

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL  
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

WANDESMER THIAGO SOARES PONTES

**AVALIAÇÃO DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL EM TANQUE CARACTERIZADO  
COMO ESPAÇO CONFINADO ATRAVÉS DE FLUIDODINÂMICA  
COMPUTACIONAL.**

MACEIÓ – AL  
2020

WANDESMER THIAGO SOARES PONTES

**AVALIAÇÃO DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL EM TANQUE CARACTERIZADO  
COMO ESPAÇO CONFINADO ATRAVÉS DE FLUIDODINÂMICA  
COMPUTACIONAL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como parte do requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Dayana de Gusmão Coêlho.

Co-orientador: Prof<sup>º</sup>. Dr. Rodolfo Brandão

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- P814a Pontes, Wandesmer Thiago Soares.  
Avaliação de ventilação industrial em tanque caracterizado como espaço confinado através de fluidodinâmica computacional / Wandesmer Thiago Soares Pontes. – 2020.  
69 f. il. : figs. ; tabs. color.
- Orientadora: Dayana de Gusmão Coêlho.  
Co-orientador: Rodolfo Brandão.  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).  
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.
- Bibliografia: f. 66-69.
1. Simulação (Computadores). 2. Fluidodinâmica computacional. 3. Espaço confinado. 4. Ventilação. I. Título.

CDU: 66.042.3

**Folha de Aprovação**

WANDESMER THIAGO SOARES PONTES

Avaliação de ventilação industrial em tanque caracterizado como espaço confinado  
através da fluidodinâmica computacional.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Alagoas como requisito para obtenção  
do Grau de Bacharel em Engenharia  
Química e aprovado em 17 de novembro  
de 2020.

Dayana de Gusmão Coelho

Profa. Dra. Dayana de Gusmão Coelho (Orientadora)

Rodolfo Junqueira Brandão

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão (Co-orientador)

**Banca Examinadora:**

Cristiane Holanda Sodré

Profa. Dra. Cristiane Holanda Sodré

Livia Maria de Oliveira Ribeiro

Profa. Dra. Livia Maria de Oliveira Ribeiro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me concedido sabedoria e determinação.

Aos meus pais, Ivânia Soares e Wandesmer Pontes, meus irmãos Kamyla Soares e Wallacy Jhon, por serem minha base e inspiração de força e perseverança.

À minha namorada, Bianca Moura, por me apoiar, incentivar e estarmos sempre compartilhando os momentos bons e difíceis.

Aos meus orientadores, Prof<sup>a</sup>. Dayana de Gusmão e Prof. Rodolfo Brandão, pelos ensinamentos, atenção, paciência e orientação.

Ao Prof. Edmundo Accioly, pelos ensinamentos, atenção e orientação em projetos de extensão.

Aos demais professores do curso, que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

À Proteq Jr., por todo desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos meus companheiros de curso, pela amizade construída durante a graduação.

Às professoras Cristiane Sodré e Lívia Ribeiro, componentes da banca examinadora.

“Deus é bom o tempo todo”

## Resumo

Em um cenário globalizado e competitivo o desempenho de produção industrial é o que faz uma organização ter um crescimento sólido e sustentável. A integridade de equipamentos e instalação possui relação direta com este fato, uma vez que paradas não programadas, fabricação de produtos de má qualidade e poluição ambiental impactam negativamente no processo produtivo. Atrelado a isso, torna-se evidente a necessidade de paradas programadas de manutenção, que visam reestabelecer e/ou potencializar a capacidade produtiva, qualidade e operação segura da unidade industrial. Nesse cenário, a utilização de espaços confinados – ambiente que não foi projetado para ocupação humana contínua, possui meios limitados/restritos de acesso e pode ocorrer atmosfera perigosa – possui elevado grau de risco. Dessa forma, a crescente exigência em melhorar as condições de trabalho nesses ambientes justifica o desenvolvimento desse trabalho, a qual objetiva avaliar a ventilação exaustora em um tanque desinventariado e propor medidas de segurança para que os padrões de saúde e segurança sejam garantidos durante atividades neste espaço. O trabalho será pautado no estudo do equipamento, coleta de informações técnicas, simulação fluidodinâmica e recomendação de medidas de saúde e segurança industrial. Ao fim deste trabalho, foi avaliado os padrões de ventilação natural e identificado que é necessário cuidados adicionais, apesar de atender ao cenário de “Mistura pobre ou liberação de contaminante desprezível” estabelecido pelo Guia Técnico Norma Regulamentadora 33. Quanto a ventilação mecânica exaustora, foi identificado que o local ideal de instalação do exaustor é na Boca de Visita – BV - de topo, frente aos riscos envolvidos em comparação com a BV lateral. Também foi avaliado os quesitos quanto ao escoamento do ar no interno do equipamento e zonas de recirculação ou deficientes de movimentação do fluido, identificou-se que o escoamento permeia todos os limites do equipamento, que não há zonas de recirculação ou baixa movimentação de fluido, também identificou-se que a taxa de massa nos cenários definidos pelo referido Guia Técnico é superior ao estabelecido para que no mínimo 01 pessoa exerça atividades classificadas como “trabalho pesado”. Em relação a presença de contaminante, identificou-se que 01 minuto ventilação exaustora a 1625 m<sup>3</sup>/h é insuficiente para remover o contaminante monóxido de carbono a uma concentração inicial de 10.000 ppm de modo a atingir os limites estabelecidos pela Norma Regulamentadora 15, pois a atmosfera ainda apresentaria risco à saúde humana. Por fim, recomendou-se medidas de segurança visando manter a saúde e segurança do colaborador em atividades realizadas em espaços confinados.

**Palavras-Chave:** Simulação. Fluidodinâmica. Espaço Confinado. Ventilação.

## Abstract

In a globalized and competitive scenario, the performance of industrial production is what makes an organization have a solid and sustainable growth. The integrity of equipment and installation is directly related to this fact, since unscheduled shutdowns, manufacturing of poor quality products and environmental pollution have a negative impact on the production process. Linked to this, it becomes evident the need for scheduled maintenance stops, which aim to reestablish and / or enhance the productive capacity, quality and safe operation of the industrial unit. In this scenario, the use of confined spaces - an environment that was not designed for continuous human occupation, has limited / restricted means of access and a dangerous atmosphere can occur - has a high degree of risk. Thus, the growing demand to improve working conditions in these environments justifies the development of this work, which aims to assess exhaust ventilation in a deinveted tank and propose safety measures so that health and safety standards are guaranteed during activities in this space . The work will be based on the study of the equipment, collection of technical information, fluid dynamics simulation and recommendation of industrial health and safety measures. At the end of this work, the natural ventilation patterns were evaluated and identified that additional care is necessary, despite meeting the scenario of "Poor mixture or release of negligible contaminant" established by the Technical Guide Regulatory Standard 33. As for mechanical exhaust ventilation, it was identified that the ideal location for the installation of the extractor is in the top of Visiting Mouth - BV -, facing the risks involved in comparison with the lateral BV. It was also evaluated the requirements regarding air flow inside the equipment and areas of recirculation or deficient fluid movement, it was identified that the flow permeates all the limits of the equipment, that there are no recirculation areas or low fluid movement, it was also identified that the mass rate in the scenarios defined by the referred Technical Guide is higher than that established so that at least 01 person performs activities classified as "heavy work". Regarding the presence of contaminant, it was found that 01 minute exhaust ventilation at 1625 m<sup>3</sup> / h is insufficient to remove the contaminant carbon monoxide at an initial concentration of 10,000 ppm in order to reach the limits established by Regulatory Standard 15, as the atmosphere would still present a risk to human health. Finally, safety measures were recommended to maintain the health and safety of employees in activities carried out in confined spaces.

**Key words:** Simulation. Fluid Dynamics. Confined space. Ventilation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Características de Espaço Confinado.....	19
Figura 2 - Espaços confinados quanto a atividade econômica.....	20
Figura 3 - Efeitos causados pela deficiência de oxigênio.....	25
Figura 4 - Parâmetros de tolerância a substâncias tóxicas.....	26
Figura 5 - Efeitos provocados à saúde pela exposição ao gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S).....	27
Figura 6 - Efeitos provocados à saúde pela exposição ao monóxido de carbono (CO).....	27
Figura 7 - Critérios de ventilação em Espaços Confinados.....	28
Figura 8 - Infográfico ventilação industrial.....	29
Figura 9 - Fluxo de ar que entra ou sai de um edifício por ventilação natural.....	30
Figura 10 - Movimentação do ar por ventilação natural.....	31
Figura 11 - “Efeito chaminé” .....	32
Figura 12 - Fator de correção devido a diferença entre área de entrada e saída de ar.....	32
Figura 13 - Fator de multiplicação para obter $QT$ .....	33
Figura 14 - Elementos constituintes da Ventilação Local Exaustora.....	34
Figura 15 - Exemplo de Ventilação Local Exaustora.....	35
Figura 16 - Relação entre atividade e taxa metabólica (W) parte 1.....	36
Figura 17 - Relação entre atividade e taxa metabólica (W) parte 2.....	37
Figura 18 - Relação entre taxa metabólica (W) e índice de bulbo úmido termômetro de globo (°C).....	38
Figura 19 - VGD por insuflação com curto-circuito.....	39
Figura 20 - VGD por insuflação com correção de curto-circuito.....	39
Figura 21 - VGD por exaustão de gases mais pesados que o ar.....	40
Figura 22 - VGD por exaustão de gases mais leves que o ar.....	41
Figura 23 - VGD por exaustão com curto-circuito.....	41
Figura 24 - VGD por exaustão com correção de curto-circuito.....	42
Figura 25 - Fluxograma de etapas de simulação CFD.....	46
Figura 26 - Geometria em ambiente Ansys SpaceClaim 2020 R2 Academic Student.....	47
Figura 27 - Malha computacional em ambiente Ansys Meshing 2020 R2 Academic Student..	48
Figura 28 – Gradiente de velocidade considerando vazão igual a 650 m <sup>3</sup> /h.....	56
Figura 29 – Gradiente de velocidade considerando vazão igual a 1625 m <sup>3</sup> /h.....	57
Figura 30 – Gradiente de velocidade considerando vazão igual a 9961 m <sup>3</sup> /h.....	57

Figura 31 - Avaliação de recirculação de ar.....	59
Figura 32 – Variação da concentração de monóxido de carbono em função do tempo.....	61
Figura 33 – Dados experimentais de ventilação e modelo matemático.....	61
Figura 34 – Fração volumétrica de monóxido de carbono.....	62

## LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1 - Informações básicas do equipamento.....	47
Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da malha.....	50
Tabela 3 - Condição de contorno.....	50
Tabela 4 - Relação entre áreas e percentagem de aumento.....	53
Tabela 5 – Velocidade média do vento em Maceió-AL.....	53
Tabela 6 - Cálculo da vazão do ar.....	53
Tabela 7 - Cálculo da taxa de renovação por hora.....	53
Tabela 8 - Vazão de exaustão requerida.....	55
Tabela 9 - Taxa de massa nas BVs de entrada e saída.....	56
Tabela 10 - Exigência humana de ar.....	58
Tabela 11 – Condição inicial de monóxido de carbono e parâmetros de exaustão.....	60

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ACGIH:** American Conference of Governmental Industrial Hygienist

**ASHRAE:** The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

**BV:** Boca de Visita

**CFD:** Computational Fluid Dynamics

**EPI:** Equipamento de Proteção Individual

**HSE:** Health and Safety Executive

**IDLH:** Immediately Dangerousto Life of Health

**IPVS:** Atmosfera Imediatamente Perigosa a Vida e Saúde

**LT:** Limite de Tolerância

**MVF:** Método dos Volumes Finitos

**NBR:** Norma Brasileira

**NHO:** Norma de Higiene Ocupacional

**NIOSH:** National Institute for Occupational Safety and Health

**NR:** Norma Regulamentadora

**OSHA:** Occupational Safety and Helth Administration

**VGD:** Ventilação Geral Diluidora

**VLE:** Ventilação Local Exaustora

## LISTA DE SÍMBOLOS

As dimensões são apresentadas em termo do comprimento (L), massa (M), tempo (T) e temperatura ( $\Theta$ ) e valores adimensionais são apresentados com o número 1.

<b>Símbolo:</b>	<b>Descrição:</b>	<b>Dimensão:</b>
<b>g:</b>	Gravidade	$LT^{-2}$
<b>A:</b>	Área	$L^2$
<b><math>\varphi</math>:</b>	Adimensional	1
<b>n:</b>	Número de renovações por hora	$T^{-1}$
<b><math>\rho</math>:</b>	Densidade do fluido	$ML^{-3}$
<b><math>\tau</math>:</b>	Tensão viscosa	$ML^{-1}T^{-1}$
<b>P:</b>	Pressão	$ML^{-1}T^{-2}$
<b>V:</b>	Volume	$L^3$
<b>Q:</b>	Vazão volumétrica	$L^3T^{-1}$
<b>Q<sub>v</sub>:</b>	Vazão volumétrica	$L^3T^{-1}$
<b>Q<sub>i</sub>:</b>	Vazão volumétrica	$L^3T^{-1}$
<b>H<sub>I</sub></b>	Diferença entre a altura de entrada e saída	L
<b>t:</b>	Tempo	T
<b><math>\theta_i</math>:</b>	Temperatura	$\Theta$
<b><math>\theta_e</math></b>	Temperatura	$\Theta$

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	17
<b>2.1. Geral</b> .....	17
<b>2.2. Específico</b> .....	17
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
<b>3.1. ESPAÇO CONFINADO</b> .....	18
<b>3.2. ACIDENTES</b> .....	21
<b>3.2.1. Acidentes com carência de oxigênio</b> .....	21
<b>3.3. PRINCIPAIS RISCOS NOS ESPAÇOS CONFINADOS</b> .....	23
<b>3.3.1. Riscos gerais</b> .....	23
<b>3.3.2. Riscos específicos</b> .....	23
<b>3.3.2.1. Deficiência ou enriquecimento de oxigênio</b> .....	24
<b>3.3.2.2. Substâncias tóxicas em espaços confinados</b> .....	25
<b>3.4. REQUISITOS NORMATIVOS QUANTO A VENTILAÇÃO INDUSTRIAL</b> ....	28
<b>3.4.1. NR33 e GUIA TÉCNICO NR33</b> .....	28
<b>3.5. VENTILAÇÃO INDUSTRIAL</b> .....	29
<b>3.5.1. Ventilação Natural</b> .....	30
<b>3.5.2. Ventilação Local Exaustora</b> .....	33
<b>3.5.3. Ventilação Geral para Conforto Térmico</b> .....	35
<b>3.5.4. Ventilação Geral Diluidora por Insuflamento</b> .....	38

3.5.5.	Ventilação Geral Diluidora por Exaustão .....	40
3.6.	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL .....	42
3.6.1.	Modelagem básica em Escoamentos.....	43
3.6.1.1.	Equação da continuidade .....	43
3.6.1.2.	Equação da quantidade de movimento .....	43
3.6.2.	Modelos de turbulência .....	44
3.6.3.	Método dos Volumes Finitos.....	45
4.	METODOLOGIA .....	46
4.1.	Geometria .....	47
4.2.	Malha .....	48
4.3.	Condições de contorno.....	50
4.4.	Processamento.....	51
4.5.	Pós-processamento .....	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
5.1.	Local de instalação do exaustor.....	52
5.2.	Avaliação de ventilação natural .....	52
5.3.	Simulação com base na condição do ambiente .....	54
5.3.1.	Análise da velocidade do escoamento .....	55
5.3.2.	Análise das zonas de recirculação .....	59
5.3.3.	Simulação com monóxido de carbono .....	60
6.	CONCLUSÃO .....	65

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
---	-----------



## 1. INTRODUÇÃO

A legislação que regulamenta atividades desenvolvidas em ambientes caracterizados como espaços confinados é relativamente recente no Brasil em comparação com a chegada das indústrias no país. A NR33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados – é a norma que regulamenta, juridicamente, as obrigações do empregado e empregador em atividades realizadas em espaços confinados, tendo sido publicada em 22 de setembro de 2006 pelo Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 2006).

Em um ambiente industrial encontra-se vários espaços confinados, sendo requerido uma atenção especial principalmente em paradas gerais de manutenção, onde um ou mais colaboradores adentram neste ambiente para realizar alguma atividade, geralmente, relacionada a manutenção do equipamento. Nesta ocasião, é necessário realizar a análise de risco e estabelecer medidas de controle para garantir a saúde e segurança dos colaboradores, como por exemplo: avaliar o cenário e condições da atividade, aplicação do bloqueio de energias perigosas e estabelecer atmosfera segura isenta de gases tóxicos e inflamáveis e com controle de ventilação adequada a fim de garantir o nível de oxigênio entre 19,5% a 23,5%.

Dentre os itens elencados acima, avaliar a ventilação em um equipamento pode não ser uma tarefa fácil. Prever comportamento de fluidos ou ainda pré-determinar condições operacionais seguras de um equipamento requer a resolução de equações diferenciais complexas e aplicação de métodos analíticos torna-se inviável, como por exemplo, o sistema de equações diferenciais parciais de *Navier Stokes*. Nesse contexto, a fluidodinâmica computacional surge como uma alternativa de resolução destas equações, através de métodos de discretização, como o Método dos Volumes Finitos, possibilitando avaliar o comportamento de um fluido num determinado volume de controle.

Desse modo, foi avaliado o escoamento de ar decorrente de uma exaustão mecânica num tanque desinventariado utilizando a técnica numérica da fluidodinâmica computacional como uma premissa confiável, na qual a aplicação do método dos volumes finitos permite avaliar o escoamento do fluido bem como as variações de suas propriedades devido a geometria complexa do equipamento.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Avaliar a ventilação exaustora e propor medidas de segurança para que os padrões de saúde e segurança sejam garantidos durante atividades no interno do equipamento, utilizando modelagem e simulação computacional.

### **2.2. Específico**

- Estudo de ventilação e coleta de informações técnicas;
- Modelagem e simulação fluidodinâmica computacional;
- Analisar o perfil de ventilação e zonas de recirculação;
- Recomendar medidas de segurança.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. ESPAÇO CONFINADO

O termo “espaço confinado” pode ser incomum para muitas pessoas, principalmente àquelas que estão externas ao ambiente industrial ou ainda que tem um conhecimento mínimo sobre segurança do trabalho. Moraes (2009) corrobora com esta afirmação, em que, segundo ele, as pessoas são incapazes de diferenciar o espaço confinado de outros ambientes, pois desconhecem os perigos inertes existentes.

O conceito de espaço confinado não é unânime entre normas internacionais, como a OSHA - Occupational Safety and Health Administration – e NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health -, e normas nacionais, como a NBR 14.787/01 e NR33.

A OSHA – Occupational Safety and Health Administration – estabelece:

Espaço confinado é um espaço que: 1) É grande o suficiente e possui uma configuração que um trabalhador consegue entrar fisicamente em seu interior e executar um trabalho designado, e; 2) Possui restrições ou limitações para entrada e saída de uma pessoa, como, por exemplo: tanques de armazenamento, vasos, porões de navios, torres, silos, caldeiras, dutos de ventilação e exaustão, túneis, valetas, tubulações etc., e; 3) Não foi projetado para ocupação contínua de trabalhadores (OSHA, 2005).

Já a NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health – introduz o a os fatores “ventilação” e “contaminantes” em seu conceito, conforme abaixo:

Espaço confinado é aquele que, em função do projeto, possui aberturas limitadas para entrada e saída; a ventilação natural é desfavorável, o ar ambiente pode conter ou produzir contaminantes perigosos e o local não se destina a ocupação contínua de um trabalhador”. Espaços confinados incluem, porém não se limitam a: tanques de armazenamento, porões de navios, vasos, torres, silos, caldeiras, dutos de ventilação e exaustão, túneis, valetas, tubulações, etc (NIOSH, 1979).

A legislação brasileira, pertinente ao tema em questão, passou por adequações significativas, sendo hoje a NR33 a norma que estabelece os critérios de segurança a serem adotados em se tratando de espaços confinados. A NBR 17.787/01 também aborda sobre este tema, mas, diferentemente da NR33, não possui caráter regulatório, sendo insuficiente para promover a segurança dos trabalhadores durante as atividades laborais, o que impossibilita

disciplinar o tema. Este fato foi alterado a partir da publicação da referida norma regulamentadora, em 2006 pelo Ministério do Trabalho e Emprego (TURAZI, 2015)

Esta norma regulamentadora e o Guia Técnico NR33 do MTE – Ministério do Trabalho e Emprego - reafirmam o conceito presente na NBR 14.787/01, ao conceituar:

Espaço Confinado é qualquer área ou ambiente não projetado para ocupação humana contínua, que possua meios limitados de entrada e saída, cuja ventilação existente é insuficiente para remover contaminantes ou onde possa existir a deficiência ou enriquecimento de oxigênio (BRASIL, 2006; BRASIL, 2013).

É notório que a norma estabelece características importantes em se tratando de espaços confinados. Avaliando apenas a ventilação, é abordada as seguintes recomendações:

Caso as avaliações iniciais indiquem a presença de riscos atmosféricos, o espaço confinado deve ser ventilado, purgado, lavado ou tornado inerte. A purga e a inertização são processos onde uma atmosfera perigosa é substituída por outra, com ar, vapor ou gás inerte. Nunca esquecer que a inertização implica na formação de uma atmosfera IPVS. A ventilação deve ser realizada para manter o percentual de oxigênio dentro de uma faixa segura, bem como proporcionar conforto térmico e respiratório aos trabalhadores (BRASIL, 2013).

Além disso, o Guia Técnico também traz um quadro ilustrativo que facilita o entendimento do conceito de espaço confinado, no qual estão dispostos três conceitos básicos para a definição de um espaço confinado, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Características de Espaço Confinado

O local é destinado a ocupação humana contínua?	Possui meios restritos, limitados, parcialmente obstruídos ou providos de obstáculos na entrada e/ou saída?	Pode ocorrer uma atmosfera perigosa?	É um espaço confinado?
SIM	SIM	SIM	NÃO
SIM	SIM	NÃO	NÃO
SIM	NÃO	SIM	NÃO
SIM	NÃO	NÃO	NÃO
NÃO	SIM	SIM	SIM
NÃO	SIM	NÃO	NÃO
NÃO	NÃO	SIM	NÃO
NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: Ministry of Labour Ontario Occupation Health and Safety (adaptado).

Espaços confinados incluem, mas não são limitados, a tanques de armazenamento, torres de destilação, recipientes processuais, poços, silos, cubas, vasos de reação, caldeiras, dutos de ventilação e exaustão, esgotos, túneis, depósitos subterrâneos e linhas de tubulação (PINTO, 2015). A Figura 2 exemplifica os espaços confinados de acordo com a atividade econômica.

Figura 2 – Espaços confinados quanto a atividade econômica

Setor econômico	Espaços confinados típicos
<b>Agricultura</b>	Biodigestores, silos, moegas, tremonhas, tanques, transportadores enclausurados, elevadores de caneca, poços, cisterna, esgotos, valas, trincheiras e dutos.
<b>Construção Civil</b>	Poços, valas, trincheiras, esgotos, escavações, caixas, caixões, shafts (passa dutos), forros, espaços limitados ou reduzidos e dutos.
<b>Alimentos</b>	Retortas, tubos, bacias, panelões, fornos, depósitos, silos, tanques, misturadores, secadores, lavadores de ar, tonéis e dutos.
<b>Têxtil</b>	Caixas, recipientes de tingimento, caldeiras, tanques e prensas.
<b>Papel e Polpa</b>	Depósitos, torres, colunas, digestores, batedores, misturadores, tanques fornos e silos.
<b>Editoras e Impressão Gráfica</b>	Tanques
<b>Indústrias do Petróleo e Indústrias Químicas</b>	Reatores, vasos de reação ou processos, colunas de destilação, tanques, torres de resfriamento, áreas de diques, filtros coletores, precipitadores, lavadores de ar, secadores e dutos.
<b>Borracha</b>	Tanques, fornos e misturadores.
<b>Couro</b>	Tonéis, tanques e poços.
<b>Tabacos</b>	Secadores e tonéis.
<b>Concreto, argila, pedras, cerâmica e vidro</b>	Fornos, depósitos, silos, tremonhas, moinhos e secadores.
<b>Metalurgia</b>	Depósitos, dutos, tubulação, silos, poços, tanques, desengraxadores, coletores e cabines.
<b>Eletrônica</b>	Desengraxadores, cabines e tanques.
<b>Transporte</b>	Tanque nas asas dos aviões, caminhões-tanque, vagões tanques ferroviários, tanques e navios-tanque.
<b>Serviços Sanitários, de águas e de esgotos. Serviços de gás, eletricidade e telefonia</b>	Poços de válvulas, galerias, tanques sépticos, poços, poços químicos, reguladores, poços de lama, poços de água, caixa de gordura, estações elevatórias, esgotos e drenos, digestores, incineradores, estações de bombas, dutos, caixas, caixões e enclausuramentos.
<b>Equipamentos e Máquinas</b>	Caldeiras, transportadores, coletores e túneis.
<b>Operações Marítimas</b>	Porões, container, caldeiras, tanques de combustível e de água, compartimentos e dutos.

Fonte: Adaptação (REKUS, 1994). REKUS, J. F. Complete Confined Spaces Handbook. Taylor & Francis, Inc.: 1994.

Dessa forma, é notório que a norma estabelece características importantes em se tratando de espaços confinados. Dentre os temas que foram elencados acima, será tratado de um modo aprofundado os itens que se referem a ventilação em espaços confinados.

## **3.2. ACIDENTES**

Um local recorrente de acidentes fatais e não fatais na indústria é o espaço confinado (McManus, 1999). O livro “Complete Confined Spaces Handbook” do autor John Rekus apresentou alguns acidentes com o intuito de ilustrar o perigo que existe em não se compreender o potencial de dano dos espaços confinados, acima de tudo a pouca sensibilidade para a não monitorização dos espaços e em particular para a identificação dos níveis de oxigênio. Abaixo são apresentados os exemplos que usou no livro.

### **3.2.1. Acidentes com carência de oxigênio**

#### Acidente 1: Carência de oxigênio devido à inertização

Após concluir o trabalho de soldadura em um tubo com 6 m, que estava conectado a um gerador de vapor e uma bomba, os soldadores purgaram a seção da linha com azoto. Ao finalizar o trabalho, puseram uma tampa na linha de azoto para impedir a passagem. No dia seguinte, dois montadores de andaimes foram indicados para realizar a montagem e desmontagem do andaime. O primeiro montador desceu utilizando uma escada suspensa acima da extremidade da bomba do cano, encostou inadvertidamente na tampa que tamponava a entrada do azoto, deixando que o azoto retornasse a adentrar no espaço confinado, ocasionando a perda do estado de consciência. Com isso, o segundo montador, ao adentrar, olhou para baixo e como não enxergou o colega que tinha entrado primeiramente, preocupou-se e desceu ligeiramente a escada para averiguar, encontrando-o inconsciente. Este segundo trabalhador estava a sentir-se entorpecido e tonto, mas, ainda assim, conseguiu subir a escada e pedir ajuda. Começou-se a soprar ar para o interior e o chefe de equipe desceu por uma corda. Após efetuar o resgate, os trabalhadores foram transportados para o hospital. O montador de andaimes, que entrou no espaço primeiramente, faleceu alguns dias após. A causa da morte foi definida como sendo asfixia resultante do deslocamento do ar na área da bomba pelo azoto, que tinha servido para purgar o tubo (MARTINS, 2018).

#### Acidente 2 – Carência de oxigênio devido a um gás na proximidade

No dia 5 de novembro de 2011, o empreiteiro Mark Bullock, 50 anos, da Milton, Stoke on Trent, estava realizando a reparação dentro do forno da John Pointon & Sons Ltd. quando houve o acidente. Um gás de um outro equipamento alimentou a área onde ele estava trabalhando. Mark conseguiu ser resgatado com vida, mas faleceu no hospital no dia seguinte.

A investigação do Health and Safety Executive (HSE) averiguou que o empreiteiro foi autorizado a entrar no forno sem nenhum tipo de precauções. A empresa não havia avaliado adequadamente os riscos e, devido a isso, não tinha implantado nenhum tipo de autorização de trabalho. Em 2004, outro funcionário já havia morrido neste mesmo espaço confinado. Em 29 de junho de 2015, a John Pointon & Sons Ltd, de Bones Lane, Cheddleton, Leek, foi multada em £ 660.000, após se declarar culpada de violar a Seção 3 da Health and Safety at Trabalho Act 1974 (MARTINS, 2018).

#### Acidente 3 – Carência de oxigênio devido a gases tóxicos

Em 14 de julho de 2015, a Agência de Controle Marítimo da Malásia comunicou que recebeu uma chamada de socorro do MV Hi Ram, situado a cerca de 4 milhas náuticas de Tanjung (navio que navegava pela região costeira da Malásia). No local, depararam-se com os corpos de cinco tripulantes dispostos no convés do navio, todos vietnamitas. De acordo com a Agência de Controle Marítimo da Malásia, as vítimas inalaram gases tóxicos enquanto trabalhavam no espaço confinado do navio. A agência não especificou que tipo de carga o MV Hi Ram estava a transportar (MARTINS, 2018).

#### Acidente 4 - Carência de oxigênio devido ao dióxido de carbono

Em 12 de novembro de 2015, Stephen Reyna de 53 anos, estava trabalhando nas instalações da Atlantic Coffee em Houston há 20 anos, em uma seção da fábrica no qual o café era descafeinado quando uma válvula com defeito começou a libertar dióxido de carbono. Outros trabalhadores depararam-se com Stephen inconsciente e deram o alarme. A equipe de resgate ainda conseguiu retirá-lo do local com vida e transportaram-no para o Hospital Memorial Hermann, em Houston, mas acabou falecendo uma hora depois. A Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA) fez a vistoria da instalação Atlantic Coffee Solutions, no local onde o acidente ocorreu, e acusou a empresa por nove graves violações de segurança (MARTINS, 2018).

De fato, a ventilação em espaços confinados é um importante fator na prevenção de acidentes, garantindo uma atmosfera segura e o nível de oxigênio para que as pessoas envolvidas nas atividades possam exercê-la com segurança.

### **3.3. PRINCIPAIS RISCOS NOS ESPAÇOS CONFINADOS**

Os riscos em um espaço confinado podem estar atrelados a atividade que será desempenhada no mesmo ou ainda a integridade do equipamento. De acordo com Moraes (2009), as principais atividades realizadas em um espaço confinado, tanto na construção e montagem, como em processos, são principalmente limpeza, inspeção, manutenção.

Soterramento, deficiência de oxigênio, riscos ergonômicos, riscos químicos, explosão e incêndio, riscos elétricos, quedas e quedas de objetos, são os principais riscos que se encontram nos espaços confinados (KRZYZANIAK, 2010).

#### **3.3.1. Riscos gerais**

Nos espaços confinados os riscos gerais podem ser classificados como: mecânicos, que surgem do defeito de equipamentos; choque elétrico pelo contato com partes metálicas com tensão; quedas por escorregões; quedas de objetos no interior do espaço durante a execução das atividades; postura incorreta; riscos de soterramento e afogamento (MARTINS, 2014).

Além dos citados acima, a condição de um ambiente físico agressivo com elevado ruído e vibrações decorrentes de esmeril, furadeiras, martelos, entre outros, também se caracterizam como riscos gerais. Deficiência de iluminação, temperatura do ambiente (quente ou frio), presença de animais, sejam eles vivos ou mortos, além dos riscos decorrentes de problemas de comunicação entre a parte interna e externa do espaço confinado. Todos esses representam riscos em espaços confinados (SILVA, 2009).

#### **3.3.2. Riscos específicos**

Os riscos específicos em espaços confinados estão relacionados ao enriquecimento e deficiência de oxigênio, incêndio e explosão e pela presença de substâncias tóxicas. (CAMPOS, 2007; NUNES, 2011; SERRÃO; QUELHAS; LIMA, 2000). Estes fatores em determinadas concentrações criam uma Atmosfera Imediatamente Perigosa a Vida e Saúde – IPVS, denominada também como Immediately Dangerous to Life or Health – IDLH.

Gases e vapores são os componentes da maioria dos contaminantes presentes nos espaços confinados. “Gás é uma substância que nas condições normais de pressão e temperatura já está no estado gasoso” e “Vapor é o estado gasoso de uma substância que nas condições normais de pressão e temperatura está no estado líquido.” (BREVIGLIERO; POSSEBON; SPINELLI, 2010)



### **3.3.2.1. Deficiência ou enriquecimento de oxigênio**

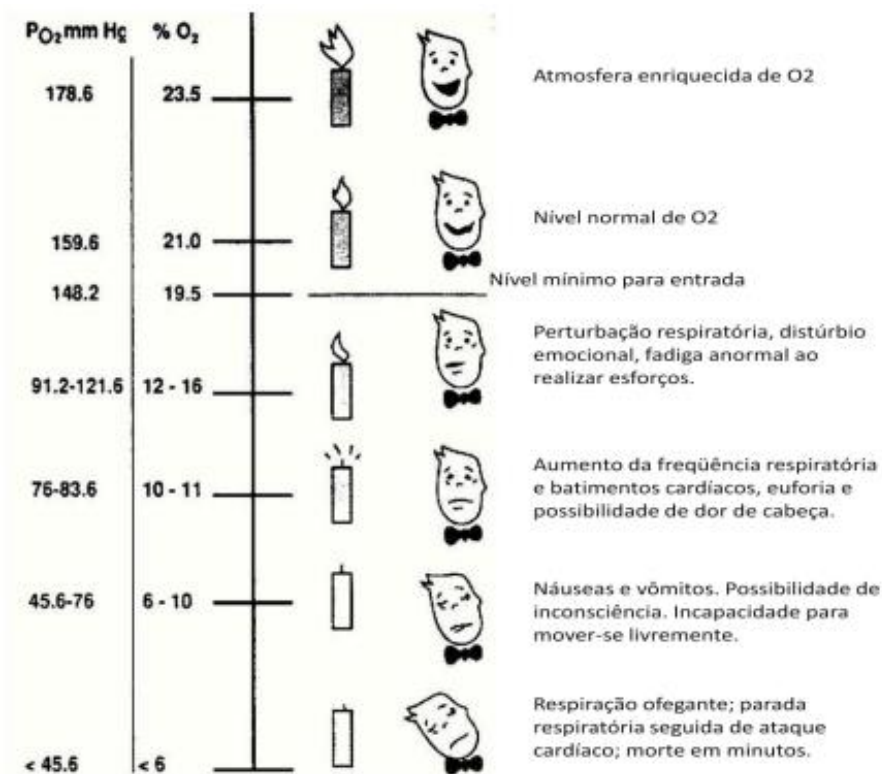
Há vários fatores que contribuem para a deficiência de oxigênio em espaços confinados. Algumas reações químicas podem consumir o oxigênio, entre elas estão: fermentação ou oxidação de tubulações, abertura de chama acetilênica, gases inertes como argônio e nitrogênio, além de superfícies porosas, como carvão ativado, que também tem poder de absorver o oxigênio (BREVIGLIERO, POSSEBON e SPINELLI, 2010; CAMPOS 2011).

A insuficiência de oxigênio é a maior causa de mortes em espaços confinados, pois não pode ser detectada visualmente e a situação é tão inesperada que a vítima não tem tempo para reagir. (NUNES, 2011).

A NR33 define a deficiência de oxigênio atmosfera contendo menos de 20,9% de oxigênio em volume na pressão atmosférica normal, a não ser que a redução do percentual seja devidamente monitorada e controlada, entretanto, o quando este controle informa níveis de oxigênio inferiores a 19,5% o ambiente é considerado deficiente de oxigênio e níveis superiores a 23%, o ambiente é considerado enriquecido com oxigênio (BRASIL, 2006; BRASIL, 2013), No cenário de deficiência de oxigênio o ambiente é considerado IPVS - Imediatamente Perigosa a Vida ou a Saúde - (CAMPOS, 2011).

A informação determinada pela referida norma regulamentadora também é defendida pelos autores Brevigliero, Possebon e Spinelli (2010), ao afirmarem que o teor de oxigênio no ar, em condições normais é de 21% porém o recomendado em ambientes de trabalho é superior a 19,5%, este valor é adotado em função ao elevado consumo de oxigênio durante o desenvolvimento de atividades mais difíceis. A Figura 3 demonstra os efeitos causados pela deficiência de oxigênio.

Figura 3 – Efeitos causados pela deficiência de oxigênio



Fonte: Rekus (1994).

Segundo Campos (2011) o ser humano não pode manter-se em atmosfera com teor de oxigênio superior a 23,5%, pois acima dessa concentração pode trazer danos ao cérebro. Hiperoxia é o nome que se dá ao excesso de tensão de oxigênio no corpo humano, ela causa vasodilatação cerebral, inflamação e espessamento do pulmão (broncodisplasia), aumento de radicais livres de oxigênio no sangue que pode causar lesão no sistema nervoso central. (AZEVEDO e OLIVEIRA JÚNIOR, 2009).

### 3.3.2.2. Substâncias tóxicas em espaços confinados

Para Breviglieri, Possebon e Spinelli (2010) nos espaços confinados, pode-se encontrar uma infinidade de substâncias químicas tóxicas. A existência destas substâncias contaminantes é consequente da atividade ou condições ambientais. Estes autores apontam como causas de atmosferas tóxicas em espaços confinados: oxidação, vazamentos, fermentação ou decomposição, de matéria orgânica erros operacionais. Salientam também, que a introdução de gases inertes, como forma de proteção contra explosão de vapores ou gases inflamáveis em produzem atmosferas tóxicas em espaços confinados. Dois parâmetros importantes em relação às substâncias químicas são citados por Campos (2011): Imediatamente Perigosa à Vida ou a

Saúde – IPVS e Limite de Tolerância – LT. Figura 4, podem-se ver algumas das substâncias mais comuns de serem encontradas em locais confinados.

Figura 4 – Parâmetros de tolerância a substâncias tóxicas

<b>Parâmetros importantes para substâncias químicas</b>				
<b>Substância</b>	<b>Limite de Tolerância (LT) - Brasil</b>	<b>TLV (TWA/C) ACGIH</b>	<b>Limite de odor</b>	<b>Concentração IPVS</b>
Amônia	20 ppm	TWA – 25 ppm	5,75 ppm	300 ppm
Cloro	0,8 ppm	TWA – 0,5 ppm	0,005 ppm	10 ppm
Dióxido de carbono	3,900 ppm	5.000 ppm	74.000 ppm	40.000 ppm
Dióxido de enxofre	4 ppm	2 ppm	0,708 ppm	100 ppm
Dióxido de nitrogênio	4 ppm	3 ppm	0,186 ppm	20 ppm
Monóxido de carbono	39 ppm	25 ppm	100.000 ppm	1.200 ppm
Gás sulfídrico	8 ppm	1 ppm	0,0005 ppm	300 ppm

Fonte: Filho, 2012.

De acordo com Campos (2011), há alguns fatores que influenciam na toxicidade das substâncias químicas, eles estão relacionados às próprias substâncias (fórmula química, características, ponto de ebulição, taxa de vaporização, etc.), à exposição (dose, concentração, rota de entrada no organismo, ventilação, tempo de exposição, uso de EPI); pessoais (suscetibilidade individual, hereditariedade, imunológica, alimentação, hormônios, idade, sexo, asseio, estado de saúde, doenças anteriores, etc.); ambientais (meio ambiente, substâncias químicas adicionais presentes, temperatura, pressão atmosférica, umidade). Os sintomas e efeitos da exposição ocupacional a algumas substâncias químicas comuns em Espaços Confinados serão apresentadas abaixo, como por exemplo, os efeitos provocados pela exposição ao gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), exposto na Figura 5.

Figura 5 – Efeitos provocados à saúde pela exposição ao gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S)

Sinais e sintomas da exposição	Conc. H <sub>2</sub> S (ppm)	Temp. de exposição
Limite de odor	0,1	-
LT (ACGIH)	10	8 h
	15	15 min.
	25	-
Odor tolerável, mas forte e desagradável	100	2 a 5 min.
Irritação dos olhos, tosse e perda de odor	200 a 300	1 h
Acentuada irritação dos olhos e trato respiratório	500 a 700	30 min. a 60 min.
Perda da consciência e morte	700 a 1.000	-
Rápida inconsciência, dificuldade respiratória e morte	770 a 910	-
Inconsciência quase imediata. A respiração para, morte em poucos minutos mesmo que a vítima seja removida para o ar fresco.	1.000 a 2.000	-

Fonte: Brevigliero, Possebon e Spinelli (2010).

Outro contaminante é o monóxido de carbono (CO) que apresenta uma característica peculiar pois é considerado um asfixiante químico, possui grande afinidade pela hemoglobina do sangue, cerca de 200 a 250 vezes mais que o oxigênio, dessa forma, a oxigenação dos tecidos é impedida, isto pode levar à morte por asfixia química (CETESB, 2010; BRASIL, 2013).

Figura 6 - Efeitos provocados à saúde pela exposição ao monóxido de carbono (CO)

CO (ppm) no ar	Tempo de acumulação (minutos)	Concentração de carboxi-hemoglobina (%)	Sintomas
50	150	7	Dor de cabeça, leve
100	120	12	Dor de cabeça moderada, tontura
250	120	25	Dor de cabeça severa, tontura
500	90	45	Náuseas, vômitos, colapso
1000	60	60	Coma
10.000	5	95	Morte

Fonte: American Petroleum Institute.

Os contaminantes elencados acima são também inflamáveis, contudo, essa característica se torna irrelevante, pois antes mesmo de atingirem o limite inferior de explosividade o risco tóxico é tão elevado, que qualquer pessoa exposta a essa concentração seria fatal (LEMOS, 2017).

### 3.4. REQUISITOS NORMATIVOS QUANTO A VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

#### 3.4.1. NR33 e GUIA TÉCNICO NR33

A NR33, de observância obrigatória em todos os estabelecimentos que possuem espaços confinados, tem o objetivo de garantir a entrada, o trabalho e saída segura desses ambientes, através da implantação de medidas de segurança que devem ser estabelecidas a partir dos riscos existentes em cada equipamento e também dos riscos gerados no desenvolver da atividade (BRASIL, 2013).

O Guia Técnico NR33 traz um anexo específico sobre ventilação: Anexo IV - Ventilação para trabalhos em espaços confinados -. Este anexo determina que a ventilação mecânica é a medida mais eficiente para controlar atmosferas perigosas em virtude da presença de gases, vapores tóxicos e inflamáveis e deficiência de oxigênio. Além de renovar o ar, a ventilação auxilia no controle do calor e da umidade no interior dos espaços confinados (BRASIL, 2013).

Por outro lado, também informa que a ventilação natural não apresenta resultados satisfatórios, pois possui uma intensa variabilidade da velocidade e vazão do ar; dificuldade de controle e direcionamento do ar; frequência irregular do efeito dos ventos; deficiente circulação de ar pelo reduzido número e tamanho das aberturas da maioria dos espaços confinados e inadequada diferença de altura entre as entradas e saídas do ar do espaço confinado. (BRASIL, 2013).

De forma complementar, é determinada a quantidade ideal de renovações/hora que um ambiente deve possuir. O quadro a disposto na Figura 7.

Figura 7 – Critérios de ventilação em Espaços Confinados

Trocas de ar recomendadas por hora	Redução do contaminante	Condições
10	10 - 100x	Mistura bem realizada e Liberação de contaminante desprezível
20-30	10 - 100x	Mistura pobre ou Liberação de contaminantes significante
30- 60	10 - 100x	Mistura Pobre e Liberação de contaminante significante
60-100 (somente o emprego de ventilação não é adequado)		Movimento do ar desprezível e Alta liberação de contaminante

Fonte: Adaptado de McManus, Safety and Health in Confined Spaces, 1999.

A renovação/hora é determinada pela Equação 1:

$$Q = n \times V \quad (1)$$

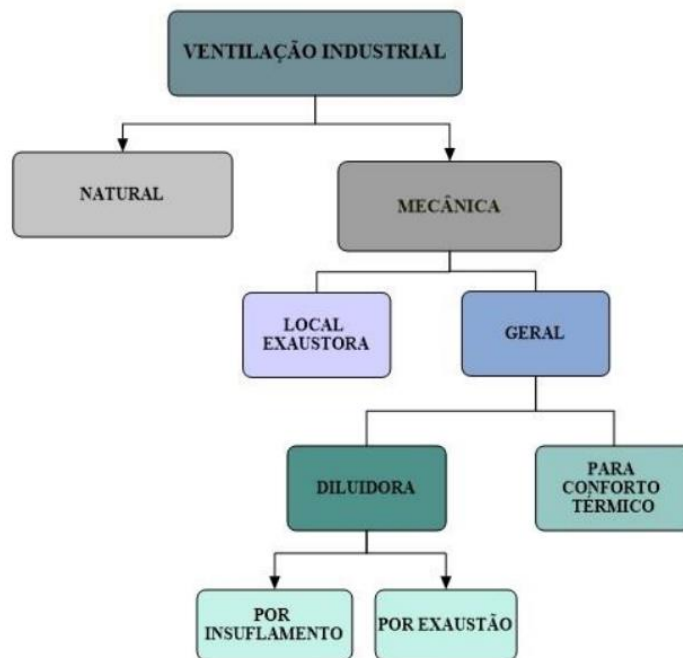
Onde: Q é a vazão (m<sup>3</sup>/h); n é o número de renovações por hora (ren/h); V é o volume (m<sup>3</sup>).

Determinar a quantidade de renovações/hora em um espaço confinado pode parecer simples, entretanto, os equipamentos podem possuir geometrias complexas e com isso diversos fatores, como: recheios, pratos, tubulações internas e desníveis, recursos computacionais, como a simulação fluidodinâmica, podem ser utilizados para determinação precisa e confiável dos parâmetros de controle.

### 3.5. VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

Um sistema de ventilação industrial opera de modo a retirar ou fornecer ar para um recinto fechado. Esse processo pode ser realizado por meios naturais ou mecânico, com a finalidade de limpar, controlar as condições do ar e estabelecer uma atmosfera segura dentro dos parâmetros normativos (MESQUITA, 1988). A ventilação industrial se apresenta em várias formas de aplicação em um ambiente, sendo ilustrado através da Figura 8.

Figura 8 – Infográfico ventilação industrial



Fonte: pcc261.pcc.usp.br, acesso em 22/09/2020.

### 3.5.1. Ventilação Natural

Na concepção de Oliveira (2013), a ventilação natural é o movimento de ar num ambiente provocado por dois agentes físicos separados ou simultaneamente, são eles: pressão dinâmica e temperatura. Este movimento pode ser controlado por meio de aberturas no teto, nas laterais e no piso. O fluxo de ar que entra ou sai de um edifício por ventilação natural depende da movimentação de ar devido à ação do vento; devido à diferença de temperaturas e pela ação combinada do vento e da diferença de temperatura.

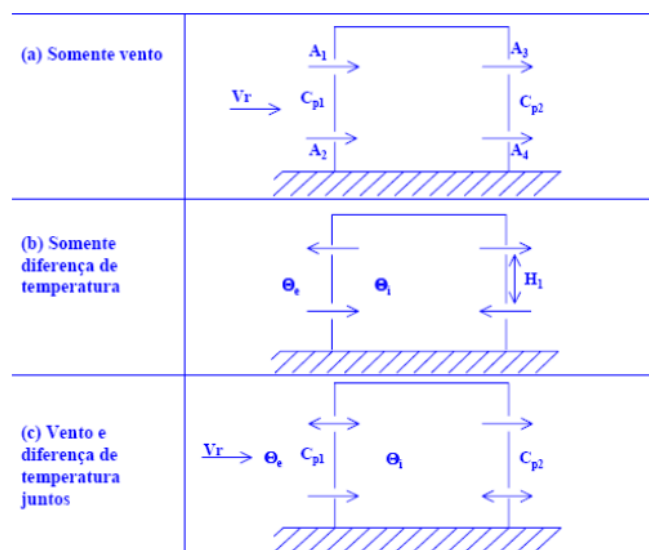
Na concepção de Oliveira (2013), a ventilação natural é o movimento de ar num ambiente provocado por dois agentes físicos separados ou simultaneamente, são eles: pressão dinâmica e temperatura. Este movimento pode ser controlado por meio de aberturas no teto, nas laterais e no piso. Outro fenômeno que existe e que pode ser facilmente confundido com ventilação natural é a infiltração de ar, que é um movimento de ar provocado pelos mesmos agentes físicos, mas não pode ser controlado.

Borré (2013) defende que a ventilação natural é o método mais antigo e comum de ventilação que apresenta baixo custo e nenhum consumo de energia, por outro lado, enfrenta diversas limitações devido a irregularidades das forças naturais.

O fluxo de ar que entra ou sai de um edifício por ventilação natural depende dos seguintes fatores e podem ser vistos na Figura 9:

- Movimento de ar devido à ação do vento; Movimento de ar devido à diferença de temperaturas e Movimento de ar pela ação combinada do vento e da diferença de temperaturas.

Figura 9 – Fluxo de ar que entra ou sai de um edifício por ventilação natural



Fonte: pcc261.pcc.usp.br, acesso em 22/09/2020.

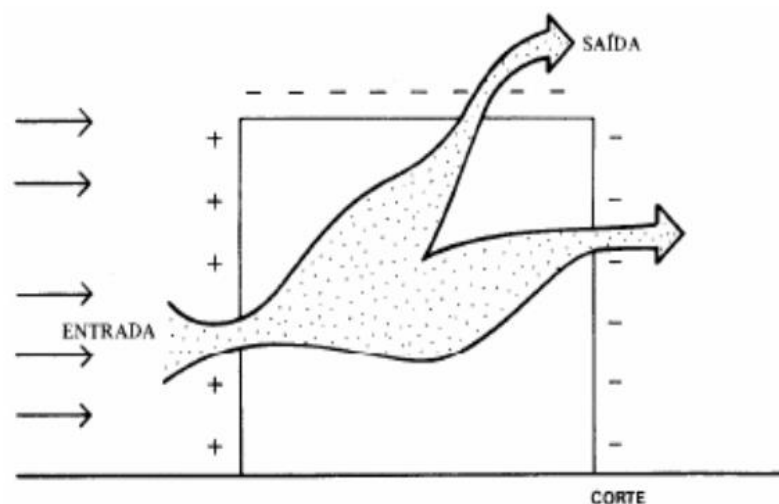
Macintyre (1990) estimou o cálculo vazão de entrada de ar por uma abertura de um recinto através da ventilação natural, determinada pela equação 2 e sendo necessário conhecer a velocidade média sazonal dos ventos locais e adotar 50% de seu valor como base para cálculo, com isso, pode-se determinar a vazão  $Q_v$  de ar que entra em um recinto através de aberturas de área total  $A$  quando a velocidade do vento for igual a  $v$ .

$$Q_v = \varphi \cdot A \cdot v \quad (2)$$

Onde:  $Q_v$  é a vazão (cfm);  $A$  é a área total de abertura (pé<sup>2</sup>);  $v$  é a velocidade do vento (pés/min) e  $\varphi$  é um adimensional considerado entre 0,5 e 0,6 se os ventos forem perpendiculares às aberturas e 0,25 e 0,35 se os ventos forem diagonais às aberturas

A Figura 10 representa uma movimentação simples do ar, onde pode ser identificado uma região de entrada e duas regiões de saída, considerado a direção o vento normal à entrada.

Figura 10 – Movimentação do ar por ventilação natural



Fonte: Macintyre, 1990.

Considerando apenas a diferença de temperatura como fator principal da movimentação do ar, o ar quente (menor densidade) tende a escapar por aberturas no topo do recinto. Esse escoamento é conhecido como “Efeito Chaminé” e Macintyre (1990) também determinou uma forma de estimar a vazão de ar, dada pela equação 3.

$$Q_t = 9,4 \cdot A \cdot \sqrt{H_1 \cdot (\theta_i - \theta_e)} \quad (3)$$

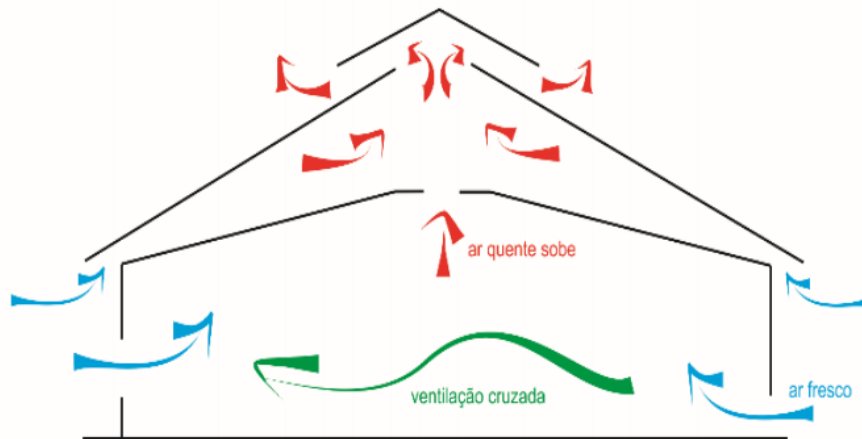
Onde:  $Q_t$  é a vazão (cfm);  $A$  é a área total de abertura (pé<sup>2</sup>);  $H_1$  é a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída (pé); 9,4 é a constante de proporcionalidade, incluindo o valor correspondente a 65% para levar em conta a efetividade das aberturas. Deve-se reduzir este



valor para 50% se as condições de escoamento entre a entrada e a saída não forem favoráveis;  $\theta_i$  é a temperatura de entrada (°C) e  $\theta_e$  é a temperatura de saída (°C).

A Figura 11 representa uma movimentação do ar pelo “Efeito Chaminé”, onde é possível identificar a região de entrada do ar natural (fresco), a zona de ventilação cruzada e o referido efeito.

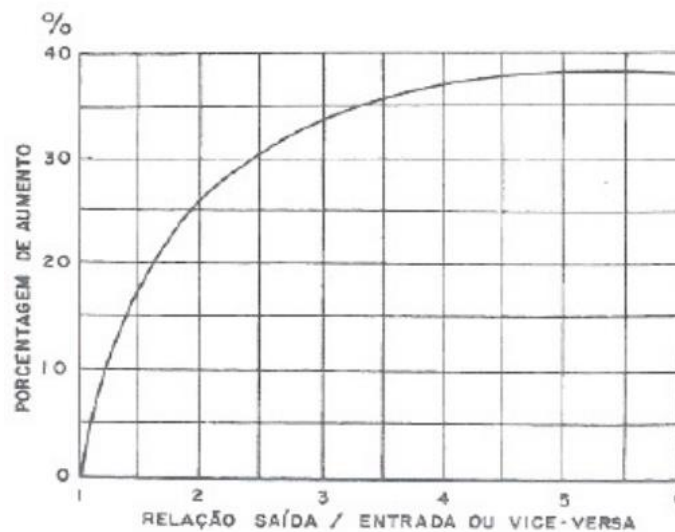
Figura 11 – “Efeito chaminé”



Fonte: arkideias.com, acesso em 22/09/2020.

As equações 2 e 3 são aplicáveis considerando as áreas de entrada e saída iguais, desta forma, a movimentação do ar ocorre com uma maior eficiência, por outro lado, se houve uma diferença entre as áreas de entrada e saída de ar, é necessário aplicar um fator de correção baseada no Figura 12. Faz-se o cálculo considerando a menor das áreas de passagem do ar (eixo x) e acrescenta-se um aumento de vazão (eixo y).

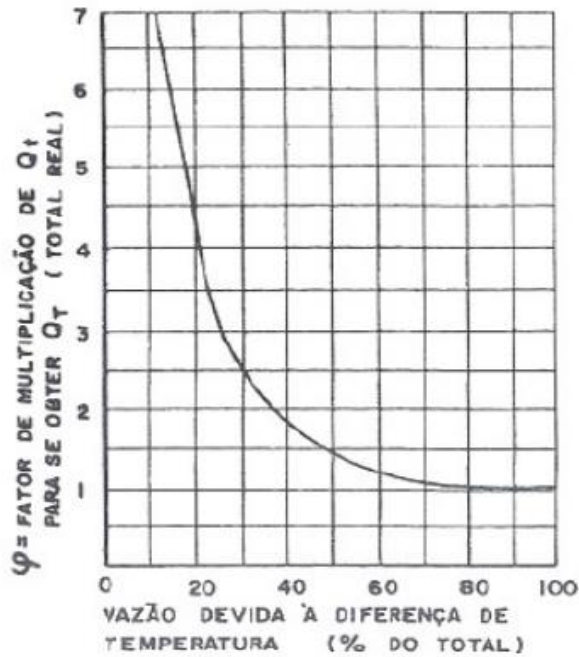
Figura 12 – Fator de correção devido a diferença entre área de entrada e saída de ar



Fonte: Macintyre, 1990.

No caso da movimentação de ar combinada (ação do vento + “Efeito Chaminé”) deve-se somar as duas vazões que resultarão em  $Q_T$ . Posteriormente, calcula-se a relação entre  $Q_i$  e  $Q_T$  e verifica-se o fator de multiplicação para obter a vazão total real. A Figura 13 representa o gráfico a ser utilizado.

Figura 13 – Fator de multiplicação para obter  $Q_T$



Fonte: Macintyre, 1990.

Os conceitos abordados por Macintyre (1990) também podem ser vistos em outras literaturas, como a ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - (2001) e Mesquita, Guimarães e Nefussin (1988).

Quando não for possível adotar o sistema de ventilação natural, seja pelas características das atividades, presença de poluentes ou geometria do recinto, deve-se adotar a ventilação mecânica.

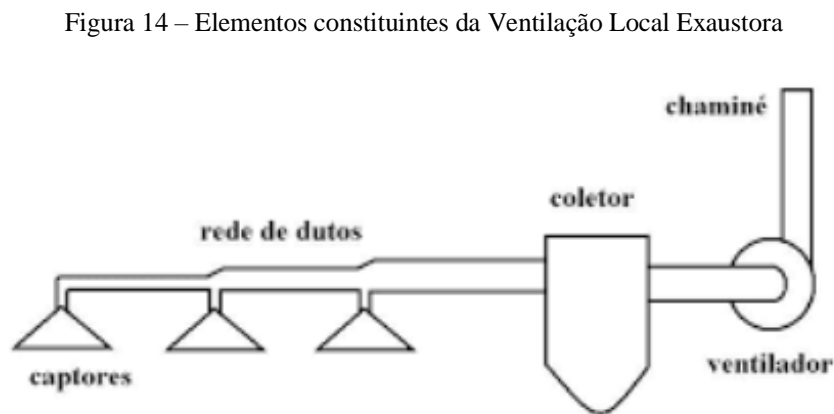
### 3.5.2. Ventilação Local Exaustora

A ventilação local exaustora é tipo de ventilação mecânica que opera a partir da extração do contaminante no próprio local em que ele é produzido, antes mesmo de se espalhar no ambiente, por meio de sucção de uma corrente de ar (MESQUITA, 1988). Esse modo de ventilação se caracteriza por transportar pelo ar detritos como poeira, fumos e vapores, que atingem em peso uma parcela mínima da mistura (<0,15%) (COSTA, 2005).

Uma instalação de ventilação local exaustora é constituída normalmente por quatro elementos, destaca Geleski (2015).

- Captor, que envolve o elemento poluidor extraindo-o;
- Separador ou coletor, que separa os contaminantes do ar;
- Elemento mecânico, que garante a movimentação desejada do ar;
- Canalização necessária há circulação do ar ao longo de todo o sistema.

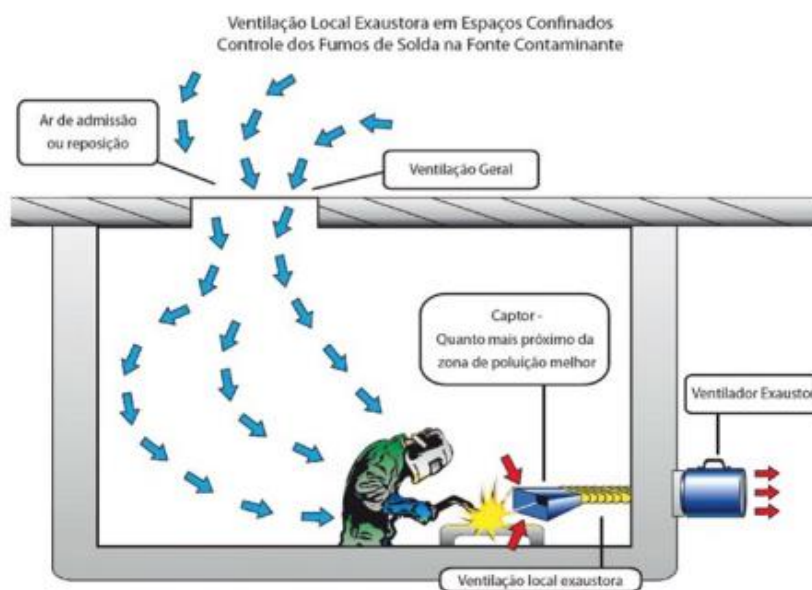
A Figura 14 retrata os elementos constituintes de uma VLE, no qual é possível identificar, de forma clara, cada um deles.



Fonte: UFPR, 2015.

Para que este tipo de ventilação fique ainda mais ilustrativo, o Guia Técnico NR33 demonstra a VLE e renovação do ar no interior do recinto em decorrência de uma pressão negativa provocada pela exaustão do ar, conforme Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de Ventilação Local Exaustora



Fonte: BRASIL, 2013.

### 3.5.3. Ventilação Geral para Conforto Térmico

O conforto térmico em atividades laborais é um fator que possui forte influência no comportamento humano. Garcia (1995) defende que o conforto térmico para o ser humano é delimitado pelas temperaturas entre 20 e 24°C com umidade relativa de 40 a 60% e velocidade do ar a 0,7 m/s. Ambiente com temperatura acima de 30 °C aumenta o risco de danos à saúde, o grau de concentração diminui e a frequência de erros e acidentes tende a aumentar.

Uma outra vertente que aborda conforto térmico é embasada pela Lei 6.514, 1977 , pelo Anexo III da NR15 – Insalubridade e a Norma de Higiene Ocupacional NHO 06 (2ª edição - 2017) da FUNDACENTRO. Essas entidades relacionam os limites de exposição ocupacional, índice de bulbo úmido termômetro de globo ( $\overline{IBGTU}_{MAX}$ ) e taxa metabólica média em atividades ( $\overline{M}$ ).

A Figura 16 traz uma relação entre a atividade desenvolvida pelo colaborador e a taxa metabólica de forma a facilitar uma estimativa quantitativa a fim de obter a temperatura de bulbo úmido termômetro de globo específica para a atividade.

Figura 16 – Relação entre atividade e taxa metabólica (W) parte 1

Atividade	Taxa metabólica [W]
<b>Sentado</b>	
Em repouso	100
Trabalho leve com as mãos	126
Trabalho moderado com as mãos	153
Trabalho pesado com as mãos	171
Trabalho leve com um braço	162
Trabalho moderado com um braço	198
Trabalho pesado com um braço	234
Trabalho leve com dois braços	216
Trabalho moderado com dois braços	252
Trabalho pesado com dois braços	288
Trabalho leve com braços e pernas	324
Trabalho moderado com braços e pernas	441
Trabalho pesado com braços e pernas	603
<b>Em pé, agachado ou ajoelhado</b>	
Em repouso	126
Trabalho leve com as mãos	153
Trabalho moderado com as mãos	180
Trabalho pesado com as mãos	198
Trabalho leve com um braço	189
Trabalho moderado com um braço	225
Trabalho pesado com um braço	261
Trabalho leve com dois braços	243
Trabalho moderado com dois braços	279
Trabalho pesado com dois braços	315
Trabalho leve com o corpo	351
Trabalho moderado com o corpo	468
Trabalho pesado com o corpo	630
<b>Em pé, em movimento</b>	
<b>Andando no plano</b>	
1. Sem carga	
• 2 km/h	198
• 3 km/h	252
• 4 km/h	297
• 5 km/h	360
2. Com carga	
• 10 kg, 4 km/h	333
• 30 kg, 4 km/h	450
<b>Correndo no plano</b>	
• 9 km/h	787
• 12 km/h	873
• 15 km/h	990
<b>Subindo rampa</b>	
1. Sem carga	
• com 5° de inclinação, 4 km/h	324

Fonte: Brasil, 2019.

Figura 17 – Relação entre atividade e taxa metabólica (W) parte 2

• com 15° de inclinação, 3 km/h	378
• com 25° de inclinação, 3 km/h	540
2. Com carga de 20 kg	
• com 15° de inclinação, 4 km/h	486
• com 25° de inclinação, 4 km/h	738
Descendo rampa (5 km/h) sem carga	
• com 5° de inclinação	243
• com 15° de inclinação	252
• com 25° de inclinação	324
Subindo escada (80 degraus por minuto - altura do degrau de 0,17 m)	
• Sem carga	522
• Com carga (20 kg)	648
Descendo escada (80 degraus por minuto – altura do degrau de 0,17 m)	
• Sem carga	279
• Com carga (20 kg)	400
Trabalho moderado de braços (ex.: varrer, trabalho em almoxarifado)	320
Trabalho moderado de levantar ou empurrar	349
Trabalho de empurrar carrinhos de mão, no mesmo plano, com carga	391
Trabalho de carregar pesos ou com movimentos vigorosos com os braços (ex.: trabalho com foice)	495
Trabalho pesado de levantar, empurrar ou arrastar pesos (ex.: remoção com pá, abertura de valas)	524

Fonte: Brasil, 2019.

Já a Figura 18 mostra a relação entre a taxa metabólica e o índice de bulbo úmido termômetro de globo, que dessa forma, nos fornecem parâmetros para avaliar a referida temperatura a depende do tipo de atividade descrita nas Figuras, 16 e 17.

Figura 18 – Relação entre taxa metabólica (W) e índice de bulbo úmido termômetro de globo (°C)

$\bar{M}$ [W]	$\overline{IBGTU}_{MAX}$ [°C]	$\bar{M}$ [W]	$\overline{IBGTU}_{MAX}$ [°C]	$\bar{M}$ [W]	$\overline{IBGTU}_{MAX}$ [°C]
100	33,7	186	30,6	346	27,5
102	33,6	189	30,5	353	27,4
104	33,5	193	30,4	360	27,3
106	33,4	197	30,3	367	27,2
108	33,3	201	30,2	374	27,1
110	33,2	205	30,1	382	27
112	33,1	209	30	390	26,9
115	33	214	29,9	398	26,8
117	32,9	218	29,8	406	26,7
119	32,8	222	29,7	414	26,6
122	32,7	227	29,6	422	26,5
124	32,6	231	29,5	431	26,4
127	32,5	236	29,4	440	26,3
129	32,4	241	29,3	448	26,2
132	32,3	246	29,2	458	26,1
135	32,2	251	29,1	467	26
137	32,1	256	29	476	25,9
140	32	261	28,9	486	25,8
143	31,9	266	28,8	496	25,7
146	31,8	272	28,7	506	25,6
149	31,7	277	28,6	516	25,5
152	31,6	283	28,5	526	25,4
155	31,5	289	28,4	537	25,3
158	31,4	294	28,3	548	25,2
161	31,3	300	28,2	559	25,1
165	31,2	306	28,1	570	25
168	31,1	313	28	582	24,9
171	31	319	27,9	594	24,8
175	30,9	325	27,8	606	24,7
178	30,8	332	27,7		
182	30,7	339	27,6		

Fonte: BRASIL, 2019.

Com os dados supracitados é possível estabelecer a temperatura ideal de trabalho em espaço confinado (a depender da atividade) e com isso determinar a ventilação necessária para cumprir com os requisitos normativos e garantir um desempenho positivo do colaborador.

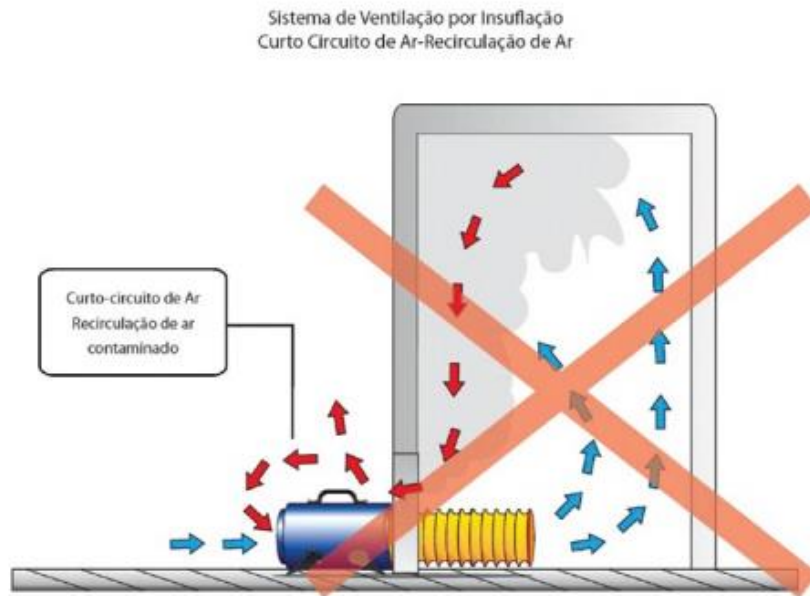
### 3.5.4. Ventilação Geral Diluidora por Insuflamento

A ventilação geral diluidora – VGD - por insuflamento objetiva minimizar a concentração dos contaminantes por meio da diluição do ar limpo (externo) com o ar viciado contido no ambiente de trabalho, como também manter o nível de oxigênio dentro de uma faixa segura no interno do equipamento. O sistema consiste em enviar ar exterior para o interior do ambiente ocasionando um diferencial de pressão (“pressão positiva”), o que força o ar a sair pelas aberturas existentes no ambiente, permitindo um bom controle da incidência de poluentes e um melhor controle da pureza do ar insuflado do que no caso da ventilação natural (BORRÉ, 2013).

De acordo com Guia Técnico da NR33, em um sistema de VGD por insuflamento pode ocorrer um curto-circuito do ar, a depender da geometria do equipamento. Na configuração do

sistema disposto na Figura 19, ocorre o curto-circuito do ar, pois, devido às limitações geométricas do recinto, o ar fica impedido de ser renovado.

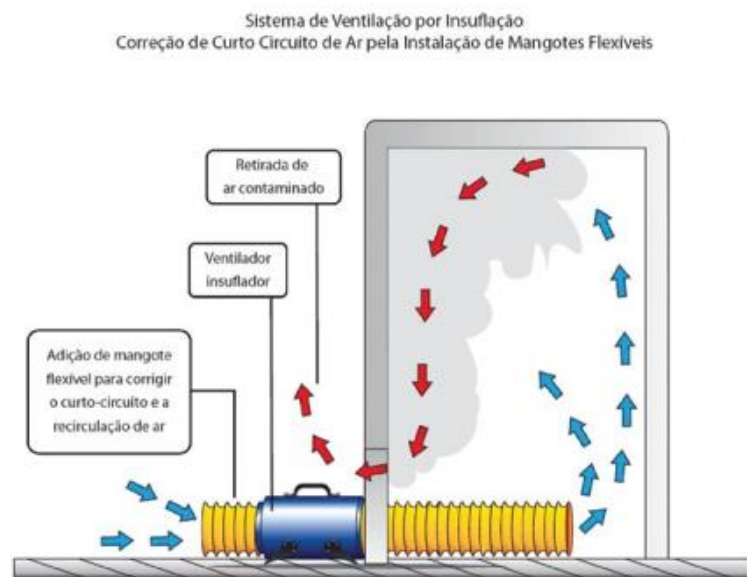
Figura 19– VGD por insuflação com curto-circuito



Fonte: BRASIL, 2013.

A correção proposta pelo referido Guia Técnico dar-se através da instalação de um mangote na descarga do insuflador, sendo assim, a renovação do ar ocorre no interior do recinto em decorrência de uma pressão positiva provocada pela insuflação do ar, conforme pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – VGD por insuflação com correção de curto-circuito



Fonte: BRASIL, 2013.

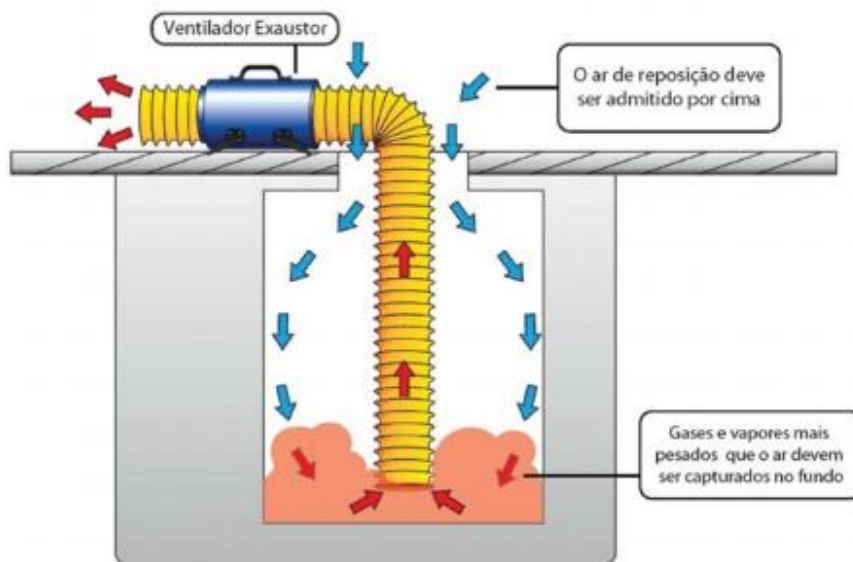


### 3.5.5. Ventilação Geral Diluidora por Exaustão

A ventilação geral diluidora por exaustão possui o mesmo objetivo da abordada no item anterior, entretanto, este sistema opera por meio da retirada do ar contaminado (interno) e consequente entrada de ar limpo (externo) ocasionando um diferencial de pressão (“pressão negativa”) (BRASIL, 2013).

Neste tipo de sistema, é interessante avaliar a densidade relativa do contaminante. A Figura 21 aborda exemplo de sistema que é recomendado pelo Guia Técnico NR33 para ventilação de gases mais pesados que o ar por exaustão.

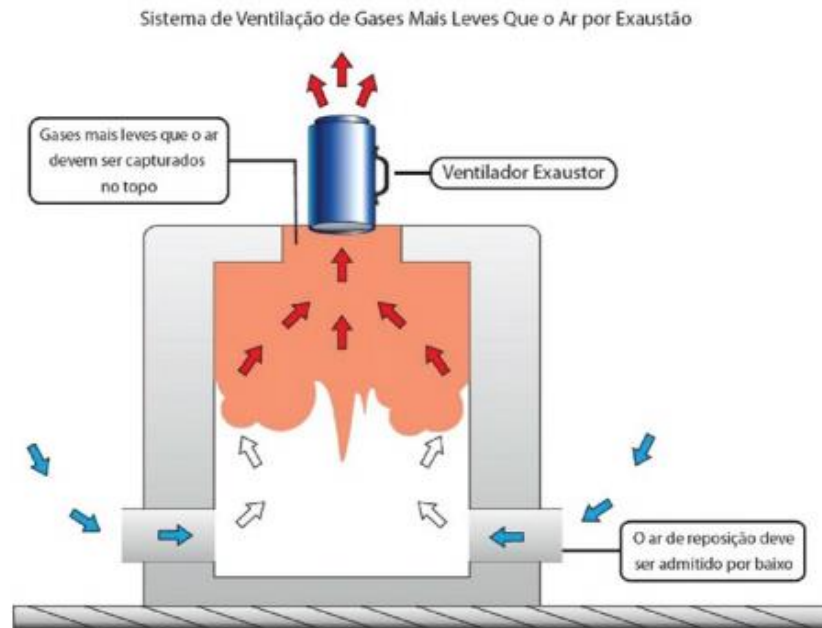
Figura 21 – VGD por exaustão de gases mais pesados que o ar  
Sistema de Ventilação de Gases Mais Pesados que o Ar por Exaustão



Fonte: BRASIL, 2013.

Já para ventilação de gases mais leves que o ar por exaustão, o referido Guia Técnico recomenda o sistema disposto na Figura 22, onde ocorre renovação do ar no interior do recinto em decorrência de uma pressão negativa provocada pela exaustão do ar, especificamente do ar contaminado, que fica localizado no topo do recinto.

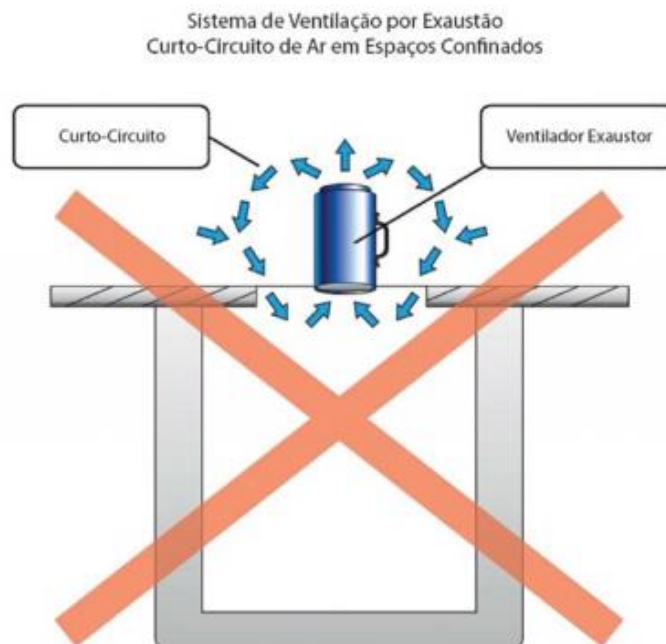
Figura 22 – VGD por exaustão de gases mais leves que o ar



Fonte: BRASIL, 2013.

Na ventilação geral diluidora por exaustão também pode ocorrer um curto-circuito de ar, como o a configuração do sistema disposto na Figura 23, pois, devido às limitações geométricas do recinto, o ar fica impedido de ser renovado.

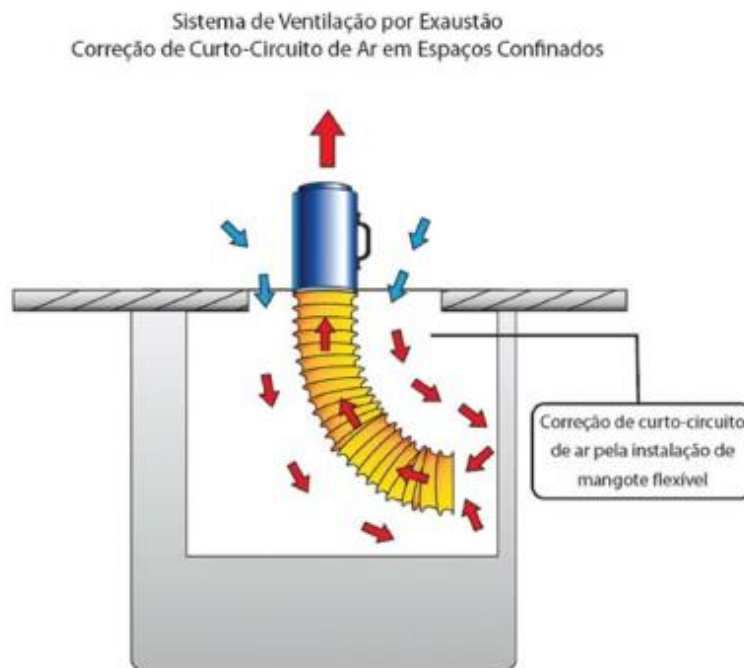
Figura 23 – VGD por exaustão com curto-circuito



Fonte: BRASIL, 2013.

A correção do curto-circuito dar-se através da instalação de um mangote e a renovação do ar ocorre do ar no interior do recinto em decorrência de uma pressão negativa provocada pela exaustão do ar, conforme pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 – VGD por exaustão com correção de curto-circuito



Fonte: BRASIL, 2013.

### 3.6. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

O interesse pelo estudo do movimento dos fluidos data-se de muitos anos atrás. Descrever o comportamento do escoamento de fluidos de forma matemática ainda era um desafio em torno da década de 1910, pois eram necessárias muitas simplificações para se chegar a uma solução (LIMA, 2005).

Em meados do século XX, o desenvolvimento tecnológico possibilitou a chegada dos computadores, que se tornaram uma alternativa valiosa para a solução de equações complexas, com isso, deu-se início a possibilidade de obter perfis de escoamento de fluido em um determinado volume de controle (FILHO, 2017).

Assim, o desenvolvimento de uma metodologia que visa analisar e prever sistemas de escoamento, veio à tona. A idealização da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) teve início de 1960 a vfg pelas necessidades da comunidade aeroespacial e aeronáutica, que implantaram esta técnica no desenho, pesquisa, desenvolvimento e fabricação de aeronaves e motores (LÓPEZ, 2017).

Desta forma, Filho (2017) defende que a fluidodinâmica computacional é definida como uma ferramenta numérica, que utiliza métodos numéricos para a resolução de equações físicas e de fenômenos de transporte (massa, movimento, energia e conservação de espécies) utilizando de linguagem de programação, sendo empregada nos mais variados problemas de engenharia, como na indústria automotiva, química, nuclear e mecânica (XIA; SUN, 2002).

### **3.6.1. Modelagem básica em Escoamentos**

A modelagem de fluidodinâmica consiste, basicamente, na resolução de equações gerais de transporte através de métodos numéricos, como o Método dos Volumes Finitos (MVF), visando obter campos de velocidades, temperatura, fluxo de massa, etc. de forma a avaliar a propriedade de interesse durante escoamento de fluidos (DUARTE, 2006).

Nestes tipos de escoamento, o CFD utiliza as equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, além disso, em um cenário em que o referido espaço confinado possua barreiras internas, o modelo de turbulência deve ser avaliado e utilizado para solução do modelo adotado.

#### **3.6.1.1. Equação da continuidade**

A equação de continuidade é uma equação de conservação de massa de um fluido escoando em um volume de controle. Para isso, deve-se respeitar a lei de conservação de massa que afirma que a massa não pode ser criada nem destruída (SABLANI; DATTA; RAHMAN e MUJUMDAR. 2007; MARTÍN, 2014). A equação (4) apresenta a forma diferencial do princípio de conservação da massa e pode ser aplicada a escoamentos tridimensionais, permanentes ou transientes, viscosos ou invíscidos, compressíveis ou incompressíveis.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Onde:  $\rho$  é a massa específica do fluido;  $t$  é a coordenada temporal;  $x$ ,  $y$  e  $z$  representam as coordenadas espaciais cartesianas de um sistema tridimensional;  $u$ ,  $v$  e  $w$  são, respectivamente, as componentes de velocidade nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

#### **3.6.1.2. Equação da quantidade de movimento**

No movimento de um fluido existem dois tipos de forças: de corpo, como a força peso, e de superfície, como as forças devidas à pressão, atrito viscoso e outras. A conservação de

movimento de um fluido em um volume de controle é descrita pela segunda lei de Newton, a qual afirma que a taxa de mudança da quantidade de movimento de um fluido é igual à soma das forças que atuam sobre o fluido (SABLANI, DATTA, RAHMAN e MUJUMDAR, 2007). As equações 5, 6 e 7 representam a forma diferencial da quantidade de movimento.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (7)$$

Onde:  $u, v$  e  $w$  são as velocidades em  $x, y$  e  $z$ , respectivamente;  $\vec{V}$  é a velocidade vetorial;  $\rho$  é a massa específica;  $\tau$  são as tensões viscosas em  $x, y$  e  $z$ ;  $P$  são as pressões em  $x, y$  e  $z$ ;  $f$  são forças gerais em  $x, y$  e  $z$ , como por exemplo, modelos de turbulência.

Por ser uma equação diferencial acoplada, a solução analítica é complexa, desse modo, existem métodos numéricos específicos que visam solucionar estes casos, como por exemplo o Método dos Volumes Finitos.

### 3.6.2. Modelos de turbulência

A turbulência ocorre quando o escoamento laminar fica instável, ou seja, as partículas se misturam de forma caótica. Existem diversos modelos de turbulência, dentre eles, os modelos baseados em duas equações, os quais são atualmente os mais usados no ramo da engenharia (MAGOTTO e OLIVEIRA, 2017). Alguns modelos matemáticos que representam a turbulência alguns deles são:

- **Modelo de turbulência k-w:** Sugere como segundo parâmetro a taxa de dissipação de energia por unidade de volume e tempo  $\omega$ , em adição a equação de transporte para a energia cinética turbulenta, determinada pela letra  $k$  (BARDINA; HUANG; COAKLEY, 1997). Segue algumas características importantes deste modelo.
  - Modelo de duas equações;
  - Bom tratamento de camadas limites, especialmente para gradientes adversos de pressão;
  - Excelente para escoamentos externos.
- **Modelo de turbulência k -  $\epsilon$  Realizable:** Existem outros modelos  $k - \epsilon$ , como o convencional e o RNG. O termo *Realizable* se deve ao modelo utilizado satisfazer certas restrições matemáticas para as tensões de cisalhamento de Reynolds, consistentes com a

física dos escoamentos turbulentos (QUADROS, 2018). Segue algumas características importantes deste modelo.

- Modelo de duas equações;
- Modelo de turbulência padrão para uso industrial (DUARTE, 2006);
- Mais robusto;

### **3.6.3. Método dos Volumes Finitos**

O MVF é amplamente utilizado na atualidade em escoamentos fluidodinâmicos. Credita-se a McDonald, em 1971, a primeira utilização do referido método aplicado a simulação de um escoamento bidimensional de gás em turbinas. O método consiste basicamente em discretizar o domínio do problema em volumes de controle e realizar um balanço de conservação da propriedade para cada volume elementar e assim obter uma equação correspondente aproximada (MALISKA, 2014).

Esse método é um dos existentes que utilizam como base a obtenção de resultados a partir do método de resíduos ponderados, em que, a minimização deste resíduo é equivalente aos princípios da conservação sobre cada volume de controle (DUARTE, 2006).

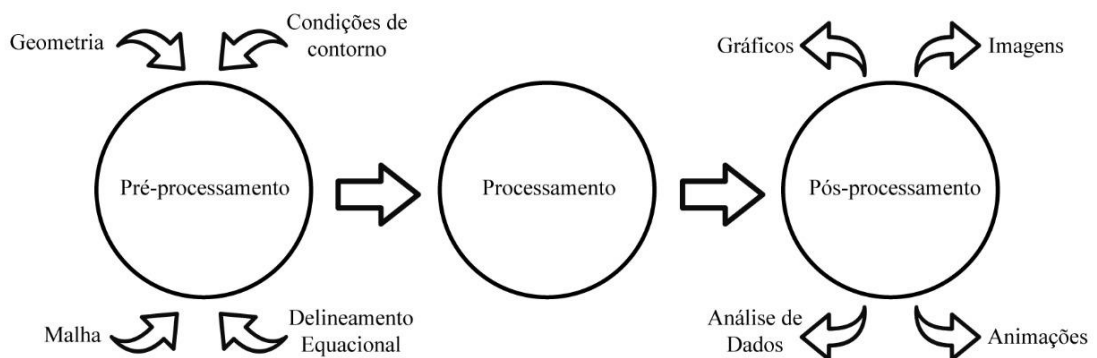
O mesmo autor também defende que o MVF quando converge, fornece resultados dotados de realismo físico, o que não quer dizer que os mesmos sejam exatos, pois a solução numérica se aproxima da solução exata dentro de uma exatidão estabelecida, pois os resultados das simulações fornecem o comportamento do modelo, o qual depende das simplificações e considerações feitas visando retratar os fenômenos mais relevantes no sistema real e tornar as equações menos complexas, bem como da precisão dos parâmetros envolvidos.

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia a ser adotada para o desenvolvimento deste trabalho consiste em:

1. Realizar coleta de informações técnicas;
2. Realizar uma revisão bibliográfica sobre ventilação industrial em espaços confinados, requisitos normativos nacionais válidos para indústria petroquímica de grande porte e simulação fluidodinâmica.
3. Realizar etapas de simulação CFD, conforme Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma de etapas de simulação CFD



Fonte: Adaptado de Sun (2007).

#### 4.1. Geometria

A escolha da geometria foi baseada em um estudo específico de uma indústria petroquímica. As informações básicas estão dispostas na Tabela 1.

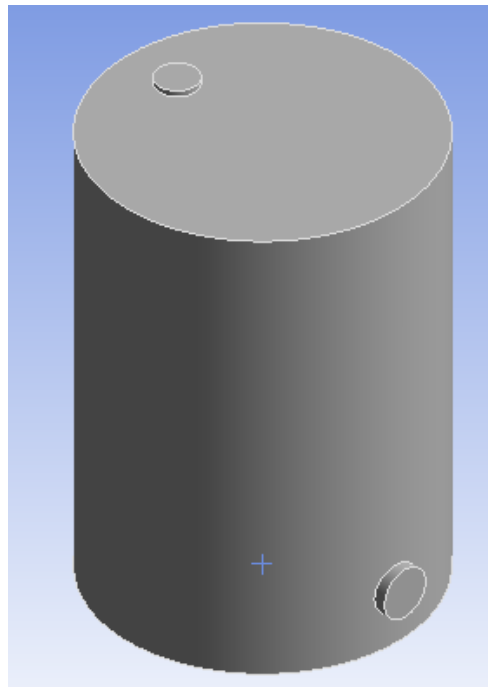
Tabela 1 – Informações básicas do equipamento

Característica	Resultado
Diâmetro interno do equipamento (m)	3,8
Altura do equipamento (m)	5,750
Quantidade de BVs	02
Diâmetro interno da BV lateral (m)	0,6096
Diâmetro interno da BV de topo (m)	0,508
Volume (m <sup>3</sup> )	65

Fonte: Autor, 2020.

O equipamento foi desenhado em modelo CAD utilizando o software Ansys SpaceClaim 2020 R2 Academic Student e pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Geometria em ambiente Ansys SpaceClaim 2020 R2 Academic Student



Fonte: Autor, 2020.

No mesmo software, foi verificado existência de possíveis interferências no desenho, como por exemplo: linhas sobrepostas, buracos, corrigir faces soltas, ou seja, qualquer



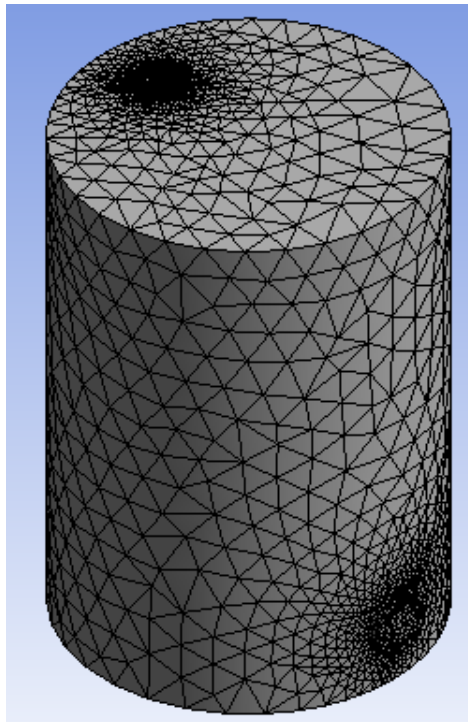
problema que possa interferir na simulação. Essas verificações possuem um impacto direto na próxima etapa da simulação: construção da malha.

## 4.2. Malha

Uma malha computacional é constituída por linhas e pontos, os pontos são considerados onde essas linhas se interceptam e servem de orientação para o cálculo de propriedades físicas baseado num modelo matemático. Uma malha computacional pode ser definida como uma representação do plano físico utilizado na simulação numérica (DEL FRARI, 2009).

A geração da malha representa uma das principais etapas para se obter resultados precisos e uma convergência mais rápida. A malha gerada é composta por 7.405 nós e 37.724 elementos de células na forma tetraédrica. A Figura 27 representa a malha utilizada na simulação. O software usado para aplicação da malha foi o Ansys Meshing 2020 R2 Academic Student.

Figura 27 – Malha computacional em ambiente Ansys Meshing 2020 R2 Academic Student.



Fonte: Autor, 2020.

A seguir apresentam-se parâmetros de avaliação de qualidade da malha.

- Qualidade da Malha: fornece uma medida de qualidade da malha que varia entre 0 e 1. Esta medida é baseada na proporção do volume para a soma do quadrado dos comprimentos de

borda para elementos quadrangulares/triangulares 2D ou a raiz quadrada do cubo da soma do quadrado dos comprimentos de borda para elementos 3D. Um valor de 1 indica um cubo ou um quadrado perfeito, enquanto um valor de 0 indica que o elemento tem um volume zero ou negativo (FLUENT Inc, 2009).

- Relação de Aspecto: é a medida do alongamento de uma célula, que é calculado a partir da relação entre o valor máximo e o valor mínimo das distâncias normais entre o centroide da célula e os centroides da face (calculados como o produto do ponto do vetor da distância e a face normal) e as distâncias entre o centroide da célula e os nós (FLUENT Inc, 2009).
- Relação Jacobiana: compara a medida de um elemento com um elemento ideal. Se o elemento mapeado não tiver uma relação jacobiana próxima do elemento ideal, pode tornar os cálculos pouco confiáveis. A forma ideal de um elemento depende do tipo do mesmo (FLUENT Inc, 2009).
- Ângulo de Canto Máximo: é o ângulo máximo que as células podem possuir, de acordo com alguns estudos ângulo maiores que  $180^\circ$  reduzem o desempenho da malha (FLUENT Inc, 2009).
- Assimetria: é uma das principais medidas de qualidade para uma malha, pois determina o quão perto do ideal (isto é, equilátero ou equiangular), uma face ou célula está, varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 0 maior é a simetria (FLUENT Inc, 2009).
- Qualidade Ortogonal: é calculada usando o vetor normal para cada face. O vetor sai do centro da célula para o centro de cada uma das células adjacentes. A qualidade ortogonal varia de 0 a 1, em que valores próximos de 0 indicam pouca qualidade e valores próximos de 1 indicam ótima qualidade (FLUENT Inc, 2009).

A qualidade da malha gerada está disposta na Tabela 2. É possível inferir que a malha gerada apresenta uma boa qualidade, pois todos os valores obtidos para cada parâmetro estão dentro dos intervalos especificados.

Tabela 2 – Parâmetros de qualidade da malha

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Qualidade do elemento	0,32215	1	0,83089	$9,8558 \times 10^{-2}$
Relação de aspecto	1,1582	6,7579	1,8658	0,47638
Relação jacobiana	1	1	1	0
Ângulo de Canto Máximo	70,57°	147,73°	96,306°	12,207°
Assimetria	$6,072 \times 10^{-6}$	0,84498	0,23736	0,12483
Qualidade ortogonal	0,15502	0,99167	0,76125	0,123

Fonte: Autor, 2020.

Uma vez determinada a qualidade da malha, sendo essa uma etapa essencial para garantir resultados confiáveis, é necessário especificar as condições de contorno que regem a problemática.

### 4.3. Condições de contorno

As condições de contorno foram definidas de acordo com o objetivo da simulação. Primeiramente para a simulação da exaustão de ar no interno do equipamento (sem a presença de contaminantes), a vazão de ar exaurida foi dimensionada a partir o Anexo IV do Guia Técnico da NR33, o qual determina a quantidade de renovações/hora de acordo a atmosfera do espaço confinado.

Por critérios de acessibilidade e seguindo as recomendações do guia técnico NR33 a localização do exaustor considerada na BV superior, sendo assim, a BV lateral está aberta para atmosfera.

As vazões de exaustão simuladas foram estabelecidas de acordo com a Figura 7 e equação 1 de modo a resultar na condição de contorno adotada, exposta na Tabela 3.

Tabela 3 – Condição de contorno

Trocas de ar recomendadas por hora (ren/h)	Vazão de exaustão requerida ( $m^3/h$ )
10	650
25	1625
45	2925

Fonte: Autor, 2020.

A BV que servirá de acesso ao espaço confinado estará aberta, desse modo, a pressão considerada será  $P=0$  Pa, sendo assim, o software FLUENT® 2020 R2 Academic Student entende que há uma abertura para a atmosfera.

Em um segundo momento foi acrescentado um contaminante, o monóxido de carbono (CO) a uma concentração de 10.000 ppm no interno do equipamento e repetida simulação para vazão de exaustão de 1625 m<sup>3</sup>/h.

#### **4.4. Processamento**

Nesta etapa é realizada a resolução iterativa do modelo aplicando as condições de contorno especificadas e equações físicas escolhidas anteriormente, no volume de controle (geometria). O resolvidor numérico selecionado (FLUENT® 2020 R2 Academic Student) organiza as especificações feitas na etapa anterior em matrizes numéricas e as resolve utilizando o método iterativo, sendo utilizado para resolver um conjunto completo de equações discretizadas para que elas possam ser aplicadas a uma única variável dependente. A resolução termina após a convergência das equações (SUN, 2007; XIA; SUN, 2002).

#### **4.5. Pós-processamento**

Na terceira etapa é possível visualizar e analisar os perfis de escoamento obtidos a partir da simulação, através de imagens, gráficos e animações que mostram os perfis de temperatura, velocidade, pressão no escoamento, e todas estas informações contribuem na interpretação dos resultados (SUN, 2007; XIA; SUN, 2002). Como já mencionado, o software usado para realizar as etapas de processamento e pós-processamento foi o FLUENT® 2020 R2 Academic Student.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Após a avaliação dos parâmetros de geração da malha e definição das condições de contorno, tem-se a necessidade de realizar a análise fluidodinâmica do escoamento do sistema. Essa seção foi dedicada a determinação da localização de instalação da ventilação, análise de velocidade de escoamento do ar, zonas de recirculação e análise da remoção de monóxido de carbono através de ventilação.

### **5.1. Local de instalação do exaustor**

A NR33 e o Guia Técnico NR33 determinam que não se deve instalar o ventilador na BV de acesso, com a finalidade de não obstruir a entrada e saída do espaço confinado (BRASIL 2006; BRASIL, 2013).

Analisando a localização dos dois acessos disponíveis para este espaço confinado, a BV lateral apresenta riscos com a severidade inferior quando comparado com a BV de topo, como exemplo, o risco de queda, além disso, o acesso pela BV lateral dispensa a instalação de equipamento acessórios, como a linha de vida, desse modo, esta BV será o acesso ao espaço confinado e a BV de topo será o local para a instalação do exaustor.

### **5.2. Avaliação de ventilação natural**

A avaliação da ventilação natural foi realizada com a premissa de uma condição do ambiente de mistura pobre e liberação do contaminante desprezível, determinado pelo guia técnico NR33. Esse cenário é característico de ambientes/atividades que isentos de contaminantes, como por exemplo, atividades de avaliação e inspeção técnica do interno do equipamento, levantamento fotográfico, entre outros.

A ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - (2001), Macintyre (1990) e Mesquita, Guimarães e Nefussin (1988) se baseiam no mesmo método para o cálculo da vazão de ar devido à pressão do vento através da equação 2. Como as áreas de entrada e saída possuem dimensão distintas, Macintyre (1990) determina que é necessário calcular o percentual de aumento da vazão devido a essa diferença através da Figura 12. O resultado da relação entre as áreas de abertura e saída é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Relação entre áreas e percentagem de aumento

Área de entrada (m <sup>2</sup> )	Área de saída (m <sup>2</sup> )	Relação entre áreas	Aumento (%)
0,2026	0,2918	1,44	15

Fonte: Autor, 2020.

Uma vez determinada a percentagem de aumento, pode-se coletar os dados de velocidade média do vento. A entidade de referência foi o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET –, onde foram coletados os dados de 2018 à 2020 no período compreendido entre 08h às 17h e estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Velocidade média do vento em Maceió-AL

Ano	Velocidade do ar (m/s)
2018	3,23
2019	3,02
2020 (até 11 de abril)	2,93
Média	3,06

Fonte: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

Uma vez determinada velocidade média do vento em Maceió-AL, pode-se calcular a vazão de ar devido a pressão do vento através da equação 2. O valor real da velocidade do vento considerado foi de 50% da média, resultado em 1,53 m/s, conforme defende Macintyre (1990). O resultado é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo da vazão do ar

Área total de abertura (pé <sup>2</sup> )	Velocidade do vento (pés/min)	Fator adimensional	Vazão de ar (m <sup>3</sup> /h) com acréscimo
3,14	295,27	0,5	905,77

Fonte: Autor, 2020.

A taxa de renovação do ar em um espaço confinado é determinada pela equação 1 baseada no Guia Técnico da NR33. Com isso, tem-se o resultado exposto na Tabela 7.

Tabela 7 – Cálculo da taxa de renovação por hora

Vazão de ar (m <sup>3</sup> /h)	Volume (m <sup>3</sup> )	Renovações/hora
905,77	65	13

Fonte: Autor, 2020.

A quantidade de renovações/hora dimensionada atende ao cenário do “Mistura bem realizada e liberação de contaminante desprezível”, ou seja, um ambiente que necessita de no mínimo 10 ren/h. Nesse contexto, pode-se recomendar a utilização de ventilação natural para atividades que não gerem contaminantes, como inspeção técnica e levantamento fotográfico, considerando também que não há contaminantes pré-existentes neste ambiente.

Apesar da vazão de exaustão atender a este cenário, a utilização de ventilação natural requer cuidados. O Guia Técnico NR33 afirma este tipo de ventilação apresenta algumas características, como:

- Intensa variabilidade da velocidade e vazão do ar;
- Dificuldade de controle do direcionamento do ar;
- Frequência irregular do efeito dos ventos;
- Deficiente circulação de ar pelo reduzido número e tamanho das aberturas da maioria dos espaços confinados;
- Inadequada diferença de altura entre as entradas e saídas do ar do espaço confinado.

Borré (2013) e Spnielli (2020) corroboram com a determinação do referido Guia Técnico ao informar que a ventilação natural depende de vários fatores que os trabalhadores não podem controlar, como movimentação do ar do meio externo.

Entretanto, para fins de aplicação industrial, nota-se que a ventilação natural ainda é utilizada nas atividades especificadas acima. De forma garantir a segurança dos colaboradores, vale recomendar o monitoramento contínuo da velocidade do ar, através do anemômetro – instrumento de medição de velocidade do ar - na BV de acesso ao equipamento podendo ficar sob responsabilidade do vigia de espaço confinado, pois as barreiras físicas, como: equipamentos, estruturas em alvenaria, entre outros, podem comprometer a passagem da ventilação natural.

### **5.3. Simulação com base na condição do ambiente**

Nesta seção será avaliada a ventilação exaustora com base nas condições de ambiente definidas pelo Guia Técnico NR33, avaliando os parâmetros de velocidade do ar, movimentação do fluido, zonas de recirculação ou baixa movimentação. Além disso, estudou-se a remoção do contaminante monóxido de carbono, um asfíxiante químico, através da referida ventilação.

### 5.3.1. Análise da velocidade do escoamento

O referido guia técnico determina os parâmetros de ventilação a serem adotados com base na condição do ambiente. Para a condição de mistura bem realizada e liberação do contaminante desprezível, a exaustão forçada deve atender a quantidade mínima de 10 ren/h. Para a condição de mistura pobre ou liberação de contaminante desprezível é recomendada de 20 a 30 ren/h, desse modo, a condição de contorno foi estabelecida o valor médio de 25 ren/h. Para a condição de mistura pobre e liberação de contaminante desprezível é recomendada de 30 a 60 ren/h, desse modo, a condição de contorno foi estabelecida o valor médio de 45 ren/h. Por fim, para a condição de movimento do ar desprezível e alta liberação de contaminantes o referido guia técnico determina que somente o emprego da ventilação não é suficiente, desse modo, não foi avaliada a simulação para este cenário.

Para o cálculo da vazão de exaustão requerida foi utilizada a equação 1 e o resultado está exposto na Tabela 8.

Tabela 8 – Vazão de exaustão requerida

Cenário	Trocas de ar recomendadas por hora (ren/h)	Volume do tanque (m <sup>3</sup> )	Vazão de exaustão requerida (m <sup>3</sup> /h)
1	10	65	650
2	25	65	1625
3	45	65	2925

Fonte: Autor, 2020.

A partir dos dados de condições de contorno e aplicando os conceitos de fluidodinâmica computacional, através do método dos volumes finitos, o software Ansys Fluent 2020 R2 soluciona numericamente as equações gerais de transporte já especificadas na revisão bibliográfica. Os resultados são expressos em termos de taxa de massa e dispostos na Tabela 9.



Tabela 9 – Taxa de massa nas BVs de entrada e saída

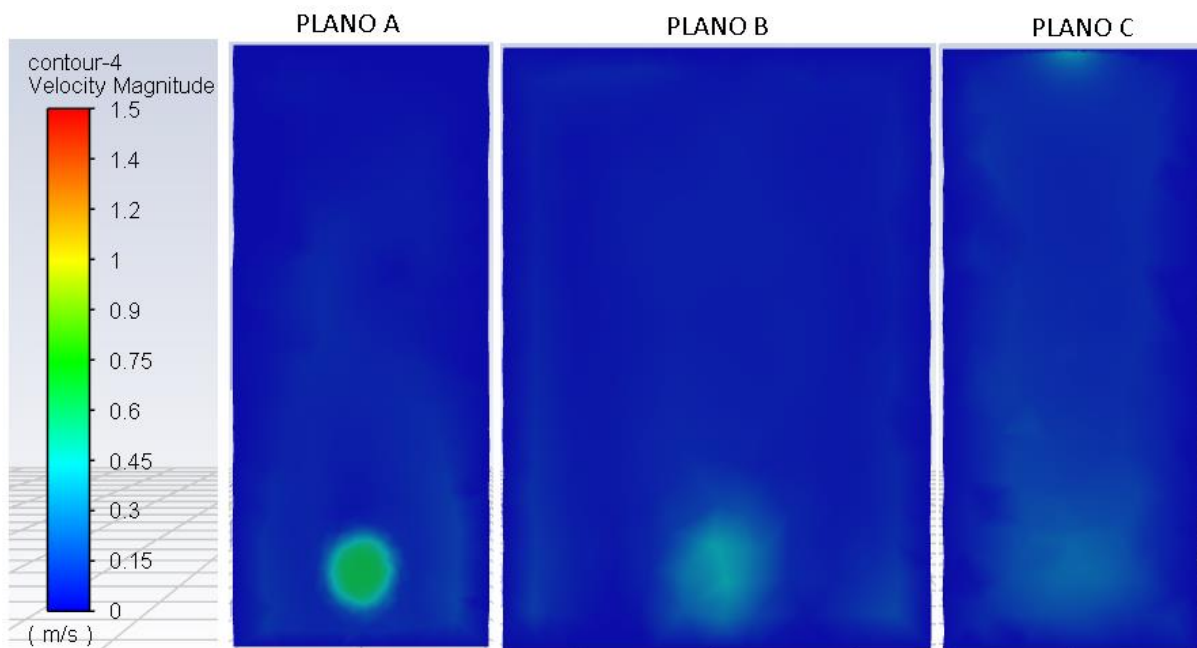
Cenário	Taxa de massa na BV	Taxa de massa na BV
	lateral (kg/s)	superior (kg/s)
1	0,2212	0,2212
2	0,5531	0,5531
3	0,9961	0,9961

Fonte: Autor, 2020.

As taxas de massa de entrada do ar pela BV lateral e de saída pela BV superior foram iguais em todos os cenários, assim, a partir do conceito do princípio da conservação de massa pode-se inferir que não há acúmulo de fluido no interno do equipamento. O resultado mínimo foi observado quando é adotado 10 ren/h e o valor máximo resultou em um ambiente com 45 ren/h. De fato, esses resultados corroboram com o esperado, uma vez que todas as variáveis permanecem constantes e só há variação na vazão de exaustão, nota-se que uma maior vazão tem como consequência um maior fluxo de massa pelo mesmo volume de controle.

Para uma análise da velocidade do ar em diferentes “estágios” do equipamento, foram traçados planos verticais, sendo: 01 plano deslocado 1,6 m no sentido positivo do eixo X (planos A, D e G); 01 plano no eixo central do equipamento (planos B, E e H); 01 plano deslocado 1,6 m no sentido negativo do eixo X (planos C, F e I), sendo os respectivos deslocamentos em relação ao eixo central do equipamento. A Figura 28 representa o gradiente de velocidade do cenário 1.

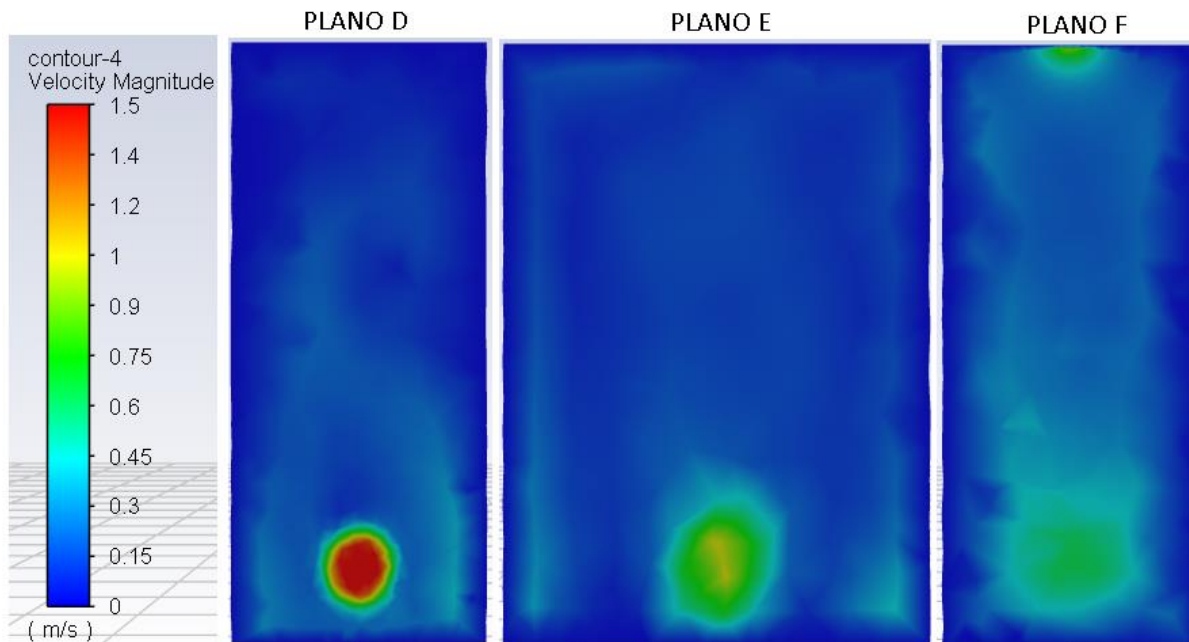
Figura 28 – Gradiente de velocidade considerando vazão igual a 650 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autor, 2020.

A Figura 29 representa o gradiente de velocidade do cenário 2.

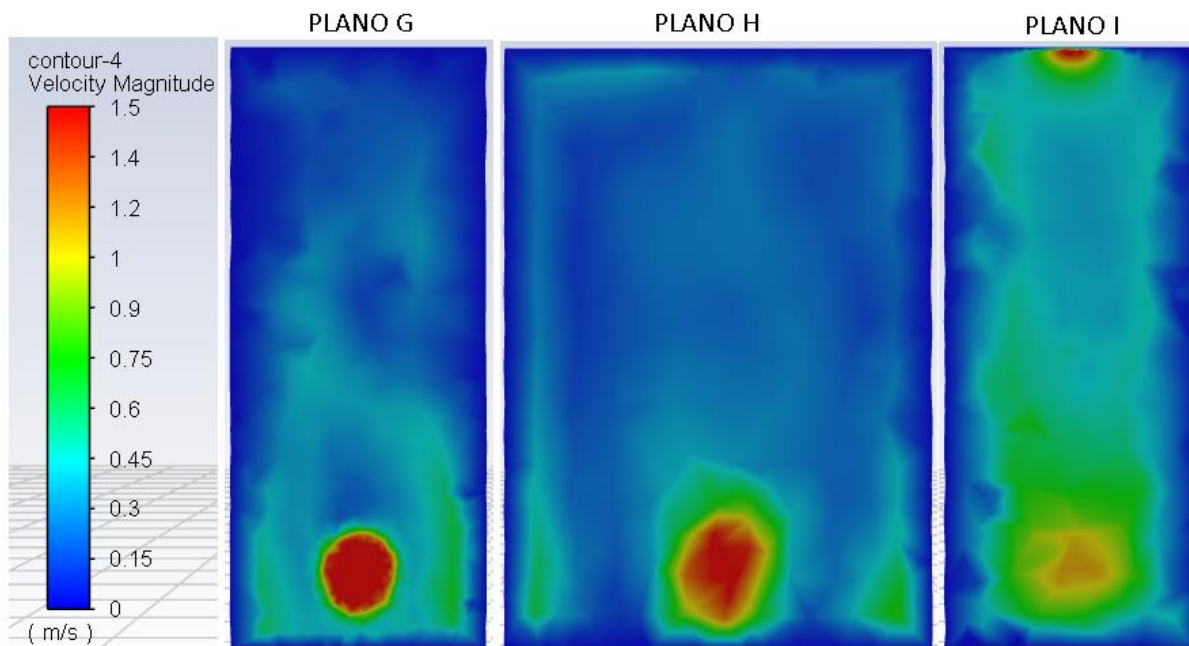
Figura 29 – Gradiente de velocidade considerando vazão igual a 1625 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autor, 2020.

A Figura 30 representa o gradiente de velocidade do cenário 3.

Figura 30 – Gradiente de velocidade considerando vazão igual a 9961 m<sup>3</sup>/h



Fonte: Autor, 2020.

Nos planos acima fica evidente a dispersão do ar no volume do tanque, notada através do gradiente de coloração, que representa a velocidade do ar em m/s, como nos planos C, F e I. Outro ponto observado é como essa dispersão aumenta de acordo com a vazão de exaustão estabelecida. Apesar dos planos A, D e G estarem dispostos a 0,2 m da BV lateral, e considerando a incidência de ar concentrada, apenas o plano A apresentou pouca dispersão.

Também é notável que nos planos há regiões em que a velocidade do fluido pode ser deficiente, como por exemplo, nas regiões próximas aos limites da geometria. Esse é um ponto que deve ser identificado, de fato foi, e defendido por Spinelli (2020).

Em se tratando da respiração humana, de acordo com a empresa Breathe (2011), a exigência humana de ar pode ser ponderada em relação a intensidade do trabalho a ser executado, visto que as taxas metabólicas do organismo humano são alteradas a depender do esforço físico. A Tabela 10 traz uma relação entre o tipo de trabalho e o consumo de ar.

Tabela 10 - Exigência humana de ar

Exigência Ar	Consumo (m <sup>3</sup> /h)
Em repouso	0,4 – 0,5
Trabalho de escritório	02 – 05
Trabalho leve	10 – 15
Trabalho manual	10 – 36
Trabalho pesado	40 – 60
Trabalho muito pesado	72 – 90

Fonte: Breathe, 2011.

Estabelecendo um cenário de maior criticidade – trabalho muito pesado –, o consumo de ar por um ser humano pode variar de 72 m<sup>3</sup>/h a 90 m<sup>3</sup>/h. Considerando este cenário e o valor médio de 80 m<sup>3</sup>/h, ou equivalente 0,027 kg/s, são necessários para que 01 pessoa exerça atividades neste tipo de ambiente. Nesse sentido, as condições determinadas pelo Guia Técnico NR33 garante uma taxa de ar adequada de forma a tender os requisitos de respiração humana, comprovadas pelos resultados de taxa mássica expostos na Tabela 8.

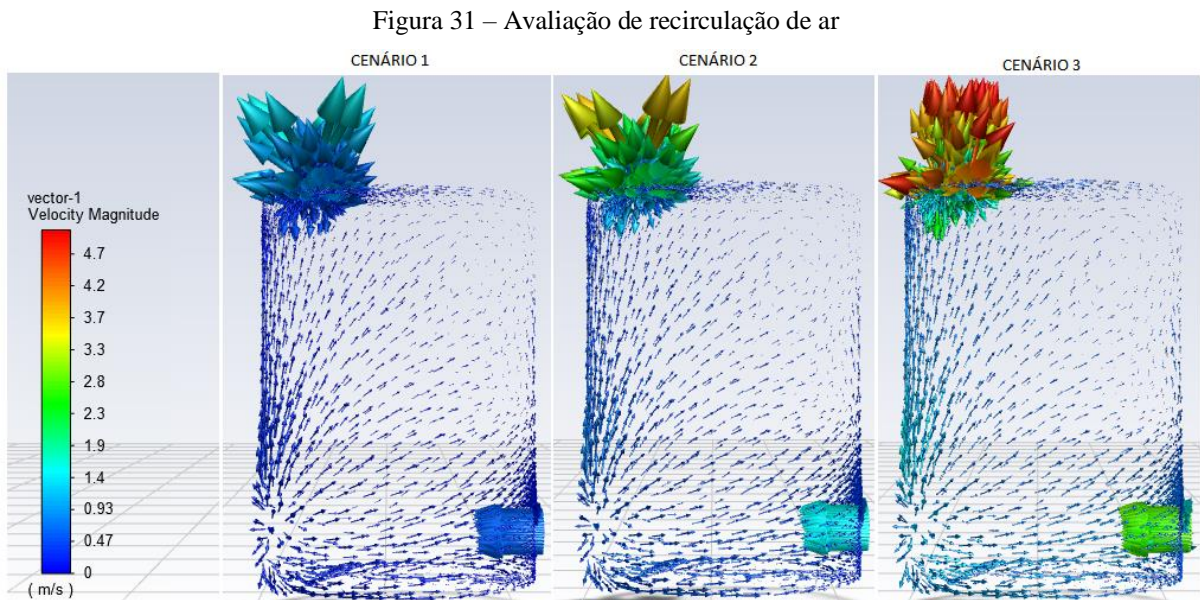
Em se tratando de conforto térmico, existe uma metodologia específica abordada pela NR15 – Insalubridade – e pela Norma de Higiene Ocupacional NHO 06 (2ª edição - 2017) da FUNDACENTRO. Essas entidades relacionam os limites de exposição ocupacional, índice de bulbo úmido termômetro de globo ( $\overline{IBGTU}_{MAX}$ ) e taxa metabólica média em atividades ( $\bar{M}$ ), de fato, para utilizar a metodologia defendida se faz necessário medições de campo, o que não

é possível neste momento em um cenário de trabalho em regime de *flex office* e que o referido equipamento encontra-se em operação.

De fato, a deficiência de oxigênio em um espaço confinado não está relacionada apenas a velocidade do ar, mas também ao comportamento do escoamento dentro do equipamento. Conforme avaliado na seguinte seção.

### 5.3.2. Análise das zonas de recirculação

Zonas de recirculação de ar em um ambiente confinado faz com que a renovação não ocorra em uma região específica. Sendo assim, uma característica a ser observada é a direção e sentido do escoamento do fluido, a Figura 31 expressa os vetores do escoamento.



Fonte: Autor, 2020.

O escoamento do ar não apresentou zonas de recirculação, determinada pela direção majoritária dos vetores no sentido positivo do eixo Y, ou seja, para a exaustão realizada na BV de topo. No plano de base, abaixo da BV lateral, é notório que há vetores com o sentido negativo do eixo Y, esse fato é esperado, uma vez que o choque entre a corrente de ar e parede do tanque faz com o que o ar se dissipe em outras direções e sentidos.

Além de não haver zonas de recirculação, é necessário que o ar de todo o ambiente seja renovado. Spinelli (2020) aborda em seu manual sobre ventilação em espaços confinados que o planejamento da ventilação deve prever e avaliar zonas em que o fluxo de ar afete apenas uma

parte do ambiente, sendo assim, é possível verificar que o escoamento permeia os limites da geometria, garantindo a inexistência de zonas em que o ar não seja circulado.

Nesse sentido, a avaliação dos vetores do escoamento permite inferir que a renovação de ar permeia os limites do equipamento.

### 5.3.3. Simulação com monóxido de carbono

O monóxido de carbono representa um contaminante tóxico que age por asfixia química. Após a inalação e difusão pela corrente sanguínea, ocorre uma interação entre o monóxido de carbono e a hemoglobina contida no sangue (responsável pelo transporte de gás oxigênio, O<sub>2</sub>, pelo corpo), formando a carboxiemoglobina (COHb). É importante ressaltar que o monóxido de carbono possui uma afinidade com a hemoglobina de 200 a 250 vezes maior do que o oxigênio, o que provoca uma diminuição na quantidade de O<sub>2</sub> distribuída pelos tecidos, causando asfixia (CETESB, 2010).

Este contaminante possui uma densidade relativa ao ar de 0,967 a 1 atm, isso significa dizer que apresenta uma característica de ser mais leve que ar, logo, tende a se concentrar em regiões superiores do equipamento. Nesse contexto, a justificativa da localização do exaustor, além das apresentadas na seção 5.1, é acrescentada pela avaliação da referida densidade relativa, permanecendo a BV de topo como o local mais apropriado para a instalação de uma ventilação exaustora.

A Tabela 11 representa a condição inicial da simulação. A vazão de exaustão definida compreende o que aborda o cenário 2, que apresenta característica de vazão intermediária em comparação com os outros cenários. Já a condição inicial do contaminante, foi determinada uma concentração inicial de 10.000 ppm.

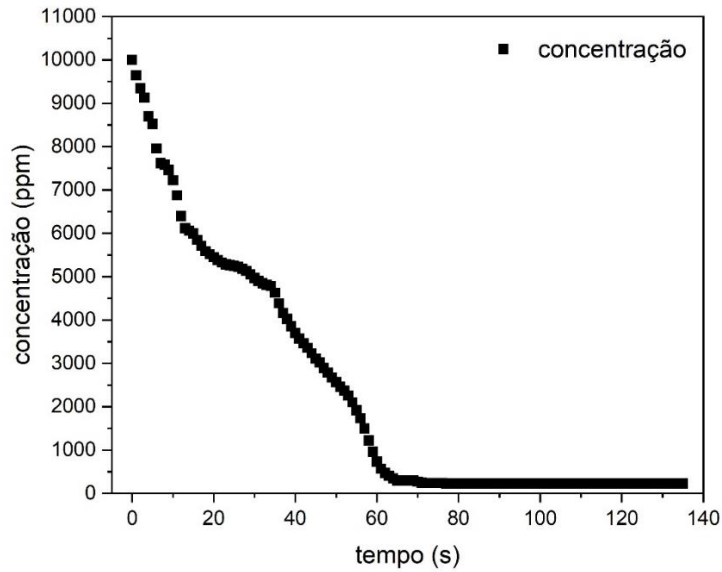
Tabela 11 – Condição inicial de monóxido de carbono e parâmetros de exaustão

Cenário	Concentração de monóxido de carbono (CO) (ppm)	Vazão de exaustão (m <sup>3</sup> /h)
2	10.000	1625

Fonte: Autor, 2020.

Para avaliar a característica de remoção de contaminante, foi simulado a ventilação exaustora por 135 segundos e os resultados estão expostos no Figura 32.

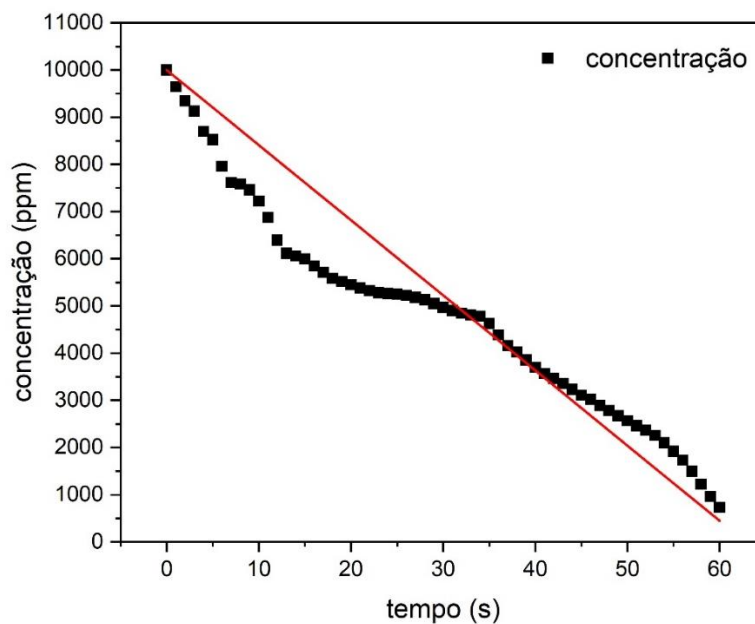
Figura 32 - Variação da concentração de monóxido de carbono em função do tempo



Fonte: Autor, 2020.

A Figura acima expressa o comportamento da concentração de monóxido de carbono em função do tempo. Nota-se que aproximadamente nos primeiros 60 segundos de ventilação o comportamento do gráfico apresenta uma tendência de decaimento linear, e a após isso, o sistema tende a estabilidade, sendo assim, este trabalho será pautado na avaliação do primeiro minuto de ventilação. O resultado é exposto no Figura 33.

Figura 33 – Dados experimentais de ventilação e modelo matemático



Fonte: Autor, 2020.

Para avaliar a condição da atmosfera em função do tempo o modelo matemático proposto se baseia numa equação linear. A Equação 8 representa o modelo obtido a partir dos dados da simulação:

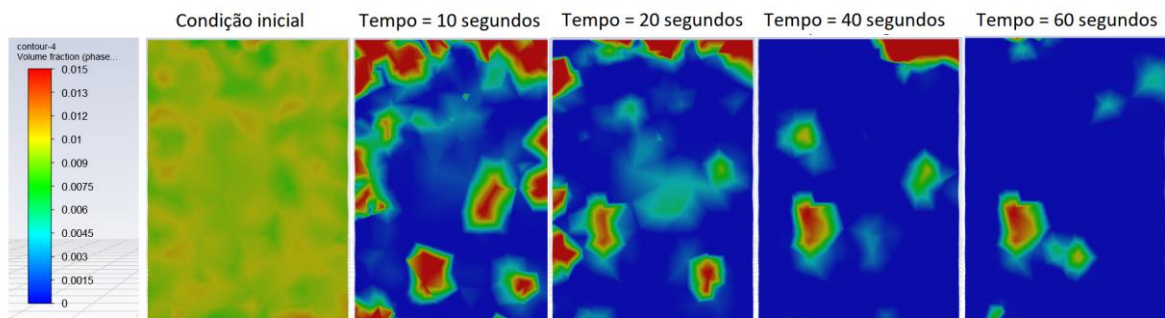
$$C = 10000 - 159,75 * t \quad (8)$$

Onde C representa a concentração de monóxido de carbono (ppm) e t representa a variável tempo (s).

Este modelo apresenta compatibilidade com dados experimentais, possuindo um coeficiente de correlação  $R^2$  igual a 0,86. O coeficiente angular do referido modelo possivelmente está relacionado a velocidade do ar de entrada, assim, é notado que após aproximadamente 56 segundos de ventilação a atmosfera ainda apresenta um elevada concentração de monóxido de carbono, sendo igual a 900 ppm e após aproximadamente 60 segundos de ventilação, o ambiente apresenta 500 ppm, sendo inadequado para a ocupação humana. Nesta situação, os expostos possuiriam uma concentração de 45% de carboxi-hemoglobina e sujeitos a náuseas e vômitos, de acordo com o *American Petroleum Institute*. Com isso fica evidente que o primeiro minuto de ventilação não é suficiente para prover uma atmosfera segura baseada no que tange a NR15, a qual estabelece a exposição a uma concentração máxima de 39 ppm considerando uma jornada de 48 horas/semana ou equivalente 6 horas/dia.

Para uma análise visual do escoamento do fluido, foi traçado um plano no eixo central do equipamento que retrata a fração volumétrica do monóxido de carbono durante os 60 primeiros segundos de ventilação exaustora, o resultado pode ser visualizado na Figura 34.

Figura 34 – Fração volumétrica de monóxido de carbono



Fonte: Autor, 2020.

De fato, nota-se que a fração volumétrica de monóxido de carbono ao longo do tempo tende de diminuir, notado através da coloração predominantemente azul escuro (fração

volumétrica aproximadamente igual a 0), como pode ser visto quando a simulação atinge de 50 segundos. Outro fato importante é que o referido contaminante tende a se concentrar na parte superior do equipamento, notado através da coloração verde, amarela e vermelha. Esse comportamento também é esperado, uma vez que a densidade relativa ao ar é de 0,967 e que a exaustão está ocorrendo pela BV de topo.

#### **5.3.4. Recomendações de segurança**

Em se tratando de espaços confinados e ventilação industrial existem diversas recomendações de segurança que visam garantir a saúde e segurança de todos os envolvidos em atividades deste porte. As recomendações listadas abaixo são oriundas do Guia Técnico NR33 e de experiências profissionais do autor deste trabalho de conclusão de curso. São elas:

- Realizar a análise de risco no espaço confinado em conjunto com a equipe de execução da atividade visando avaliar os riscos, como: ruído, umidade, queda de mesmo nível, queda de nível diferente, queda de material, vibração, contato com superfícies quentes, entre outros. Para cada risco avaliado deve-se estabelecer as medidas de controle aplicáveis.
- Realizar o monitoramento inicial e contínuo de oxigênio, gases tóxicos e inflamáveis através de equipamento específicos e intrinsecamente seguros;
- Deve-se atentar para as condições físicas e emocionais da equipe envolvida na atividade;
- Deve-se possuir um plano de resgate com os direcionamentos em caso de intercorrência;
- Todos os envolvidos na atividade precisam ser legalmente habilitados e treinados, incluindo o supervisor e vigia de espaço confinado;
- O suprimento de ar para a ventilação forçada deve ser retirado de uma fonte limpa e segura e é proibido realizar a ventilação com oxigênio puro;
- Posicionar a saída de ar do sistema exaustor para local seguro, de modo a não comprometer demais trabalhadores;
- Para espaços confinados com presença de agentes químicos potencialmente inflamáveis, os ventiladores, motores, quadros elétricos, e fiação devem ser adequados à classificação da área;
- A formação e acúmulo de eletricidade estática podem ocorrer nos processos abrasivos com geração de poeira, mangotes flexíveis não condutores e locais com baixa umidade relativa do ar. Para controle da eletricidade estática é recomendável utilizar mangotes flexíveis de



material condutor, aterramento da espiral metálica e do ventilador, bem como o teste de todo o circuito para verificar a sua eficiência;

- O controle de energia deve ser feito através de um adequado sistema de bloqueio e etiquetagem (*lock-out & tag-out*) devidamente previsto e executado conforme procedimentos e Permissão de Entrada e Trabalho;
- Observar o correto sentido da rotação do ventilador, conforme especificado pelo fabricante e o modo de ventilação determinado;
- Máquinas com motores à combustão interna no interior de espaços confinados podem formar rapidamente atmosfera IPVS, mesmo quando disponível ventilação com alta vazão;
- O ar poluído retirado do espaço confinado não deve ser direcionado para locais de trabalho ocupados no seu entorno.

## 6. CONCLUSÃO

Na indústria petroquímica é necessária a avaliação de ventilação adequada para a realização de atividades críticas em um ambiente definido como espaço confinado. Essa avaliação é utilizada para garantir a saúde e segurança de todos os envolvidos, no que diz respeito aos padrões de atmosfera definidos pela NR33.

Com essas considerações, foi avaliado um sistema de ventilação em um equipamento de uma indústria de Alagoas cujas atividades durante paradas gerais de manutenção incluem serviços em espaço confinado. A utilização de ventilação natural se mostrou favorável no que diz respeito a atividades como inspeção técnica e levantamento fotográfico. Em relação a ventilação mecânica, a BV de topo foi avaliada como o local ideal para a instalação de um sistema de exaustão. O princípio da conservação de massa foi validado nos cenários descritos neste trabalho de modo a inferir que não há acúmulo de ar. O quesito taxa de massa do escoamento foi suficiente para atender a um cenário de “trabalho pesado” no quesito consumo humano de ar e também foi notado a escoamento permeia os limites da geometria e não há zonas de recirculação.

Em se tratando de remoção de contaminante, foi identificado que a partir do modelo matemático proposto, os primeiros 60 segundos de ventilação não suficientes para estabelecer uma atmosfera segura no que tange a NR15. Por fim, foram realizadas recomendações de segurança com base no Guia Técnico NR33, de forma a garantir a saúde e segurança das pessoas neste tipo de ambiente, como por exemplo: garantir que o suprimento de ar para a ventilação forçada deve ser retirado de uma fonte limpa e segura e posicionar a saída de ar do sistema exaustor para local seguro, de modo a não comprometer demais trabalhadores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR nº 14.787 Espaço Confinado – Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção. São Paulo: ABNT. 2001.

ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, 2009. Fluent Inc

ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Handbook Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2001.

AZEVEDO, F. N. R.; OLIVEIRA JUNIOR, L. G. Gerenciamento de Riscos em Espaços Confinados. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória. 2009.

BARDINA, J. E.; HUANG, P. G.; COAKLEY, T. J. Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development. Nasa Technical Memorandum, n. 110446, p. 8–20, 1997.

BORRÉ, R. L. Sistema de Ventilação em Ambiente Industrial. Departamento de Ciências Exatas e Engenharias. Panambi, 2013.

BRASIL, Ministério do Trabalho. Norma Regulamentadora NR-15 - Atividades e Operações Insalubres. Anexo 3. Portaria SEPRT n.º 1.359, de 09 de dezembro de 2019.

BRASIL, Ministério do Trabalho. Norma Regulamentadora NR-33 - Segurança e saúde nos trabalhos em espaço confinado. Manual de Legislação Atlas. 59ª edição. São Paulo: Atlas S. A., 2006.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Guia técnico NR-33. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego. 2013.

BREVIGLIERO, E.; POSSEBON, J.; SPINELLI, R. Higiene Ocupacional: Agentes biológicos, químicos e físicos. 5ª Edição. Editora SENAC São Paulo. São Paulo. 2010

CAMPOS, A. A. M. Espaço Confinado - Processo Seguro: A gestão de segurança e saúde deve ser planejada. Programada, implementada e avaliada. Revista Proteção. N. 182. São Paulo. Fevereiro de 2007.

COSTA, E. C. Ventilação . – São Paulo: Edgar Blucher, 2005.

DEL FRARI, R. V. Malhas computacionais para simulação numérica de escoamentos de fluidos entre cilindros com excentricidade. In: ENCONTRO GAÚCHO DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, 2009. Ijuí. Anais... Erechim: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2009. P. 01-08.

DUARTE, C. R. Estudo Experimental E De Simulação Da Fluidodinâmica E Recobrimento Em Leito De Jorro. Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2006.

FILHO, D. G. Avaliação Do Uso De Fluidodinâmica Computacional (CFD) em *Spray Dryers*. Universidade Federal de Uberlândia. Patos de Minas, 2017.

FILHO, M. B. C. Programa de Gestão de Segurança e Saúde em Espaços Confinados. Escola Técnica de São Sebastião. São Sebastião. 2012.

KRZYZANIAK, E. Proposta de adequação da NR33: espaços confinados de uma planta frigorífica. Chapecó: 2010. 117 p. Monografia (Especialização) – Curso de PósGraduação (lato sensu) em Engenharia de Segurança do Trabalho, Universidade Comunitária de Chapecó, 2010.

LEMOS, P. R. M. Espaços Confinados: Reconhecimento dos Riscos Característicos para a Prevenção de Acidentes. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Porto Alegre, 2017.

LIMA, R. C. Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Incompressíveis com Transferência de Calor e Massa por um Método De Elementos Finitos de Subdomínio. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MACINTYRE, Archibald Joseph. Ventilação industrial e controle da poluição. 2ª. Ed. Rio de Janeiro: LCT, 1990.

MAGOTTO, B. H. M.; OLIVEIRA, S. M. Comparação entre o Método de Projeto de Turbinas Eólicas e CFD para o Experimento Nrel Phase VI. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2017.

MALISKA, Clovis R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.

MARTÍN, M. M. Introduction to Software for Chemical Engineers. Boca Raton, Florida: CRC Press/Taylor & Francis. 2014.

MARTINS, A. Análise do Trabalho em Espaço Confinado: Descontaminação e Manutenção de Vagão Tanque Ferroviário. Universidade Tecnológica do Paraná, 2014.

MARTINS, N. A. S. Nível de Oxigénio Em Espaços Confinados. Instituto Politécnico de Setúbal, 2018.

McMANUS, N. Advancing the paradigm: Confined spaces and the uncharacterized workspace. NorthWest Occupational Health and Safety, 1999.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSIN. Engenharia de ventilação industrial. Ed. CETESB, São Paulo: 1988.

MORAES JR., Regras básicas de Segurança para Trabalhos com Corte e Solda. Disponível em: [http://www.segurancaetrabalho.com.br/download\\_2/regras-basicas-de-seguranca-para-trabalhos-com-corte-e-solda.doc](http://www.segurancaetrabalho.com.br/download_2/regras-basicas-de-seguranca-para-trabalhos-com-corte-e-solda.doc). Acesso em: 22 de setembro de 2020.

MORAES, G. Normas Regulamentadoras Comentadas. Rio de Janeiro, 2009. Ed: Verde Editora e Livraria Virtual.

NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health. Working in Confined Spaces. 1979.

NIOSH. National Institute for Occupational Safety and Health: Respiratory decision logic. Cincinnati: DHHS (NIOSH). 1987.

NUNES, M. B. Segurança do Trabalho em Espaços Confinados. Dossiê Técnico. Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro – REDETEC. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas. Rio de Janeiro. 2011.

OLIVEIRA, J. M. Noções de Ventilação Industrial (apostila). 2013. Disponível em: <[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/VENTILACAO\\_INDUSTRIAL.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/VENTILACAO_INDUSTRIAL.pdf)> Acesso em: 21 de setembro de 2020.

OSHA. U.S. Department of Labor Occupational Safety & Health Administration. Confined Spaces. Washington, 2005.

QUADROS, R. C. Simulação Numérica de Modelos de Turbulência para o Efeito Magnus. Universidade Federal Do Paraná. Curitiba, 2018.

SABLANI, S.; DATTA, A. K.; RAHMAN, M. S.; MUJUMDAR, A. S.. Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques. Boca Raton, Florida: CRC Pres. 2007.

SERRÃO, L. C. S.; QUELHAS, O. L. G.; LIMA, G. B. A. Os riscos dos trabalhos em espaços confinados. Universidade Federal Fluminense – UFF. Rio de Janeiro. 2000.

SILVA, D. F. Saúde e segurança nos trabalhos em espaços confinados nas usinas sucroalcooleiras. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Segurança do Trabalho). Senac – Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial de Minas Gerais, Uberaba, 2009.

SPINELLI, L. Manual sobre ventilação em espaços confinados. 2020 Disponível em: <  
[http://www.cpscetec.com.br/repositorio/Seguranca\\_do\\_Trabalho/manual\\_ventilacao\\_espaco\\_confinado\\_compacto.pdf](http://www.cpscetec.com.br/repositorio/Seguranca_do_Trabalho/manual_ventilacao_espaco_confinado_compacto.pdf)>. Acesso em 31 de outubro de 2020.

SUN, D. W. Computational fluid dynamics in food processing. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis Group. 2007.

TURAZI, J. Elaboração de um Procedimento para Limpeza de Tanques de Combustíveis em Fase de Instalação. (Monografia de Especialização). Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

XIA, B.; SUN, D.-W. W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: A review. Computers and Electronics in Agriculture, v. 34, n. 1–3, p. 5–24, 2002.