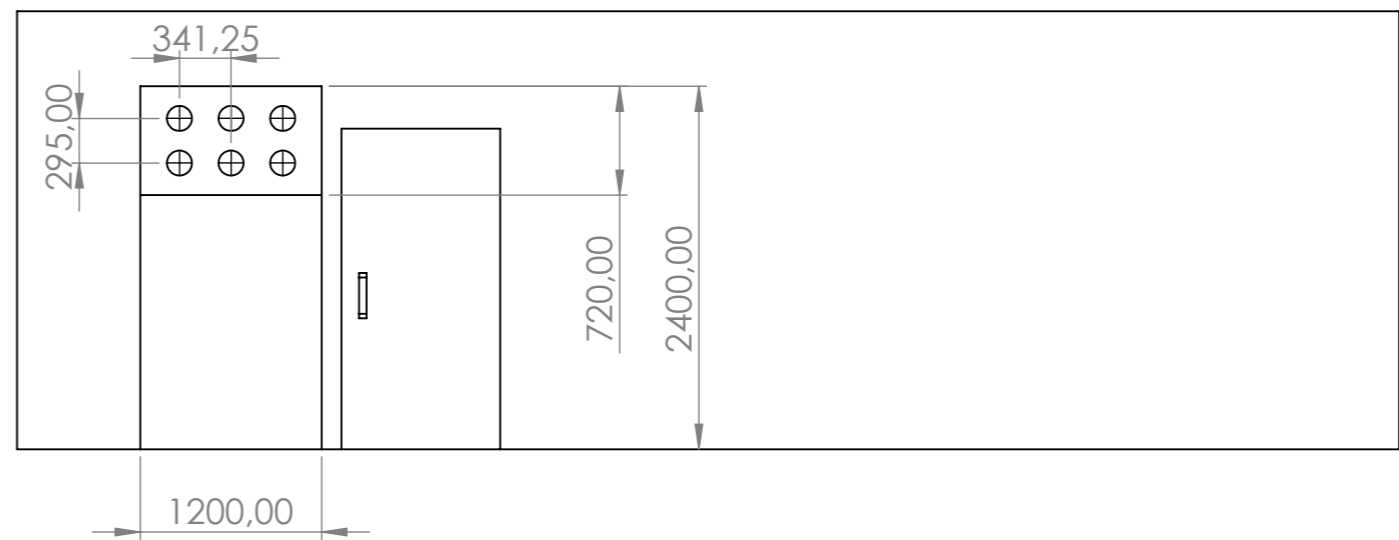
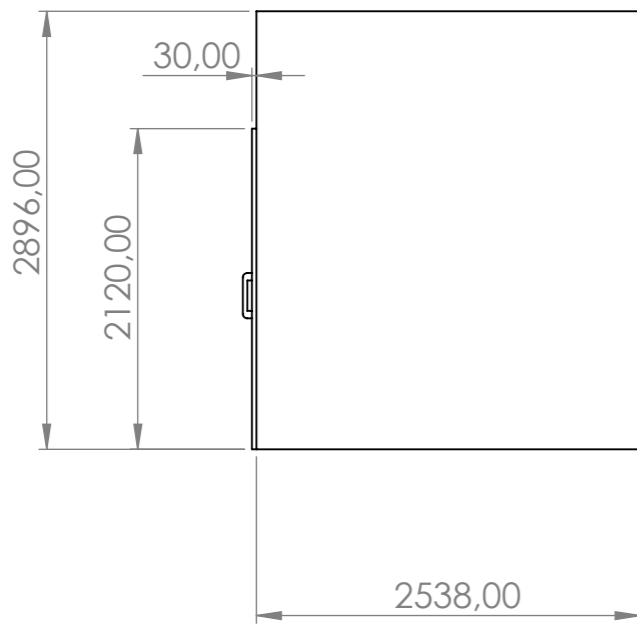
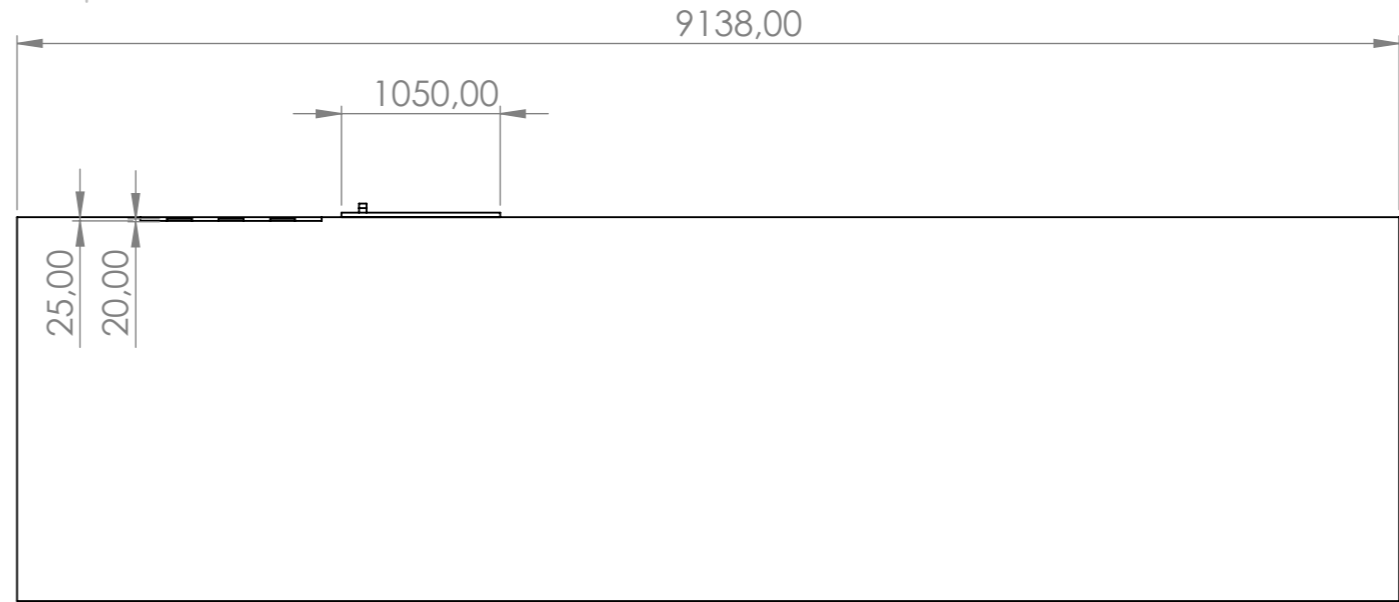
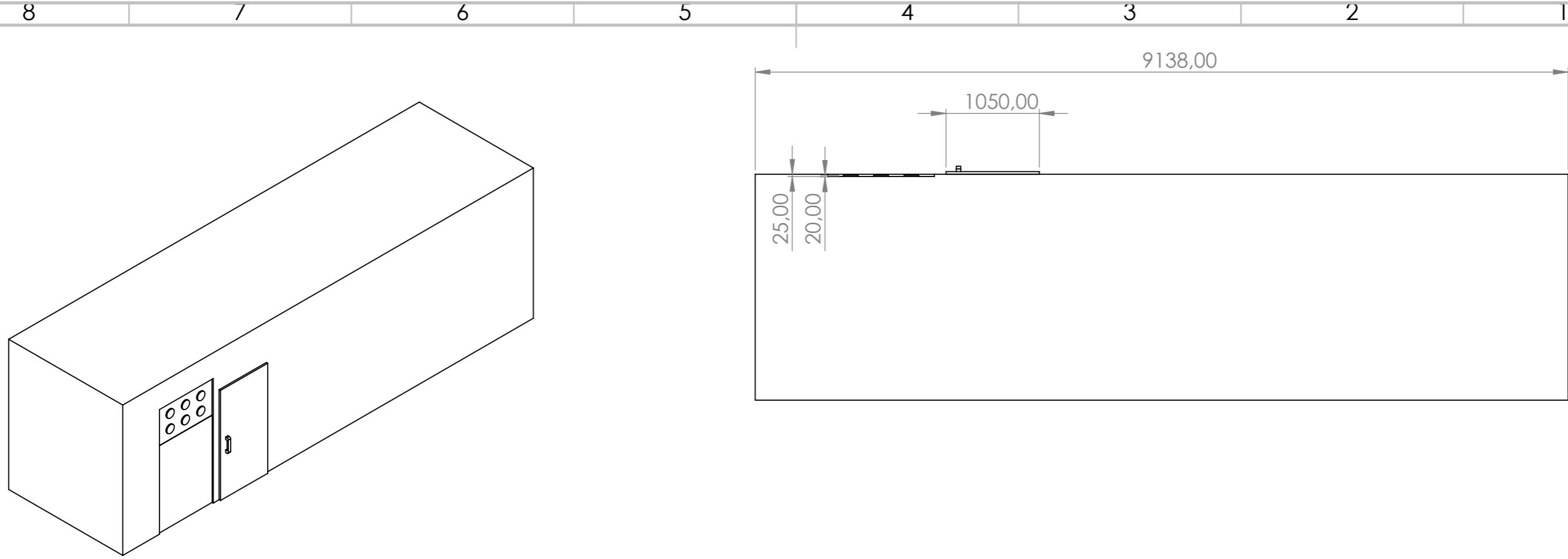
SECTION A-A

SECTION B-B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:								<p style="text-align: center; font-size: 24px;">Zona Perigosa</p>			
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A								MATERIAL:		DWG NO.	
										A3	
								WEIGHT:		SCALE:1:40	
										SHEET 1 OF 1	

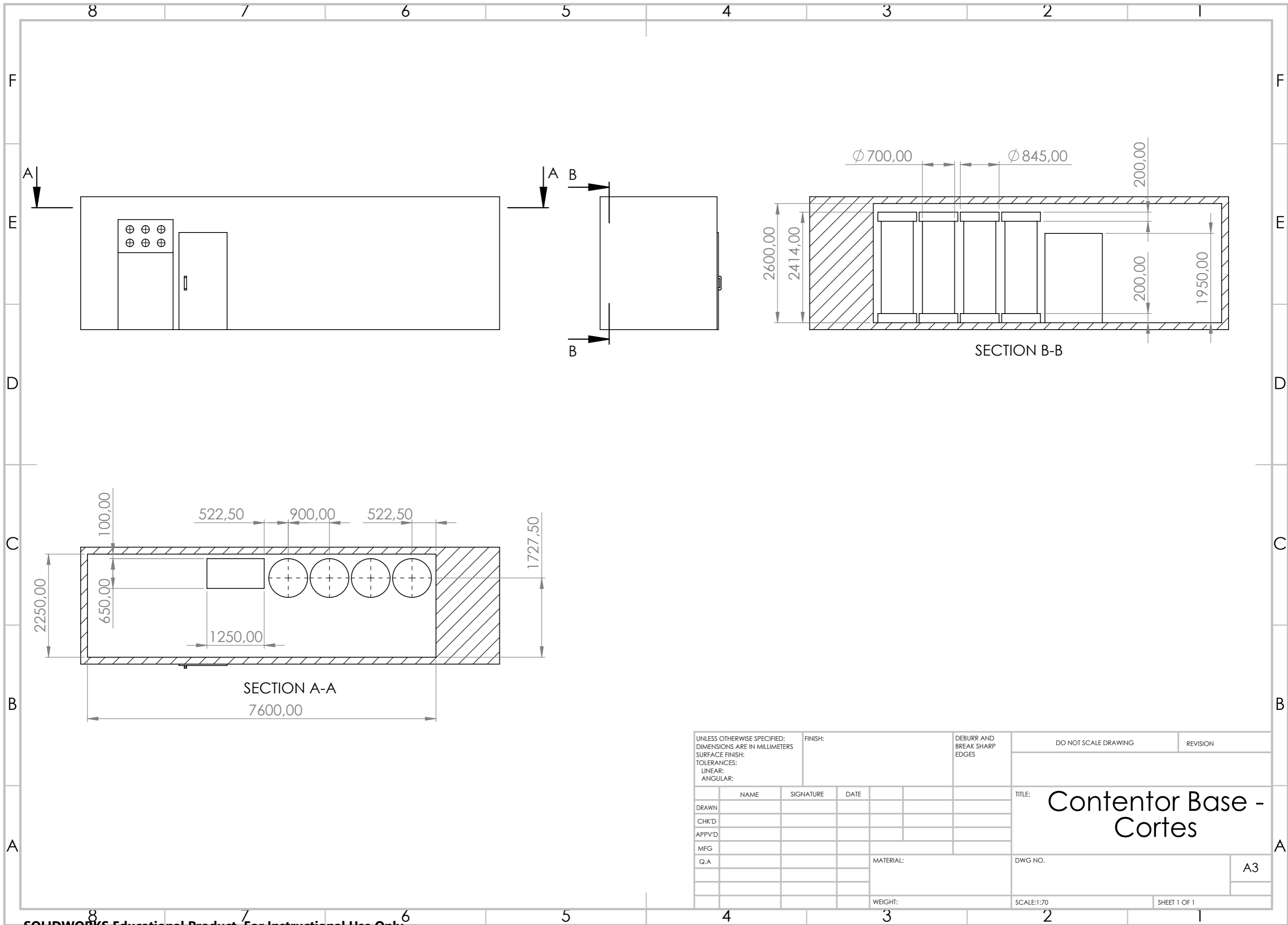
Apendice A

.2 Desenho Técnico - Contentor Base



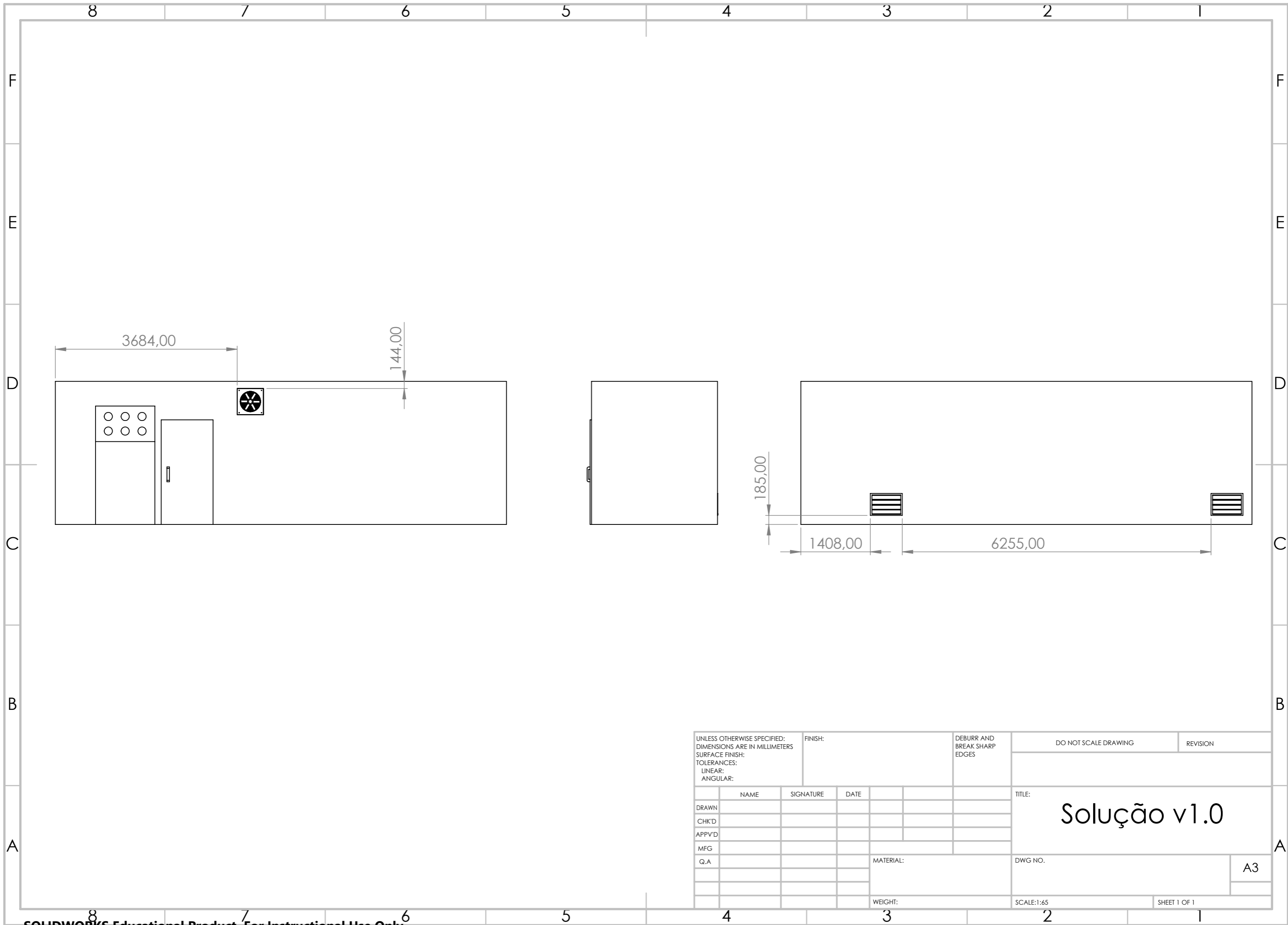
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:		A3	
DRAWN								Contentor Base			
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A											
						MATERIAL:		DWG NO.			
						WEIGHT:		SCALE:1:50		SHEET 1 OF 1	

.3 Desenho Técnico - Contentor Base c/ Cortes



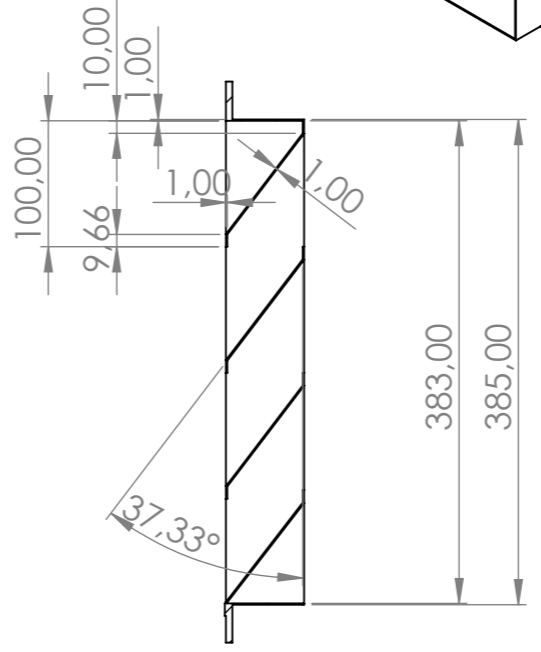
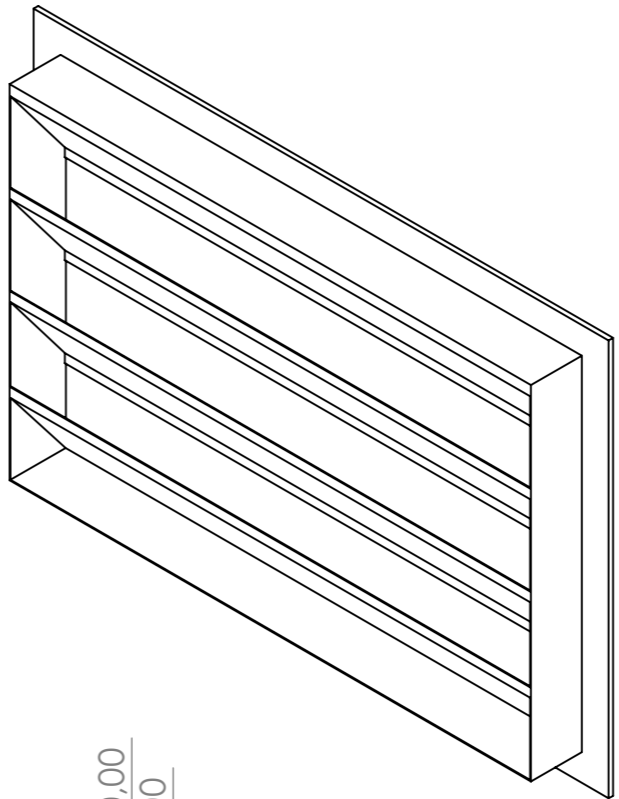
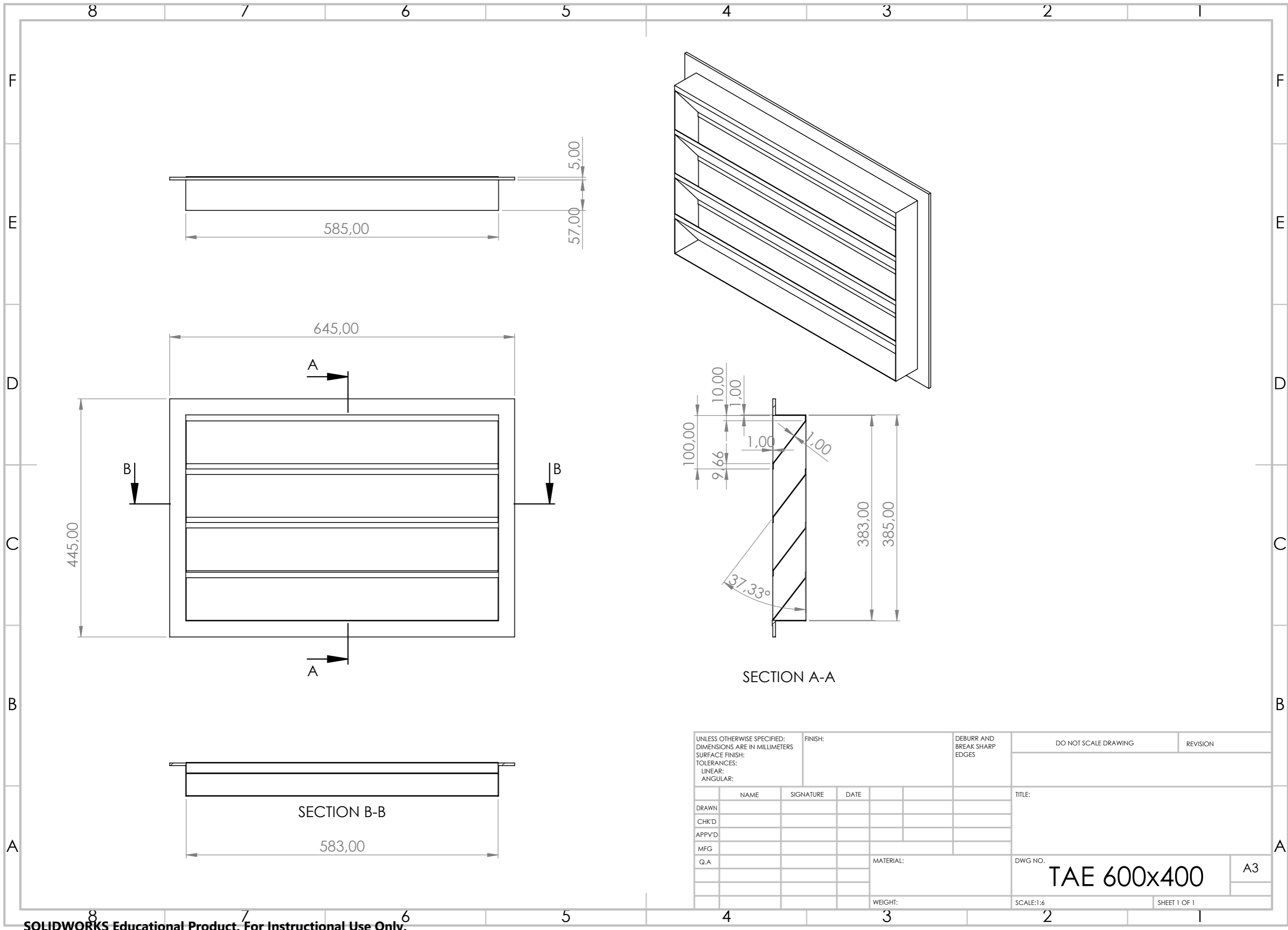
Apendice A

.4 Desenho Técnico - Solução v1.0

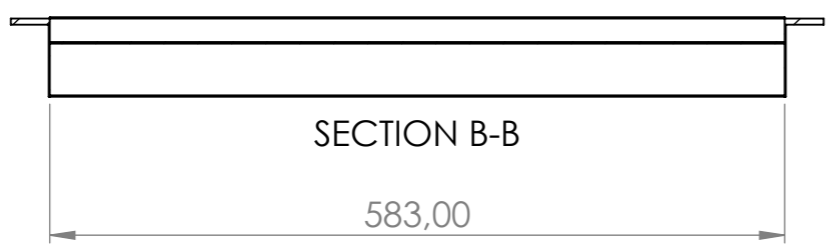


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								TITLE: Solução v1.0			
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		DWG NO.	
CHK'D										A3	
APPV'D										SCALE:1:65	
MFG										SHEET 1 OF 1	
Q.A								MATERIAL:		WEIGHT:	

.5 Desenho Técnico - TAE 600x400



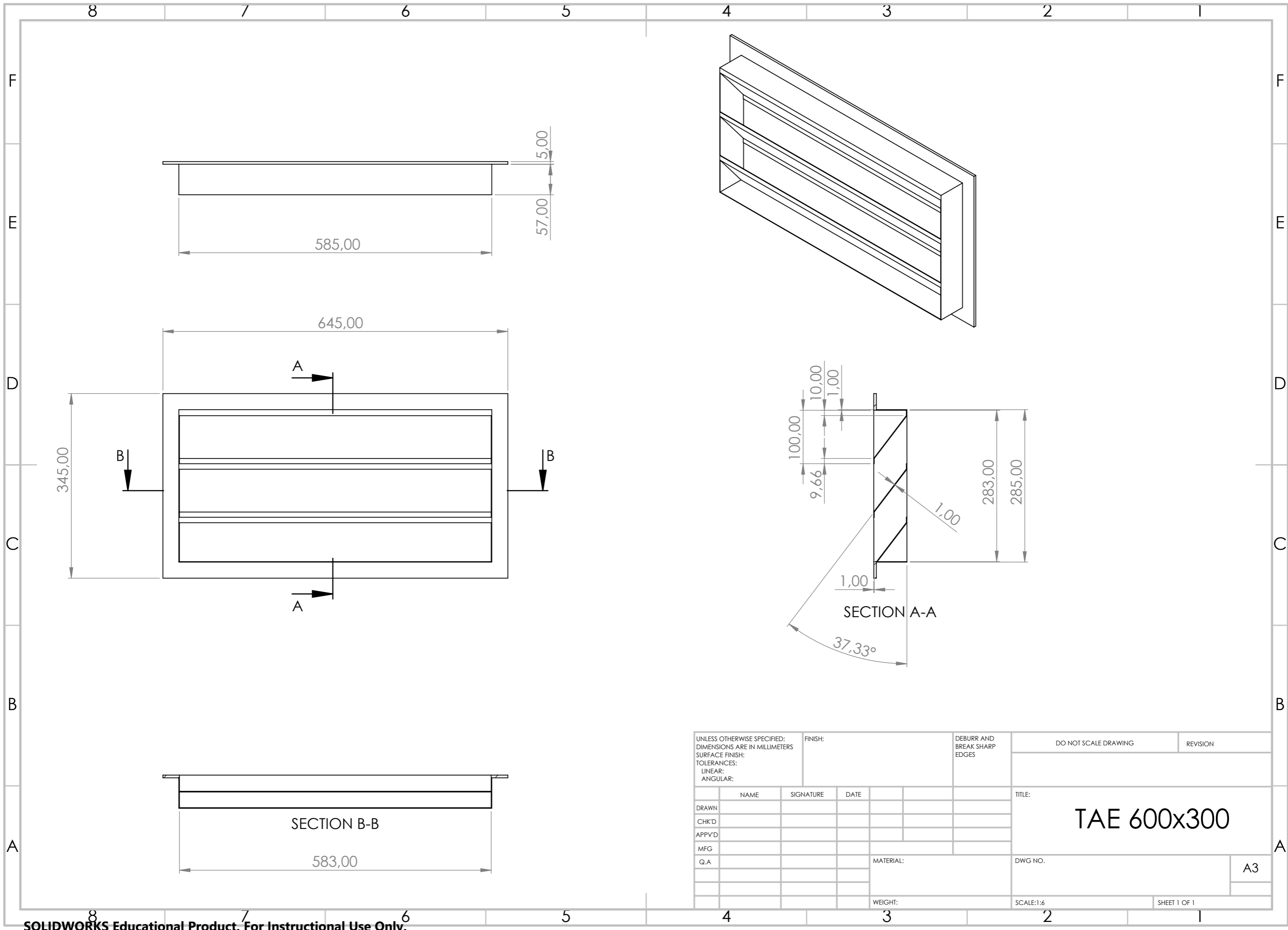
SECTION A-A



SECTION B-B

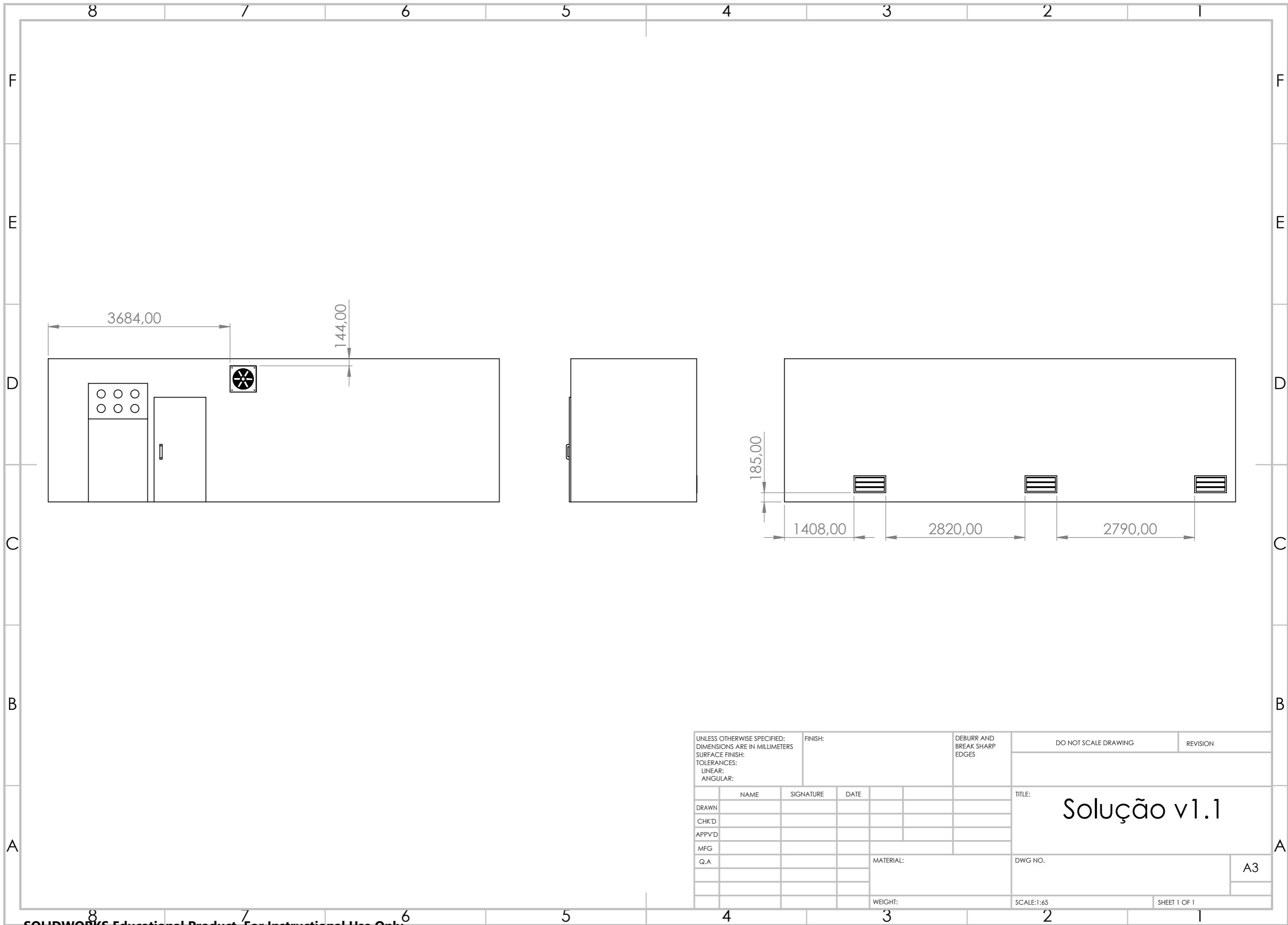
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN			NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:		
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A							MATERIAL:		DWG NO.		
									TAE 600x400		
							WEIGHT:		SCALE:1:6		
									SHEET 1 OF 1		
									A3		

.6 Desenho Técnico - TAE 600x300



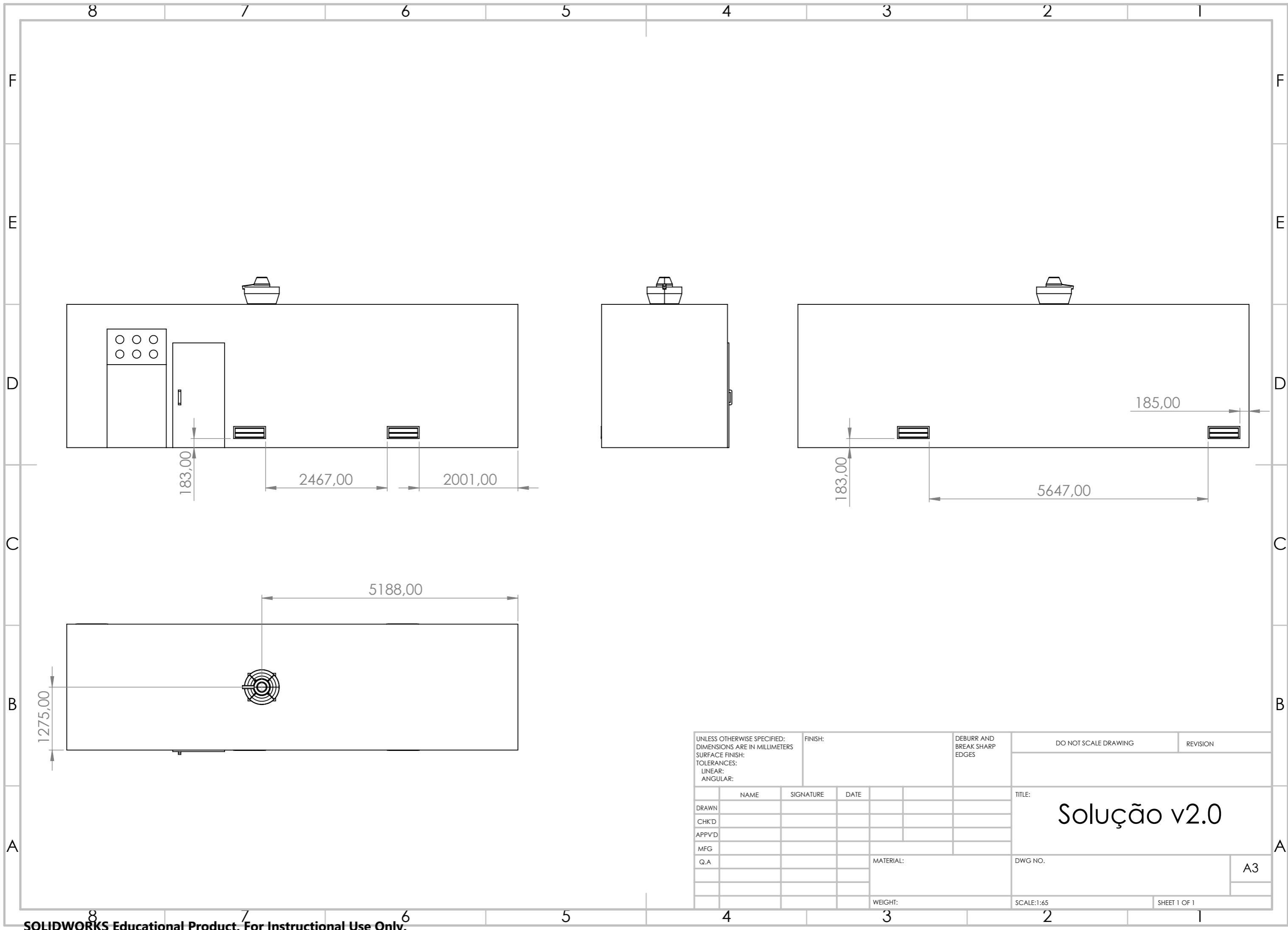
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN			NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE: TAE 600x300		
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A							MATERIAL:		DWG NO.		A3
							WEIGHT:		SCALE:1:6		SHEET 1 OF 1

.7 Desenho Técnico - Solução v1.1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
							TITLE: Solução v1.1				
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		DWG NO.			
CHK'D								A3			
APPV'D								SCALE:1:65			
MFG								SHEET 1 OF 1			
Q.A								WEIGHT:			

.8 Desenho Técnico - Solução v2.0



183,00

2467,00

2001,00

183,00

5647,00

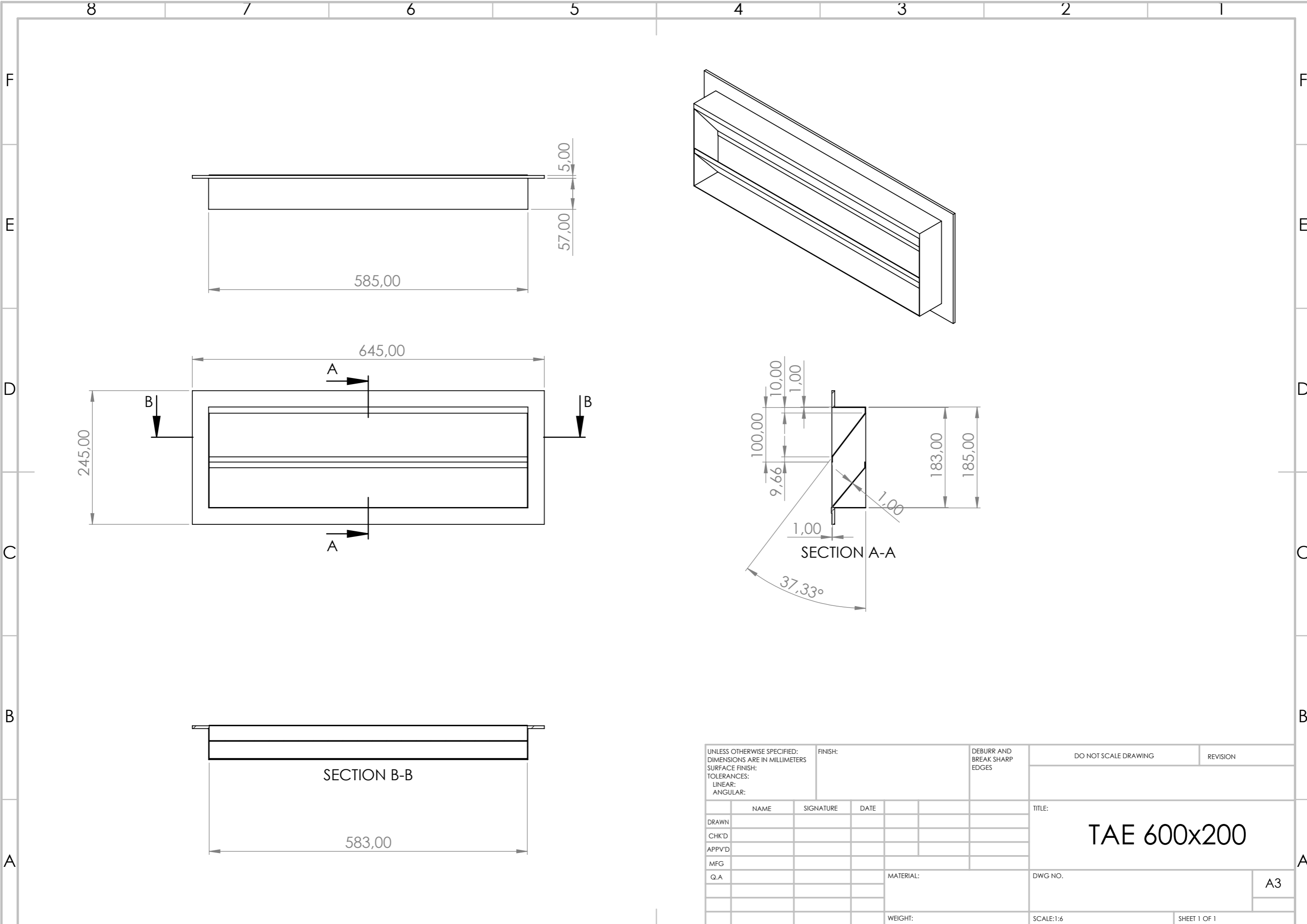
185,00

5188,00

1275,00

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
							TITLE: Solução v2.0				
DRAWN			SIGNATURE		DATE		DWG NO.		A3		
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A							MATERIAL:				
							WEIGHT:		SCALE:1:65		
									SHEET 1 OF 1		

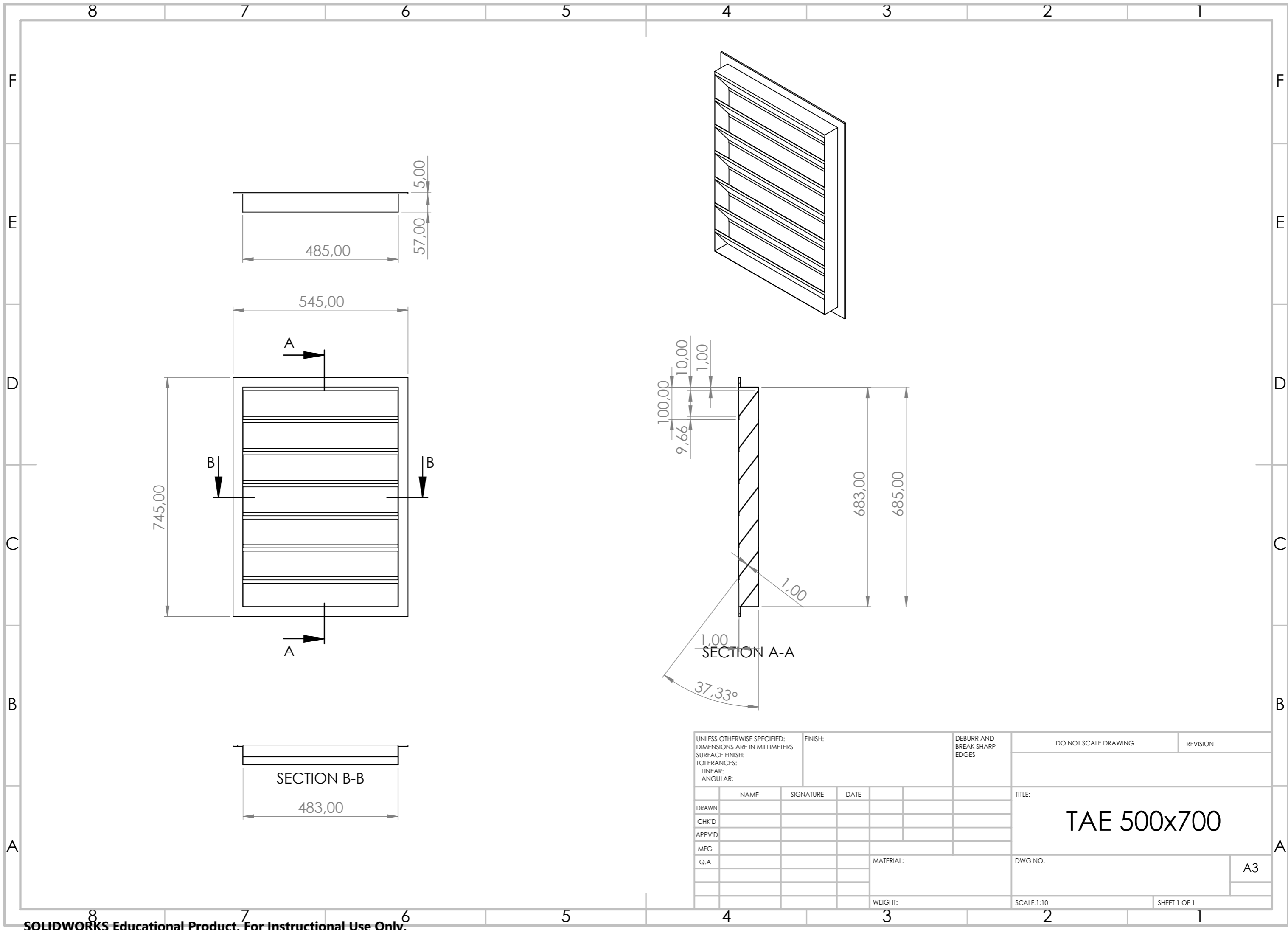
.9 Desenho Técnico - TAE 600x200



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:		TAE 600x200	
DRAWN											
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		A3	
						WEIGHT:		SCALE:1:6		SHEET 1 OF 1	

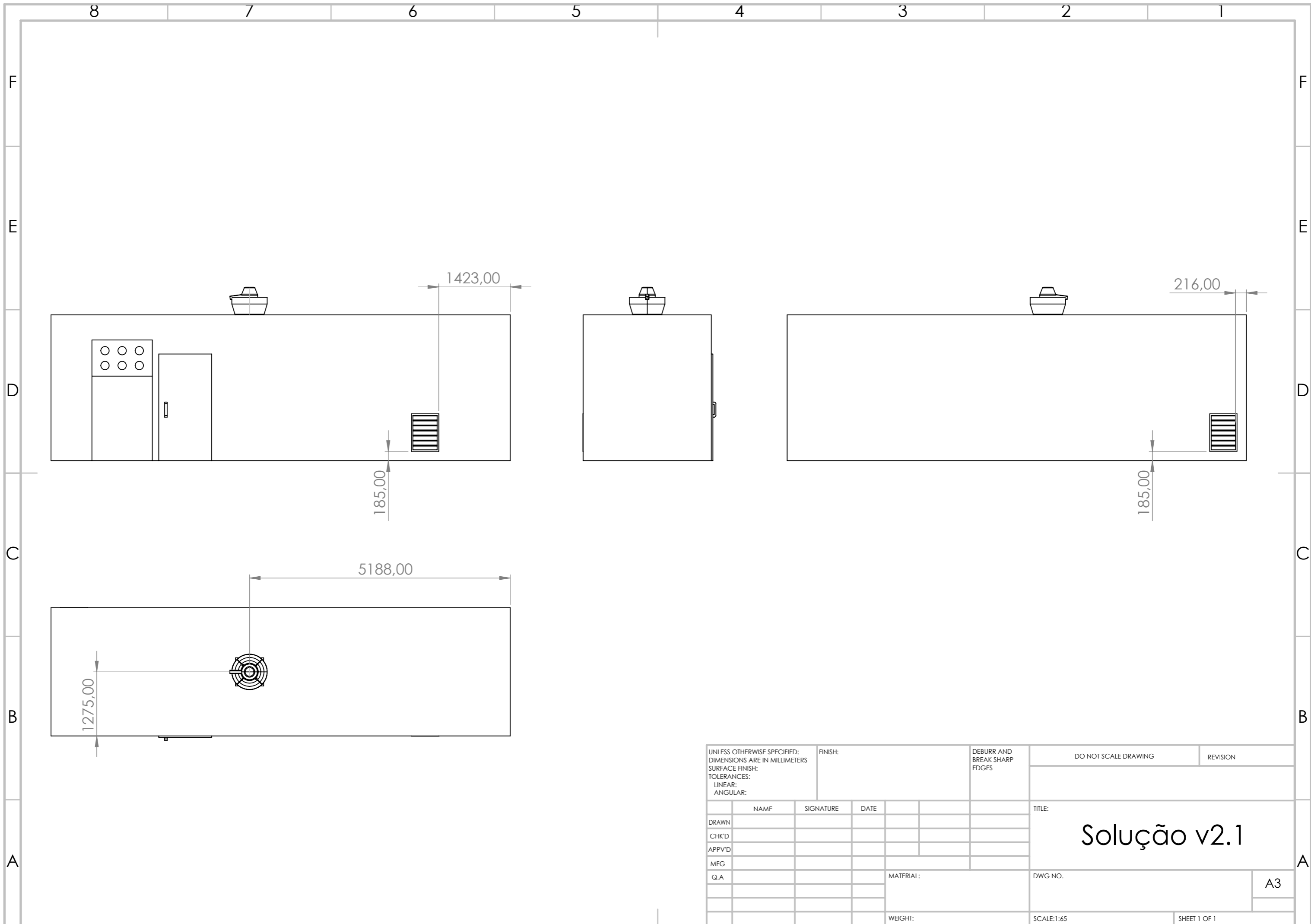
Apendice A

.10 Desenho Técnico - TAE 500x700



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:										
TOLERANCES:										
LINEAR:										
ANGULAR:										
			NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
DRAWN									TAE 500x700	
CHK'D										
APPV'D										
MFG										
Q.A										
					MATERIAL:		DWG NO.		A3	
					WEIGHT:		SCALE:1:10		SHEET 1 OF 1	

.11 Desenho Técnico - Solução v2.1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								TITLE:			
								Solução v2.1			
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		DWG NO.	
CHK'D										A3	
APPV'D										SCALE:1:65	
MFG										SHEET 1 OF 1	
Q.A								MATERIAL:		WEIGHT:	

.12 Desenho Técnico - Tabelas A.1 e A.2 da IEC 60079-10-1

Anexo A - Primeiro anexo

.13 Tabela B.1 da norma IEC 60079-10-1

Table B.1 – Suggested hole cross sections for secondary grade of releases

Type of item	Item	Leak Considerations		
		Typical values for the conditions at which the release opening will not expand	Typical values for the conditions at which the release opening may expand, e.g. erosion	Typical values for the conditions at which the release opening may expand up to a severe failure, e.g. blow out
		S (mm ²)	S (mm ²)	S (mm ²)
Sealing elements on fixed parts	Flanges with compressed fibre gasket or similar	≥ 0,025 up to 0,25	> 0,25 up to 2,5	(sector between two bolts) × (gasket thickness) usually ≥ 1 mm
	Flanges with spiral wound gasket or similar	0,025	0,25	(sector between two bolts) × (gasket thickness) usually ≥ 0,5 mm
	Ring type joint connections	0,1	0,25	0,5
	Small bore connections up to 50 mm ^a	≥ 0,025 up to 0,1	> 0,1 up to 0,25	1,0
Sealing elements on moving parts at low speed	Valve stem packings	0,25	2,5	To be defined according to Equipment Manufacturer's Data but not less than 2,5 mm ^{2 d}
	Pressure relief valves ^b	0,1 × (orifice section)	NA	NA
Sealing elements on moving parts at high speed	Pumps and compressors ^c	NA	≥ 1 up to 5	To be defined according to Equipment Manufacturer's Data and/or Process Unit Configuration but not less than 5 mm ^{2 d and e}

^a Hole cross sections suggested for ring joints, threaded connections, compression joints (e.g. metallic compression fittings) and rapid joints on small bore piping.

^b This item does not refer to full opening of the valve but to various leaks due to malfunction of the valve components. Specific applications could require a hole cross section bigger than suggested.

^c Reciprocating Compressors – The frame of compressor and the cylinders are usually not items that leak but the piston rod packings and various pipe connections in the process system.

^d Equipment Manufacturer's Data – Cooperation with equipment's manufacturer is required to assess the effects in case of an expected failure (e.g. the availability of a drawing with details relevant to sealing devices).

^e Process Unit Configuration – In certain circumstances (e.g. a preliminary study), an operational analysis to define the maximum accepted release rate of flammable substance may compensate lack of equipment manufacturer's data.

NOTE Other typical values or guidance on erosion and failure conditions may also be found in national or industry codes relevant to specific applications.

.14 Tabela A-1 do Livro de Termodinâmica

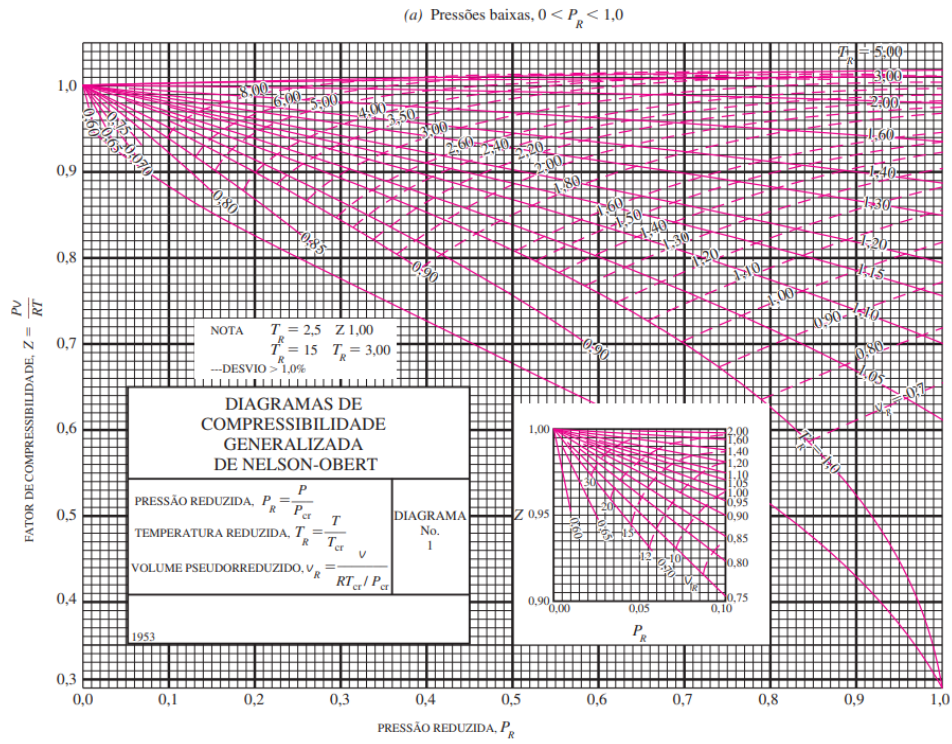
TABELA A-1

Massa molar, constante do gás e propriedades do ponto crítico

Substância	Fórmula	Massa molar, <i>M</i> kg/kmol	Constante do gás, <i>R</i> kJ/kg·K*	Propriedades do ponto crítico		
				Temperatura, K	Pressão, MPa	Volume, m ³ /kmol
Ar	—	28,97	0,2870	132,5	3,77	0,0883
Amônia	NH ₃	17,03	0,4882	405,5	11,28	0,0724
Argônio	Ar	39,948	0,2081	151	4,86	0,0749
Benzeno	C ₆ H ₆	78,115	0,1064	562	4,92	0,2603
Bromo	Br ₂	159,808	0,0520	584	10,34	0,1355
<i>n</i> -Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430	425,2	3,80	0,2547
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	0,1889	304,2	7,39	0,0943
Monóxido de carbono	CO	28,011	0,2968	133	3,50	0,0930
Tetracloro de carbono	CCl ₄	153,82	0,05405	556,4	4,56	0,2759
Cloro	Cl ₂	70,906	0,1173	417	7,71	0,1242
Clorofórmio	CHCl ₃	119,38	0,06964	536,6	5,47	0,2403
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120,91	0,06876	384,7	4,01	0,2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102,92	0,08078	451,7	5,17	0,1973
Etano	C ₂ H ₆	30,070	0,2765	305,5	4,48	0,1480
Álcool etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,1805	516	6,38	0,1673
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964	282,4	5,12	0,1242
Hélio	He	4,003	2,0769	5,3	0,23	0,0578
<i>n</i> -Hexano	C ₆ H ₁₄	86,179	0,09647	507,9	3,03	0,3677
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1240	33,3	1,30	0,0649
Kriptônio	Kr	83,80	0,09921	209,4	5,50	0,0924
Metano	CH ₄	16,043	0,5182	191,1	4,64	0,0993
Álcool metílico	CH ₃ OH	32,042	0,2595	513,2	7,95	0,1180
Clorometano	CH ₃ Cl	50,488	0,1647	416,3	6,68	0,1430
Neônio	Ne	20,183	0,4119	44,5	2,73	0,0417
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968	126,2	3,39	0,0899
Óxido nitroso	N ₂ O	44,013	0,1889	309,7	7,27	0,0961
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598	154,8	5,08	0,0780
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,1885	370	4,26	0,1998
Propileno	C ₃ H ₆	42,081	0,1976	365	4,62	0,1810
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,063	0,1298	430,7	7,88	0,1217
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,08149	374,2	4,059	0,1993
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137,37	0,06052	471,2	4,38	0,2478
Água	H ₂ O	18,015	0,4615	647,1	22,06	0,0560
Xenônio	Xe	131,30	0,06332	289,8	5,88	0,1186

*A unidade kJ/kg·K equivale a kPa·m³/kg·K. A constante do gás é calculada por $R = R_u / M$, onde $R_u = 8,31447$ kJ/kmol·K e M é a massa molar.
Fonte: K. A. Kobe e R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117-236; e ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 e 36.1.

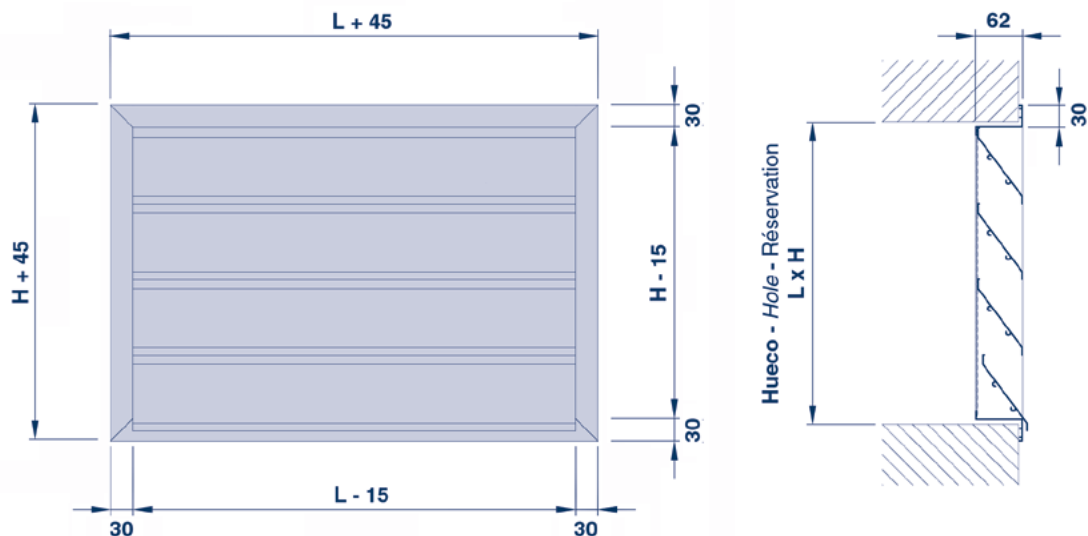
.15 Figura A-15 do Livro de Termodinâmica



Anexo B - Segundo anexo

.16 Ficha Técnica - Grelhas TAE da Tradair

DIMENSIONES | DIMENSIONS | DIMENSIONS



UTILIZACIÓN | USE | UTILISATION

- Aportación de aire exterior, expulsión de aire viciado o paso de aire entre estancias interiores.
- Fresh air intake, polluted air discharge or air circulation for indoors premises.
- Aportation d'air neuf, rejet d'air vicié ou circulation d'air entre pièces intérieures.

DESCRIPCIÓN | DESCRIPTION | DESCRIPTION

TAE

- Toma de aire en aluminio, simple deflexión con aletas antilluvia, fijas, horizontales, inclinadas a 45° separadas entre si 100 mm. Incluida una malla metálica antipájaros.
- Aluminium air louver, single deflection with rain proof, fixed, horizontal blades, 45° inclined and 100 mm. spaced. Included a screen against birds.
- Prise d'air en aluminium, simple déflexion à ailettes pare-pluie, fixes, horizontales, inclinées à 45°, séparées entre elles de 100 mm. Incluse une maille métallique antioiseaux.

ACABADO | FINISH | FINITION

- Aluminio natural.
- Natural aluminium.
- Aluminium naturel.

FIJACIÓN | FIXING | FIXATION

- Oculta mediante patillas recibidas en obra.
- Concealed with tabs sealed in the wall.
- Non apparente par pattes scellées dans l'oeuvre.

ACCESORIOS | ACCESSORIES | ACCESSOIRES

MI

- Malla metálica anti-insectos.
- Metallic screen against insects.
- Maille métallique anti-insectes.

NOTAS | NOTES | NOTES

- La toma de aire TAE puede ser fabricada en conjunto con las compuertas de regulación CRC, CRC/B (ver pág. 120) o CRA, CRA/B (ver pág. 122). Consultar.
- The TAE air louver can be jointly manufactured with CRC, CRC/B (see pag. 120) or CRA, CRA/B (see pag. 122) volume control dampers. Consult.
- La prise d'air TAE peut être fabriquée conjointement avec les clapets de réglage CRC, CRC/B (voir pag. 120) ou CRA, CRA/B (voir pag. 122). Consulter.

NOMENCLATURA DE ESPECIFICACIÓN | SPECIFICATION NOMENCLATURE | NOMENCLATURE DE SPÉCIFICATION

SERIE RANGE SÉRIE	TAMAÑO SIZE DIMENSION	ACABADO FINISH FINITION	-	ACCESORIO ACCESSORY ACCESSOIRE
Ejemplo: Example: Exemple:	TAE	1.000 X 800	Blanco RAL 9010 White RAL 9010 Blanc RAL 9010	- MI

TAE	L									
	500	600	700	800	900	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000
H	500	600	700	800	900	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000
200	71,56 €	81,99 €	90,42 €	98,74 €	105,01 €	111,38 €	134,08 €	156,94 €	192,41 €	198,30 €
300	85,41 €	96,83 €	104,12 €	111,38 €	114,53 €	117,65 €	157,44 €	183,71 €	205,71 €	230,13 €
400	99,31 €	112,07 €	124,38 €	134,02 €	142,74 €	151,39 €	180,94 €	210,40 €	235,18 €	262,46 €
500	113,40 €	125,44 €	140,86 €	152,37 €	159,45 €	166,48 €	197,94 €	229,53 €	260,65 €	294,47 €
600	145,82 €	164,15 €	173,47 €	188,14 €	199,82 €	211,44 €	250,76 €	290,25 €	322,70 €	358,50 €
700	160,17 €	181,00 €	190,77 €	206,40 €	218,95 €	231,45 €	274,34 €	317,24 €	352,14 €	390,75 €
800	174,56 €	196,18 €	213,98 €	224,30 €	237,90 €	251,49 €	297,46 €	343,57 €	381,40 €	423,23 €
900	207,47 €	230,30 €	249,75 €	269,26 €	285,18 €	291,49 €	344,39 €	397,27 €	440,35 €	488,04 €
1.000	222,05 €	246,47 €	267,18 €	287,87 €	304,86 €	311,45 €	367,60 €	423,74 €	469,73 €	520,59 €
1.100	236,90 €	262,71 €	284,67 €	306,54 €	324,55 €	342,62 €	390,97 €	450,50 €	499,18 €	552,98 €
1.200	266,19 €	294,97 €	319,41 €	343,86 €	363,97 €	384,01 €	437,75 €	503,97 €	558,10 €	618,31 €
1.300	280,78 €	311,26 €	337,16 €	363,05 €	384,34 €	405,64 €	476,70 €	531,00 €	587,45 €	650,19 €
1.400	292,09 €	323,56 €	350,20 €	376,89 €	398,61 €	420,33 €	494,97 €	551,03 €	616,75 €	682,54 €
1.500	321,06 €	355,47 €	384,60 €	413,69 €	437,40 €	461,24 €	542,70 €	624,31 €	675,64 €	747,53 €
1.600	335,80 €	371,56 €	401,84 €	432,15 €	456,91 €	481,68 €	566,81 €	651,91 €	705,38 €	780,04 €
1.700	350,36 €	387,60 €	419,14 €	450,64 €	476,38 €	502,14 €	590,75 €	679,55 €	735,05 €	812,56 €

SERIES COMPLEMENTARIAS | COMPLEMENTARY SERIES | SÉRIES COMPLÉMENTAIRES
ACABADO | FINISH | FINITION

- Para otros acabados lacados, consultar.
- For other lacqued finishes, consult.
- Pour autres finitions laquées, consulter.

Malla anti-insectos | Screen Against insects | Maille Anti-insectes
 Aluminio | Aluminium | Aluminium
 Aportación - Expulsión | Intake - Discharge | Aportation - Refoulement

DESCRIPCIÓN | DESCRIPTION | DESCRIPTION

- Toma de aire exterior con malla anti-insectos.

TAE	L									
	500	600	700	800	900	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000
H	500	600	700	800	900	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000
200	78,72 €	90,17 €	99,45 €	108,60 €	115,51 €	122,51 €	150,17 €	175,77 €	215,49 €	222,09 €
300	93,95 €	106,52 €	114,53 €	122,51 €	125,98 €	129,41 €	176,34 €	205,75 €	230,40 €	257,75 €
400	109,23 €	123,28 €	136,82 €	147,43 €	157,00 €	166,52 €	202,65 €	235,65 €	263,40 €	293,95 €
500	124,74 €	147,91 €	154,95 €	167,61 €	175,32 €	183,13 €	221,68 €	257,08 €	291,92 €	329,81 €
600	160,40 €	180,57 €	190,82 €	206,96 €	219,79 €	232,59 €	280,85 €	325,07 €	361,43 €	401,52 €
700	176,18 €	199,09 €	209,85 €	227,05 €	240,84 €	254,60 €	307,27 €	355,32 €	394,39 €	437,63 €
800	192,02 €	215,79 €	235,39 €	246,73 €	261,70 €	276,63 €	333,15 €	384,80 €	427,16 €	474,02 €
900	228,22 €	253,32 €	274,73 €	296,19 €	313,71 €	320,65 €	385,72 €	444,94 €	493,20 €	546,61 €
1.000	244,25 €	271,12 €	293,90 €	316,58 €	335,34 €	342,59 €	411,72 €	474,60 €	526,09 €	583,06 €
1.100	265,32 €	294,25 €	318,82 €	343,33 €	363,50 €	383,73 €	437,88 €	504,56 €	559,07 €	619,33 €
1.200	298,14 €	330,37 €	349,02 €	385,13 €	407,64 €	430,09 €	490,27 €	564,44 €	625,06 €	692,51 €
1.300	314,47 €	348,61 €	377,61 €	406,61 €	430,47 €	454,31 €	533,89 €	594,72 €	657,95 €	728,22 €
1.400	327,14 €	362,39 €	392,22 €	422,11 €	446,44 €	470,78 €	554,37 €	617,16 €	690,76 €	764,45 €
1.500	359,59 €	398,14 €	430,75 €	463,34 €	489,89 €	516,58 €	607,82 €	699,23 €	756,72 €	837,24 €
1.600	376,03 €	416,14 €	450,07 €	484,02 €	511,74 €	539,48 €	634,83 €	730,14 €	790,02 €	873,64 €
1.700	392,40 €	434,12 €	469,44 €	504,71 €	533,54 €	562,36 €	661,63 €	761,10 €	823,24 €	910,06 €

.17 Tabela D.1 da norma IEC 60079-10-1

Table D.1 – Zones for grade of release and effectiveness of ventilation

Grade of release	Effectiveness of Ventilation						
	High Dilution			Medium Dilution			Low Dilution
	Availability of ventilation						
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor	Good, fair or poor
Continuous	Non-hazardous (Zone 0 NE) ^a	Zone 2 (Zone 0 NE) ^a	Zone 1 (Zone 0 NE) ^a	Zone 0	Zone 0 + Zone 2 ^c	Zone 0 + Zone 1	Zone 0
Primary	Non-hazardous (Zone 1 NE) ^a	Zone 2 (Zone 1 NE) ^a	Zone 2 (Zone 1 NE) ^a	Zone 1	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 or zone 0 ^c
Secondary^b	Non-hazardous (Zone 2 NE) ^a	Non-hazardous (Zone 2 NE) ^a	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 1 and even Zone 0 ^d

^a Zone 0 NE, 1 NE or 2 NE indicates a theoretical zone which would be of negligible extent under normal conditions.

^b The Zone 2 area created by a secondary grade of release may exceed that attributable to a primary or continuous grade of release; in this case, the greater distance should be taken.

^c Zone 1 is not needed here. I.e. small Zone 0 is in the area where the release is not controlled by the ventilation and larger Zone2 for when ventilation fails.

^d Will be Zone 0 if the ventilation is so weak and the release is such that in practice an explosive gas atmosphere exists virtually continuously (i.e. approaching a 'no ventilation' condition).

'+' signifies 'surrounded by'.

Availability of ventilation in naturally ventilated enclosed spaces is commonly not considered as good.

.18 Ficha Técnica Ventilador HCDF/ATEX

HCDF-40-4T/2G EX DB

Código: 1006317



Ventiladores axiais com aro de montagem quadrado, certificação ATEX II 2G e motores Ex db, para uso com hidrogénio

Ventiladores axiais de parede com certificação ATEX e motor antideflagrante ExII2G Ex db, para trabalhar em atmosferas explosivas, com marcação IIB+H2 T4 para uso com hidrogénio.



Ventilador:

- Hélices em fundição de alumínio.
- Direção ar motor-hélice.
- Bucim antideflagrante incluído.
- Estrutura de suporte em chapa de aço, com banda de alumínio na zona da hélice conforme norma EN 14986.
- Rede de proteção contra contactos em conformidade com a norma EN ISO 12499.
- Marcação padrão com motor antideflagrante (Ex db): II 2G Ex h IIB+H2 T4 Gb.

Motor:

- Motores classe F, com rolamentos de esferas, proteção IP55, com certificação ATEX 2G, antideflagrante Ex db.
- Monofásico 230 V 50 Hz e trifásico 230/400 V 50 Hz (até 4 kW) e 400/690 V 50 Hz (potências superiores a 4 kW).
- Temperatura de trabalho: -20 °C +40 °C.

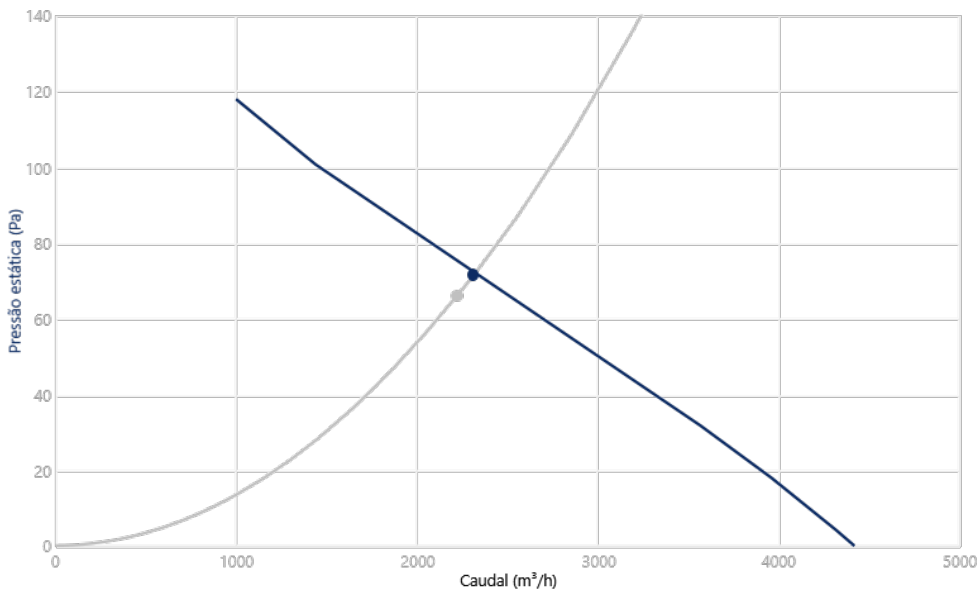
Acabamento:

- Resistente à corrosão com pintura ATEX, livre de componentes férricos, em resina de poliéster polimerizada a 190 °C, desengorduramento prévio com tratamento nanotecnológico sem fosfatos.

Sob consulta:

- Bobinagens especiais para diferentes tensões e frequências.
- Construção ATEX para diferentes categorias.
- Ventiladores com motores de 2 velocidades.

CURVA CARACTERÍSTICA E ACÚSTICA PARA 1,2KG/M³



Ponto de Desenho

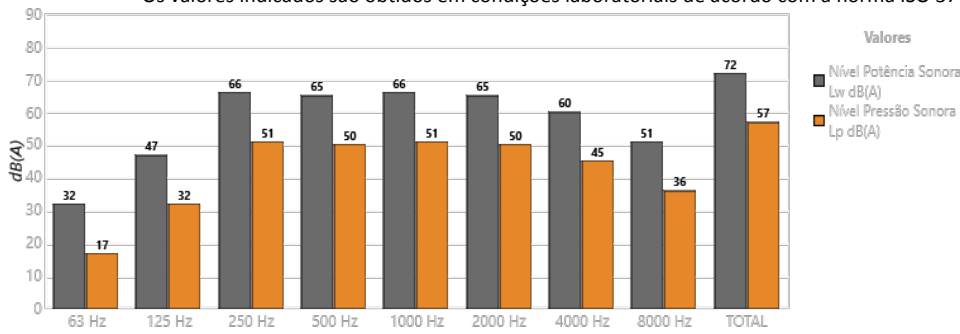
Q (m ³ /h)	2223
Pe (Pa)	66

Ponto Serviço (PS)

Q (m ³ /h)	2311
Pe (Pa)	71,32
Pd (Pa)	14,19
Pt (Pa)	85,51
Velocidade (rpm)	1420
Máx. Temp. (°C)	40
Velocidade saída ar (m/s)	4,863

Acústica: Aspiração, 1,5 (m), Campo livre

Os valores indicados são obtidos em condições laboratoriais de acordo com a norma ISO 3744



Faixa	Lw dB(A)	Lp dB(A)
63 Hz	32	17
125 Hz	47	32
250 Hz	66	51
500 Hz	65	50
1000 Hz	66	51
2000 Hz	65	50
4000 Hz	60	45
8000 Hz	51	36
TOTAL	72	57

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Caudal máximo (m ³ /h)	4415
Velocidade (rpm)	1420
Pressão estática máxima (Pa)	117,9
Pressão total máxima (Pa)	120,6

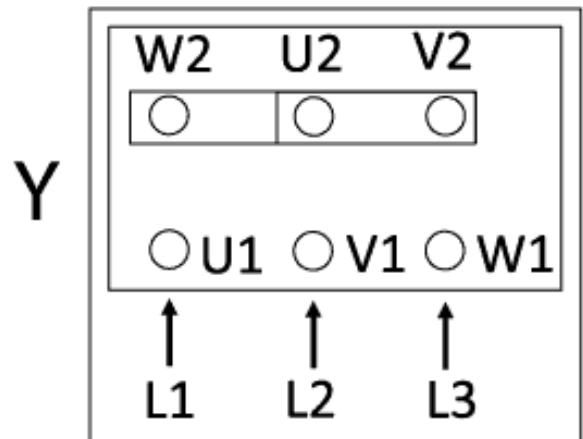
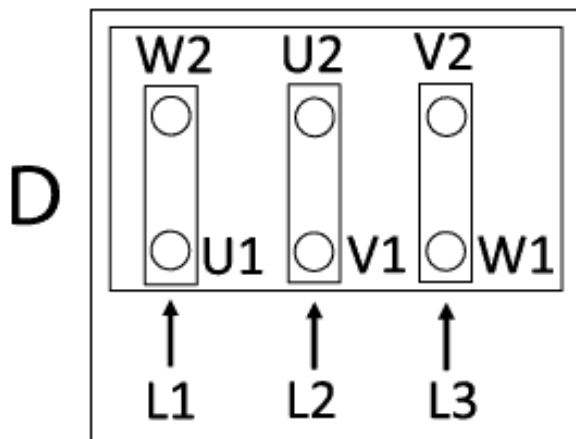
ERP

Observações	ErP: Excluído. ATEX
-------------	---------------------

DADOS DO MOTOR

Potência Mecânica Nominal (kW)	0,25	Corrente máx. (A) 400 V Y	0,75
Hz/fases	50/3	Corrente máx. (A) 230 V D	1,3
Motor (rpm)	1420	Tamanho da estrutura do motor	71
Pólos	4P		

Os dados podem mudar, consulte a placa do motor

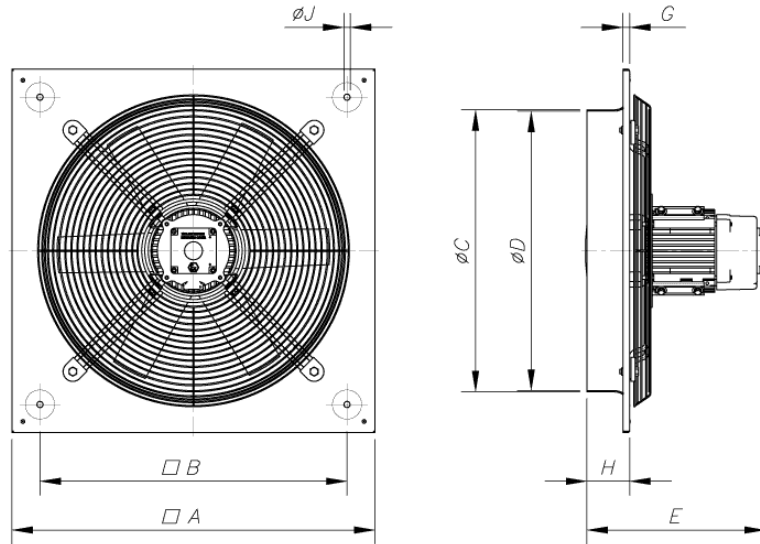


DIMENSÕES

A	B	ØC	ØD	E	G	H	ØJ
532	452	413	410	335	11	98	10,5

As dimensões sem unidades definidas explicitamente são mostradas em milímetros (mm). Dimensões dependentes do motor são aproximadas

Peso aprox. (kg)	12,5
------------------	------



ACESSÓRIOS DISPONÍVEIS

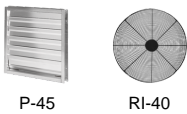
Acessórios gerais disponíveis



Acessórios disponíveis para aspiração

Não há acessórios disponíveis para aspiração

Acessórios disponíveis para impulsão



Deve-se verificar se o acessório é adequado para o modelo de ventilador

.19 Ficha Técnica Ventilador CVT/ATEX

CVT/ATEX-250-4T/2G EX DB

Código: 1007879



Ventiladores centrífugos de cobertura com saída vertical, certificação ATEX 2G ou 2D e motores Ex db, Ex eb ou Ex tb

Ventiladores centrífugos de cobertura, com saída de ar vertical e campânula de alumínio. Certificação ATEX 2G ou 2D com motor antideflagrante Ex db, segurança aumentada Ex eb ou proteção interior Ex tb, para trabalhar em atmosferas explosivas de gás ou poeira.



Ventilador:

- Turbina com pás recuadas.
- Rede de proteção anti-pássaros.
- Proteção antichuva em alumínio.
- Temperatura máxima do ar a transportar: -25 °C a +80 °C.
- Marcação padrão com motor antideflagrante (Ex db): II 2G Ex h IIB T4 Gb.
- Marcação padrão com motor de segurança aumentada (Ex eb): II 2G Ex h IIB T3 Gb.
- Marcação padrão com motor para pó (Ex tb): II 2D Ex h IIIC T135 °C Db.

Motor:

- Motores classe F com rolamentos de esferas e certificação ATEX antideflagrante Ex db, segurança aumentada Ex eb ou proteção do interior Ex tb.
- Trifásico 230/400 V 50 Hz (até 4 kW) e 400/690 V 50 Hz (potências superiores a 4 kW).
- Temperatura de trabalho: -20 °C +40 °C.

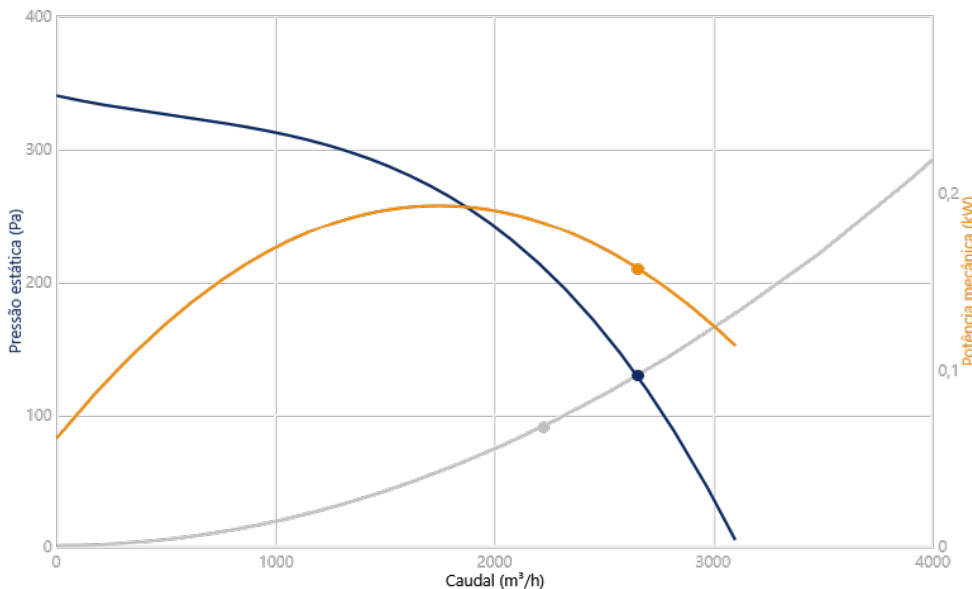
Acabamento:

- Chapa de aço galvanizado e alumínio.

Sob consulta:

- Motores com PTC incorporada.
- Bobinagens especiais para diferentes tensões e frequências.
- Construção ATEX para poeiras inflamáveis.
- Ventilador ATEX com proteção maior que a marcação padrão.
- Ventiladores com motores de 2 velocidades.
- Motores monofásicos antideflagrantes Ex db.

CURVA CARACTERÍSTICA E ACÚSTICA PARA 1,2KG/M³



Ponto de Desenho

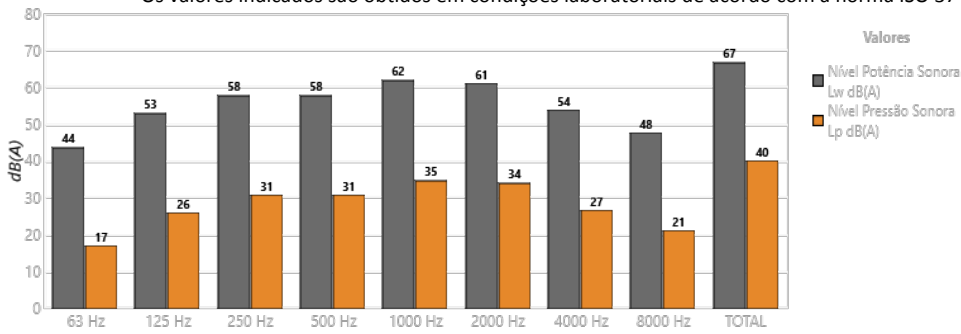
Q (m ³ /h)	2223
Pe (Pa)	90

Ponto Serviço (PS)

Q (m ³ /h)	2653
Pe (Pa)	128,2
Pd (Pa)	16,77
Pt (Pa)	145
Velocidade (rpm)	1350
Máx. Temp. (°C)	80
Velocidade saída ar (m/s)	5,287
Rendimento mecânico (Pt) (%)	68,19
SFP (kW/m ³ /s)	0,2953
Potência mecânica (kW)	0,1567

Acústica: Irradiação, 6 (m), Campo livre

Os valores indicados são obtidos em condições laboratoriais de acordo com a norma ISO 3744



Faixa	Lw dB(A)	Lp dB(A)
63 Hz	44	17
125 Hz	53	26
250 Hz	58	31
500 Hz	58	31
1000 Hz	62	35
2000 Hz	61	34
4000 Hz	54	27
8000 Hz	48	21
TOTAL	67	40

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Caudal máximo (m³/h)	3100
Velocidade (rpm)	1350
Pressão estática máxima (Pa)	339,6
Pressão total máxima (Pa)	339,6

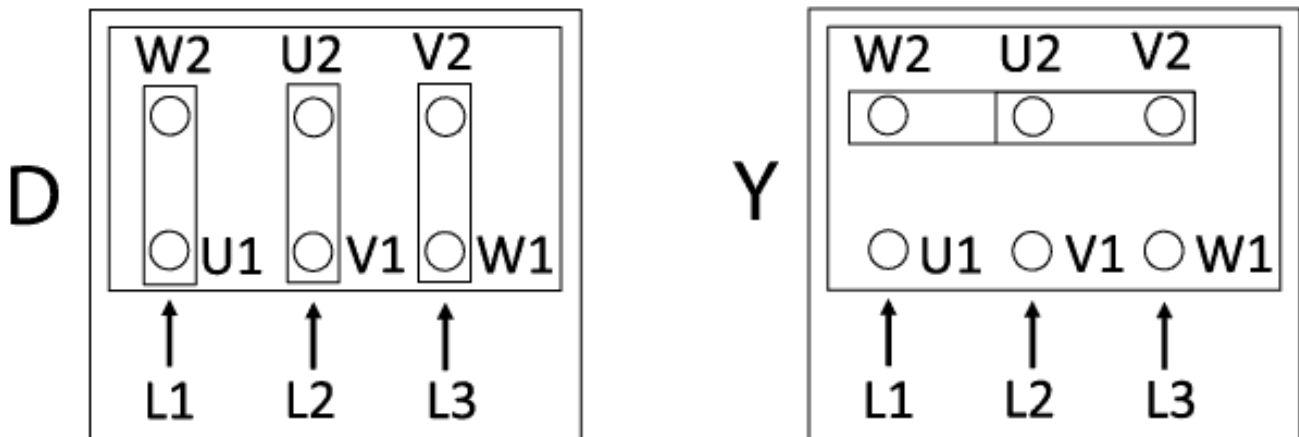
ERP

Observações	ErP: Excluído. ATEX
-------------	---------------------

DADOS DO MOTOR

Potência Mecânica Nominal (kW)	0,25	Corrente máx. (A) 380-415 V Y	0,69
Hz/fases	50/3	Corrente máx. (A) 220-240 V D	1,2
Motor (rpm)	1400	Proteção do motor	IP65
Pólos	4P	Tamanho da estrutura do motor	71A

Os dados podem mudar, consulte a placa do motor



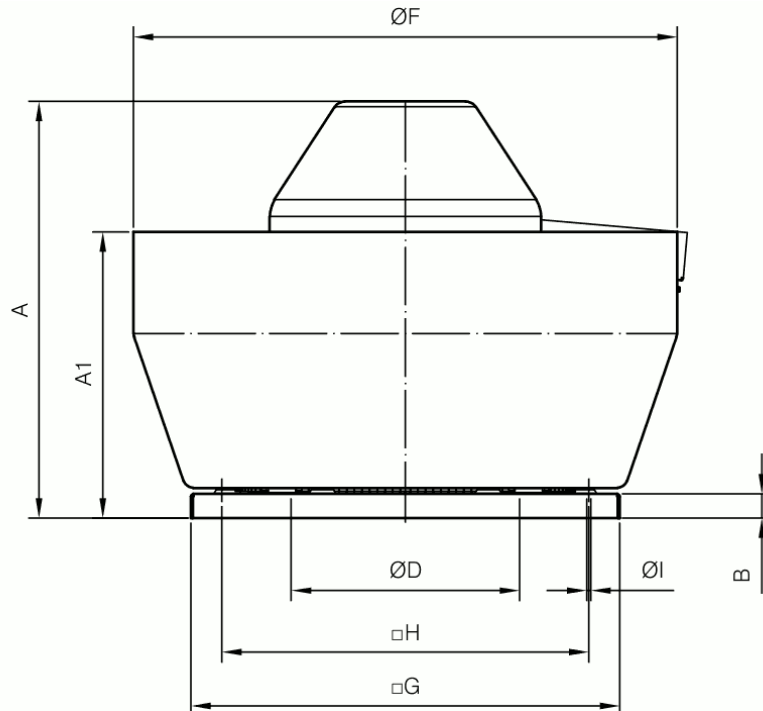
DIMENSÕES

A	A1	B	G	H	ØD* [1]	ØF	ØI
562	248	30	560	450	355	700	12

[1] Diâmetro nominal tubagens recomendadas

As dimensões sem unidades definidas explicitamente são mostradas em milímetros (mm). Dimensões dependentes do motor são aproximadas

Peso aprox. (kg)	34
------------------	----



ACESSÓRIOS DISPONÍVEIS

Acessórios gerais disponíveis



VSD3/A-RFT-1 VSD1/A-RFM-0.5 VSD3/A-RFT-1-IP66 VSD1/A-RFM-0.5-IP66 MS-553 PA-550 PT BS-553 BSS-553 INT/ATEX 16/3CA

Acessórios disponíveis para aspiração



B-355/3 S-355/900-A

Acessórios disponíveis para impulsão

Não há acessórios disponíveis para impulsão

Deve-se verificar se o acessório é adequado para o modelo de ventilador