UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

MILENA MASUDA

Dimensionamento de áreas classificadas por fluidodinâmica computacional e pelas normas aplicáveis: uma comparação

Rio de Janeiro
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Milena Masuda

Dimensionamento de áreas classificadas por fluidodinâmica computacional e pelas normas aplicáveis: uma comparação

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientador:

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Rio de Janeiro

2018

Masuda,Milena.

Dimensionamento de áreas classificadas por fluidodinâmica computacional e pelas normas aplicáveis: uma comparação / Milena Masuda. – 2018.

78f : il.

Dissertação (Mestrado em Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2018. Orientador: Ricardo de Andrade Medronho.

1.Segurança de Processos 2. Classificação de Áreas 3. Atmosfera Explosiva.. I. Medronho, Ricardo de Andrade. II. UFRJ. III. Dimensionamento de áreas classificadas por fluidodinâmica computacional e pelas normas aplicáveis: uma comparação.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Milena Masuda

Dimensionamento de áreas classificadas por fluidodinâmica computacional e pelas normas aplicáveis: uma comparação

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado por:

_____

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Orientador – EQ/UFRJ

_____

Prof. Rodrigo Azevedo dos Reis, D.Sc.
UERJ

_____

Prof. Luiz Augusto da Cruz Meleiro, D.Sc.
UFRRJ

Rio de Janeiro

2018

Aos companheiros Gabriel Ponzetto e Kira, à família, amigos;
Cristina, Vilma e Fumiko *in memoriam*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo apoio e paciência do meu marido, companheiro, parceiro Gabriel Ponzetto, à família e aos amigos que sempre me incentivaram.

Agradeço aos colegas da Transpetro que também me auxiliaram com informações, dados e pensamentos positivos nos momentos críticos.

Agradeço ao orientador, professor Ricardo Medronho e sua equipe do LABCFD por todo o auxílio e apoio para que este trabalho fosse encaminhado corretamente.

Agradeço à equipe do professor Henrique França Meyer e sua equipe do Laboratório de Verificação e Validação da Universidade Regional de Blumenau (FURB) pela oportunidade de aprender a utilizar parte das ferramentas necessárias para alcançar este objetivo.

RESUMO

MASUDA, Milena. Dimensionamento de áreas classificadas por fluidodinâmica computacional e pelas normas aplicáveis: uma comparação. Rio de Janeiro, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Acidentes relacionados a plantas químicas são de grande preocupação pois, apesar de possuir frequências de ocorrência consideradas intermediárias, suas consequências são graves, com potencial intermediário para fatalidades e alto potencial para perdas econômicas. Uma das questões apontadas para este risco tem relação com instalações elétricas e equipamentos com componentes que operam com produtos inflamáveis, que podem atuar como fonte de ignição e levar a graves acidentes. Sendo assim, um adequado dimensionamento das áreas classificadas se faz necessário para evitar a ocorrência de acidente em locais com presença de atmosferas explosivas. Este estudo tem como objetivo dimensionar a área classificada de um parque de bombeamento de petróleo, através de simulação numérica por meio de fluidodinâmica computacional, CFD, e comparar os resultados obtidos da aplicação de normas utilizadas para o dimensionamento de áreas classificadas. A norma utilizada como referência para dimensionar as áreas classificadas encontra-se no conjunto de normas ABNT NBR IEC 60079. No entanto, algumas seguradoras utilizam a referência americana, NFPA 497 e também pode ser seguida a norma API 505, do *American Petroleum Institute*, dado que o produto em estudo é o petróleo. Para aplicação de fluidodinâmica computacional utilizou-se o CFX do *software* Ansys. A comparação dos resultados de classificação de áreas entre as normas e a realizada com a simulação de CFD sugerem que, mesmo com interferência da subjetividade e o uso de critérios menos conservadores, as normas são suficientemente seguras, no entanto, acredita-se que o uso de CFD pode auxiliar em projetos como uma ferramenta auxiliar na análise de risco.

ABSTRACT

MASUDA, Milena. Análise comparativa do resultado do dimensionamento de áreas classificadas por fluidodinâmica computacional com as normas aplicáveis. Rio de Janeiro, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Accidents related to chemical plants are a concern because in spite of having intermediate frequency of occurrence, the consequences are severe, with intermediate fatality potential and high potential of economic losses. One of the issues noted to this risk is related with electrical facilities and equipment with components operating with flammable products, which can act as source of ignition, generating severe accidents. So, an appropriate hazardous area definition is necessary to avoid these types of accidents in places with explosive atmospheres. This study aims to define a hazard area of a crude oil pump facility simulating numerically with Computational Fluid Dynamics, CFD, and compare the results to the standards used to define the hazardous areas. The standard used as reference to define hazardous areas is one of the ABNT NBR IEC 60079 group. However, insurance companies use the American standard NFPA 497. Other standard such as the American Petroleum Institute API 505 may also be used as the product of the study is crude oil. For the computational fluid dynamics, the CFX of Ansys software was employed. The comparison of the results of the hazardous area of the standards to the CFD simulation suggests that even the subjectivity interference and use of less conservative criteria, the standards are sufficiently safe. Nevertheless, the use of CFD may support projects as an auxiliary tool of risk analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Configuração do sistema importado de figura pré existente com inclusão de volume de controle (Fonte: elaboração própria).....2

Figura 2: Parque de bombas (foto tirada em 9 de agosto de 2018).....14

Figura 3: Detalhe de um conjunto motobomba. 14

Figura 4: Figura ilustrativa do tipo de vazamento em flange e a emanação de vapores para a atmosfera (Fonte: elaboração própria) 17

Figura 5: Fluxograma para classificação de área (fonte: adaptação de ABNT NBR IEC 60079-10 (2009)). 21

Figura 6: Parte fluxograma adaptado da página 60 da ABNT NBR IEC 60079-10 (2009). 21

Figura 7: Exemplo 1 adaptado da norma (ABNT, 2009). 25

Figura 8: Exemplo 4 adaptado da norma (ABNT, 2009). 26

Figura 9: Adaptação da Figura da página 43 da NFPA 497(fonte: NFPA (2012)). 29

Figura 10: Adaptação da figura da página 40 da NFPA 497(fonte: NFPA (2012)) 30

Figura 11: Adaptação da figura 20 da API 505 (fonte: API 505 (2013)).....32

Figura 12: Adaptação da figura 21 da API 505 (fonte: API 505 (2013)).....33

Figura 13: Adaptação da figura de classificação de área para bombas *onshore* e *offshore* (fonte: API 505 (2013)). 33

Figura 14: Adaptação da figura D-2 da matriz de taxa de liberação para determinação do raio de perigo da API 505 (fonte: API 505 (2013)).....34

Figura 15: Ilustração do volume de controle (Fonte: elaboração própria).....43

Figura 16: Superfícies onde ocorre vazamento de líquido e posterior emanação de vapores, destacadas em verde (*LEAK*) (Fonte: elaboração própria).....44

Figura 17: Localização da linha utilizada para o teste de malha.....46

Figura 18: Comparação da concentração molar de propano em mesmas condições de simulação nas diferentes malhas da Tabela 15. 47

Figura 19: Comparação da concentração molar de propano em mesmas condições de simulação nas diferentes malhas da Tabela 16. 47

Figura 20: Comparação da concentração molar de propano considerando métodos de geração de malhas diferentes. 48

Figura 21: Vistas da malha de 510mil nós. 48
Figura 22: Corte no plano YZ da malha de 510mil nós. 49
Figura 23: Vistas da malha de 495 mil nós. 49
Figura 24: Corte no plano YZ da malha de 495mil nós. 50
Figura 25: Indicação dos pontos cardeais em relação ao modelo no CFX. 52
Figura 26: Ilustração da configuração geral no CFX. 52
Figura 27: Vista isométrica da área classificada (fonte: elaboração própria)..54
Figura 28: Vista do Plano YZ da área classificada (fonte: elaboração própria). 54
Figura 29: Vista do plano XZ da área classificada (fonte: elaboração própria). 55
Figura 30: Vista do Plano XY da área classificada (fonte: elaboração própria). 55
Figura 31: Perfil de fração mássica de propano do regime laminar à esquerda e do regime turbulento à direita, longitudinal à bomba. 56
Figura 32: Perfil de fração mássica de butano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal à bomba. 57
Figura 33: Perfil de fração mássica do ar no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal à bomba. 57
Figura 34: Perfil de fração mássica de propano do regime laminar à esquerda e do regime turbulento à direita, longitudinal aos flanges. 58
Figura 35: Perfil de fração mássica de butano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal aos flanges. 58
Figura 36: Perfil de fração mássica do ar no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal aos flanges. 59
Figura 37: Perfil de fração mássica de propano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, transversal à bomba. 59
Figura 38: Perfil de fração mássica de butano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, transversal à bomba. 60
Figura 39: Perfil de fração mássica do ar no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, transversal à bomba... 60
Figura 40: Regime Laminar – *isosurface* para LIE do C3. 61
Figura 41: Regime Laminar - *isosurface* para LIE do C4. 61

Figura 42: Regime Laminar – *isosurface* da fração molar de ar no valor 0,981. 62
Figura 43: Regime Laminar - *isosurface* para LIE da mistura C3 e C4.....62
Figura 44: Regime Turbulento - *isosurface* para LIE do C3.....63
Figura 45: Regime Turbulento - *isosurface* para LIE do C4.....63
Figura 46: Regime Turbulento - *isosurface* da fração molar de ar no valor 0,981. 64
Figura 47: Regime Turbulento- *isosurface* para LIE da mistura C3 e C4.....64
Figura 48: Vista do dimensionamento da área da bomba.....65
Figura 49: Vista do dimensionamento da área da bomba corte YZ. 65
Figura 50: Vista do dimensionamento da área da bomba corte XZ. 66
Figura 51: Vista do dimensionamento da área da bomba corte XY. 66
Figura 52: Comparação dos dimensionamentos obtidos no regime laminar à esquerda e turbulento à direita. 67
Figura 53: Comparação dos dimensionamentos obtidos no regime laminar acima e turbulento abaixo. 67
Figura 54: Comparação dos dimensionamentos com foco nas válvulas. 68
Figura 55: Comparação dos dimensionamentos com foco na bomba. 69
Figura 56: Comparação dos dimensionamentos obtidos com a aplicação da norma à direita e com CFD à esquerda- vista geral. 69
Figura 57: Nuvem delimitada pelo LIE da mistura à esquerda e 50% do LIE da mistura à direita. 70
Figura 58: Regime laminar com maior de taxa de evaporação – nuvem delimitada pelo LIE da mistura à esquerda e 50% do LIE da mistura à direita 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Origem do petróleo e características (Fonte: Banco de Dados de Avaliações de Petróleo). 16

Tabela 2: Manutenção corretiva (elaboração própria). 18

Tabela 3: Produção de GLP em algumas refinarias (Fonte: adaptado de (Mariano, 2005)).....19

Tabela 4: Tabela para análise dos materiais inflamáveis (fonte: adaptação de ABNT NBR IEC 60079-10 (2009).....22

Tabela 5: Tabela para definição do tipo de zona e extensão (fonte: adaptação de ABNT NBR IEC 60079-10 (2009).....23

Tabela 6: Caracterização da zona para grau da fonte de risco e ventilação adaptada da norma (fonte: ABNT (2009)). 24

Tabela 7: Magnitudes relativas ao equipamento e tubulação do processo com materiais combustíveis (fonte: adaptado de NFPA (2012)).....28

Tabela 8: Aplicação da Tabela 7 para este estudo (fonte: elaboração própria). 28

Tabela 9: Adaptação da Tabela 2 da API 505 da relação entre o grau de liberação e a presença de atmosfera inflamável (fonte: API 505 (2013)).....31

Tabela 10: Adaptação da tabela 3 da API 505 da relação entre a classificação de área e a presença de atmosfera inflamável (fonte: API 505 (2013)). 32

Tabela 11: Coeficientes de difusão a 298,2 K (Fonte: (a) (MATSUNAGA, HORI, & NAGASHIMA, 2007) , (b) (BARR & WATTS, 1972) e (c) (ELLIOTT & WATTS, 1972)). 38

Tabela 12 Adaptação dos Registros de LIE (ou LEL – *Lower Explosion Limit*) e LSE (ou UEL – *Upper Explosion Limit)* experimentais do petróleo (ZHU, QIAN, LIU, HUANG, & YUA, 2015). 39

Tabela 13 Adaptação dos registros de LIE e LSE e concentração limitante do oxigênio experimentais do petróleo a diferentes temperaturas (ZHU, QIAN, LIU, HUANG, & YUA, 2015). 39

Tabela 14: Limites de inflamabilidade porcentagem mássica, concentração mássica e molar Fonte: elaboração própria (dados %v de Crowl & Louvar (2015))..41

Tabela 15: Geração de malha com alteração de funções. (Fonte: elaboração própria).....45

Tabela 16: Geração de malha com redução de tamanho de face e elemento. (Fonte: elaboração própria) 45
Tabela 17: Condições definidas para a simulação no CFX 51
Tabela 18: Aplicação dos critérios menos conservadores das normas internacionais (Fonte: elaboração própria) 53

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ANSI	*American National Standards Institute*
API RP	*American Petroleum Institute Recommended Practice*
ASMB	*Albert Sweet Mixed Blend*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BSW	*Bottom settled water*
CAF	*Compressed asbestos fibre*
CCPS	*Center for Chemical Process Safety*
CEI	*Comitato Elettrotecnico Italiano*
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IEC	*International Electrotechnical Commission*
LEL	*Lower explosive limit*
LFL	*Lower flammable limit*
LIE	Limite inferior de explosividade
LSE	Limite superior de explosividade
MESG	*Maximum experimental safe gaps*
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NFPA	*National Fire Protection Association*
NR	Norma Regulamentadora
PSV	*Pressure safety valve*
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMS	*Root mean square*
UEL	*Upper explosive limit*
UFL	*Upper flammable limit*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1. Revisão das Normas 9
2.1.1. ABNT NBR IEC 60079 – 10- 1:2009 9
2.1.2. National Fire Protection Association 497.....10
2.1.3. American Petroleum Institute Recommended Practice 505 11
3. METODOLOGIA.....13
3.1. Descrição da área em estudo.....13
3.2. Características do produto 15
3.3. Considerações sobre o sistema 16
3.4. Aplicação das Normas.....19
3.4.1. Aplicação da ABNT NBR IEC 60079 – 10- 1:2009.....20
3.4.2. Aplicação da Norma NFPA 497.....26
3.4.3. Aplicação da Recomendação API 505 30
3.5. Aplicação de Fluidodinâmica Computacional – CFD.....36
3.5.1. Considerações 36
3.5.1.1. Taxa de evaporação do petróleo.....37
3.5.1.2. Coeficientes de difusão no ar.....38
3.5.2. Inflamabilidade 38
3.5.2.1. Escoamento e condições climáticas 41
3.5.2.2. Vazamento / Emanação de Vapores.....42
3.5.3. A Geometria Estudada 42
3.5.4. Geração da Malha.....44
3.5.5. Teste de Malha.....45
3.5.6. CFX 50

4. RESULTADOS 53
4.1. Resultado das aplicações das normas para a classificação de áreas 53
4.2. Resultado da simulação numérica 55
4.3. Comparação dos Resultados 65
5. CONCLUSÕES.....73
6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....74
7. BIBLIOGRAFIA.....75

1. INTRODUÇÃO

Acidentes relacionados a plantas químicas, tais como incêndios e explosões, causam grande preocupação. Apesar de suas frequências de ocorrência serem consideradas intermediárias, suas consequências são graves, com potencial intermediário para fatalidades e alto potencial para perdas econômicas (CROWL & LOUVAR, 2015). Nos anos 80, diversos acidentes de consequências graves ocorreram e fizeram com que a segurança de processos fosse questionada e posteriormente, aprimorada.

Uma das questões apontadas para este risco tem relação com instalações elétricas e equipamentos com componentes que operam em alta temperatura com produtos inflamáveis, que podem atuar como fonte de ignição e levar a graves acidentes como ocorrido em Buncefield/UK, em 2005. Neste acidente, ocorreu uma explosão de nuvem de vapor, sendo considerada uma das piores ocorrências dos últimos 50 anos na Europa (MANNAN, 2009). Segundo Erthal (2015), a identificação e o mapeamento dos locais com risco de apresentar concentração de vapores ou gases inflamáveis visa à adequada especificação de equipamento, com o objetivo de aumentar a segurança da instalação.

No Brasil, algumas normas de caráter técnico e de gestão foram estabelecidas, com destaque para a Norma Regulamentadora nº 20 - Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis, do Ministério do Trabalho, que estabelece no item 20.3.3 que os líquidos inflamáveis são aqueles com ponto de fulgor igual ou inferior a 60 ^{o}C (MTE - NR 20, 2015) e menciona a necessidade de instalações e equipamentos elétricos estarem em conformidade com a Norma Regulamentadora nº 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade.

Para as plantas que trabalham com substâncias inflamáveis, a classificação de áreas é uma medida de controle, visando a análise do tipo de fontes elétricas que podem gerar uma ignição, para uma determinada área onde se espera uma atmosfera inflamável (CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (CCPS), 2014). Para que este controle seja eficaz, Kletz (2013) ressalta a importância das manutenções destes equipamentos certificados, para este tipo de área. Portanto, um adequado dimensionamento das áreas classificadas se faz necessário para evitar a ocorrência

de acidente com equipamento ou instalação elétrica como fonte de explosão em locais com presença de atmosferas explosivas.

O dimensionamento de áreas classificadas segue critérios estabelecidos por normas, com figuras pré-estabelecidas e cálculos hipotéticos que podem levar à falha de dimensionamento de uma atmosfera explosiva (OTSUKA, 2011). O subdimensionamento pode levar a acidentes como flash, incêndios ou explosões (CRUZ, 2012). Entretanto, devido ao tratamento conservador deste tema, o superdimensionamento pode gerar elevados custos de projeto devido à instalação de equipamentos certificados para área classificada mais robustos do que o necessário (CRUZ, 2012). Espera-se que simulação de dispersão de atmosferas inflamáveis possa levar à redução do erro que a subjetividade e os critérios pré-estabelecidos incorporam ao dimensionamento.

Este estudo tem como objetivo dimensionar a área classificada de um parque de bombeamento de petróleo (Figura 1) a ser simulado numericamente por meio de fluidodinâmica computacional, e comparar os resultados obtidos com aqueles provenientes da aplicação de normas utilizadas para este mesmo fim. A norma aplicável para este dimensionamento é a ABNT NBR IEC 60079-10-1 de 2009, mas também serão consultadas como referência as normas estrangeiras NFPA 497 e a API RP 505 com o dimensionamento estabelecido por norma aplicável no Brasil.

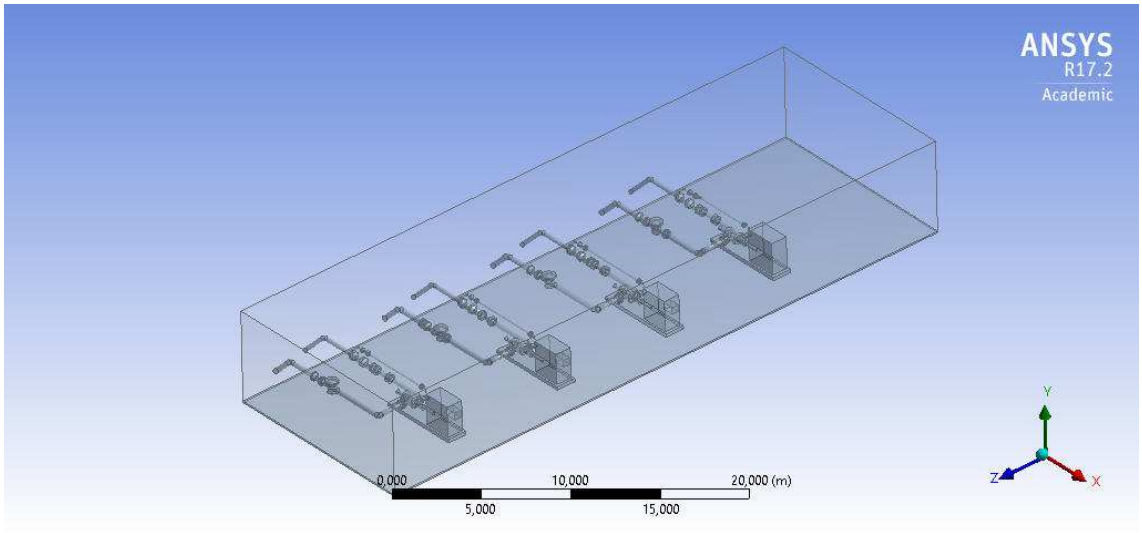


Figura 1: Configuração do sistema importado de figura pré existente com inclusão de volume de controle (Fonte: elaboração própria).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram pesquisados artigos referentes à dispersão de gases ou vapores por meio de CFD, muitos com o intuito de mostrar como estes softwares podem ser utilizados como ferramenta de análise e redução de risco de grandes acidentes.

A possibilidade de prever consequências de uma explosão pode gerar projetos mais seguros, mas ressalta-se a importância do uso de modelos e de infraestrutura de CFD adequados, mencionando também a importância das condições iniciais para avaliar o pior cenário a ser modelado e a sofisticação do uso de CFD aliado a diferentes tipos de modelagem de geometrias e malhas (CANT, DAWES, & SAVILL, 2004).

Alguns autores como Konishi (2005) e Atkinson e Coldrick (2012) utilizaram CFD para estudar e reproduzir dispersões de vapores de combustível que levaram a acidentes e estes exemplos são descritos a seguir.

Um dos acidentes relatados foi uma explosão de um barco devido a um vazamento de combustível armazenado em um compartimento, que foi transportado para outro compartimento onde ocorreu a explosão. Houve a modelagem em duas dimensões dos compartimentos das câmaras de combustível, de forma a analisar o comportamento da difusão dos vapores com uso de fluidodinâmica computacional e a interferometria holográfica em um modelo em menor escala. Neste estudo também foi realizada uma comparação da explosão do barco em modelagem em três dimensões com CFD e um modelo de em tamanho real para averiguar o mecanismo do acidente, apresentando resultados de correspondência tolerável (KONISHI, 2005).

No acidente ocorrido em Buncefield, Inglaterra, um tanque de combustível transbordou e houve vaporização, mistura com o ar devido ao escoamento em forma de cascata devido a uma borda existente ao redor do teto do tanque, e posteriormente houve a ignição desta nuvem de vapor. Foram realizados experimentos em grande escala com instrumentos utilizando o hexano comercial nas condições da ocorrência do acidente, para analisar como a influência da queda em forma de cascata livre influenciou na magnitude das consequências do acidente, devido ao aumento da evaporação do combustível e formação de mistura na faixa de explosividade, com base em balanço de massa e energia. Com os dados experimentais, foi possível validar o modelo e realizar a modelagem e simulação com CFD, para analisar itens

que não foram possíveis de se verificar prontamente e que demandariam tempo, dentre outros recursos, se a análise fosse experimental. A análise foi feita com cenários de obstáculos posicionados de formas diferentes, para avaliar a altura atingida pela camada de vapor com concentração no Limite Inferior de Explosividade (LIE). Neste estudo, é descrito que o impacto do líquido no solo aumenta a evaporação do inflamável e a contribuição da evaporação por poça foi considerada pequena para o total de vapor gerado. A troca de calor entre o costado do tanque e o líquido tampouco influenciou no aumento da evaporação (ATKINSON & COLDRICK, 2012).

Zhu et al. (2015) detalham as lições aprendidas com a explosão da drenagem pluvial contaminada com petróleo devido a um vazamento do duto da *China Crude oil and Chemical Corporation* (Sinopec), ocorrido em 2013. Foi utilizada a análise das consequências de um modelo de multi-energia, e foi ressaltado o risco do acúmulo de vapores de petróleo acumulados na drenagem, mostrando valores experimentais da faixa de limite de explosividade inferior e superior do petróleo a 10°C e 1 atmosfera (ZHU, QIAN, LIU, HUANG, & YUA, 2015).

Por outro lado, alguns autores utilizaram CFD para estudar o comportamento da dispersão de fluidos para fins preventivos. O comportamento de um vazamento de gases inflamáveis utilizados em sistemas de refrigeração dentro de uma residência foi analisado em uma simulação numérica, onde analisou-se o comportamento do gás sendo injetado em um compartimento, simulando um cômodo da residência. Observou-se que a velocidade do fluxo de gás dependente de sua densidade. Foi demonstrada também a influência da vazão de entrada do gás em seu espalhamento no ambiente, de forma a visualizar o perfil de concentração de gás. (NAGAOSA, 2014).

A alocação de detectores de gases, apresentando uma estratégia de como realizar esta atividade é apresentada por Vazquez-Román et al. (2016), utilizando a análise de dispersão de gás por simulação numérica, em atmosfera estável, velocidade de vento de 2 m/s, considerando 8 direções do vento e liberação de gás durante 4 minutos, de um ponto de entrada de gás no sistema desenhado. Nas conclusões, foi possível prever a necessidade de somente um sensor que atende as 8 direções do vento, a 2 m de altura, para identificar uma concentração de 20% do LIE. Nas considerações sobre a simulação, é citado que vazões mássicas inferiores a 0,1 kg/s tipicamente não atingem tamanhos de nuvens de grande perigo.(VAZQUEZ-ROMÁN, DÍAZ-OVALLE, QUIROZ-PEREZ, & MANNAN, 2016),

A disposição otimizada de detectores em plataforma offshore também foi estudada, analisando a dispersão de um vazamento de gases por simulação numérica, com dados meteorológicos do local, com direções preferenciais e velocidade de vento média para cada direção e resultou em um conjunto de 5 detectores para as diferentes condições mais críticas simuladas para a detecção de uma composição típica de gás natural (FLECK, MEDRONHO & NELE, 2010; BARCELOS, KLEIN & MEDRONHO, 2018). De forma similar, a simulação numérica da dispersão de vazamento de gases inflamáveis foi realizada em planta de hidrotratamento, para avaliação do posicionamento e quantidade de detectores de gás hidrogênio, resultando na recomendação do uso de 6 detectores para 32 cenários simulados (GOMES, MEDRONHO, ALVES, 2012).

Para validação de modelos de dispersão de gás natural liquefeito, foram realizados experimentos em média escala, com coleta de dados em cenários de vazamento do gás liquefeito sobre água e sobre concreto e sua dispersão no ar, visando a análise do alcance do LIE. Com o uso de CFD foram analisados os parâmetros de maior influência da fonte: turbulência, geometria e área da fonte e taxa de evaporação; os parâmetros de dispersão que influenciam na distância da nuvem inflamável são a velocidade do vento, fluxo de calor sensível e obstáculos e como estes parâmetros interferem nos resultados (CORMIER, QI, YUN, ZHANG, & MANNAN, 2009).

O estudo de modelagem CFD de jatos de gás natural de baixa pressão realizado pela Health & Safety Laboratory (2005) apresentou o cálculo do volume vazado, utilizando o *software* Ansys CFX, comparando-o com o cálculo proposto semelhante ao estabelecido no item B.5.2 (ABNT, 2009). O objetivo era comparar o volume hipotético que apresenta uma concentração de 50% do LIE, gerado por um vazamento, calculado pela fórmula estabelecida na norma e por CFD (HEALTH & SAFETY LABORATORY, 2005). A norma estabelece que este cálculo não se relaciona com o dimensionamento da área classificada (ABNT, 2009), mas foram encontrados resultados que diferem de 2 a 3 vezes em ordem de grandeza, para vazamentos dos gases metano, propano, butano e gás natural, em condições de pressão de 500 mbarg, 2,5 barg e 5,0 barg e furos de 0,25 mm^2, 2,50 mm^2 e 5,00 mm^2. Neste estudo, a norma considerava que o volume vazado inferior a 0,1 m^3 gera uma atmosfera explosiva de extensão negligenciável. Posteriormente, este estudo foi

expandido, analisando-se a influência da velocidade do vento e locais com restrição de troca de ar, gerando o Relatório de Pesquisa 630 (HEALTH & SAFETY LABORATORY, 2008).

Benintendi (2010) concluiu, utilizando um modelo de liberação de gás inflamável em forma de jato, que a norma em vigor quando de seu estudo, superestima o valor do vazamento hipotético, hoje utilizado para fins de ventilação. No ano seguinte, publicou estudo similar com abordagem de escoamento laminar, dado que as condições de liberação de inflamável poderiam ter esta característica, e desta forma, ter maior influência sobre o dimensionamento neste regime, em comparação ao regime turbulento. Nas conclusões, Benintendi (2011) descreve um maior tamanho do volume hipotético calculado para o regime laminar de escoamento do gás, sendo, portanto, mais conservativo.

Webber et al. (2011) focaram sua pesquisa em métodos de cálculo do volume hipotético em escoamento turbulento e posteriormente os comparou com simulações numéricas com CFD, utilizando modelos de vazamento de jato de gás com variações de volume do local do vazamento, e inclusão de obstáculos. Em relação ao escoamento, quando a velocidade é baixa em locais de ventilação pobre, deve-se ter atenção diferenciada e ressalta-se que as fórmulas desenvolvidas são uma abordagem válida para vazamentos de gases pressurizados.

Nesta mesma linha de raciocínio, Tommasini (2013) apresentou metodologia, que foi adotada pela norma italiana referente ao tema, CEI 31-35 de 2007-2012, comparando valores calculados por fórmula da norma IEC com resultados de CFD. A relação do valor obtido por cálculo dividido pelo valor obtido por CFD variou entre 2 a aproximadamente 6, reduzindo a diferença entre os valores. O mesmo autor, em 2012, já havia reportado a comparação entre a norma italiana CEI 31-35 de 2007, no qual o modelo teórico de vazamento de gás natural mostrou-se mais conservador que a simulação com CFD e sugere a aplicação de equações simplificadas para a modelagem de emanação de poça de inflamável, constatando que o dimensionamento da nuvem inflamável depende do tamanho da poça e da velocidade do vento (TOMMASINI & PONS, 2012). Tommasini, Pons & Palamara (2014) comparam as normas americanas às normas europeia e italiana quanto ao dimensionamento de área classificada, tendo concluído que as normas americanas NFPA 497 (item 2.1.2) e API 505 (item 2.1.3), para o estudo de caso apresentado,

estão superdimensionadas frente às normas europeias IEC 60079, adotada pela ABNT, e a CEI 31-35.

Em contrapartida, o estudo foi realizado pela empresa HERCO publicado em seu site também utilizou uma ferramenta computacional e comparou os resultados com a norma NFPA. Seus resultados apontam a diferenças do tamanho das nuvens de inflamável em função da pressão, dado que esta norma admite o mesmo dimensionamento para diferentes pressões, como exemplificado, para o hexano, com operação sob pressão de 1 e 35 kgf/cm²; no qual o dimensionamento está adequado para baixa pressão, entretanto, para pressões maiores, a área classificada é subdimensionada, propondo modelagens matemáticas para condições mais críticas, ou seja, alta pressão e temperatura e substâncias que apresentam maior risco. Em contrapartida, para condições mais amenas, o dimensionamento torna-se conservador (PFUETZENREITER, COSTA, & SCHLEGEL, NÃO INFORMADO).

Estas aplicações de modelagem matemática e uso de CFD são questionadas quanto ao uso por profissionais que não possuem a percepção de risco adequada nem a habilitação ou informação necessária para dimensionar as áreas de risco e assim, realizar uma classificação de áreas confiável (RANGEL JR., LUIZ, & FILHO, 2016). A falta de informação para a estimar a taxa de vazamento e realizá-lo incorretamente pode tornar um modelo matemático inapropriado. Rangel Jr. et al. (2016) indicam, por exemplo, em vazamentos de flanges, a adoção de áreas de vazamentos juntas de 0,25 mm², para gaxetas de amianto a área de 2,5 mm² e para maiores vazamentos por gaxetas do tipo CAF de 25mm² num vazamento de metano e em suas simulações, demonstra que as áreas definidas de acordo com os desenhos pré-estabelecidos na norma podem estar subdimensionadas para vazamentos de isopentano e hexano.

Otsuka (2011) considera em seu estudo a fonte de liberação como um vazamento, sendo adotado pequenos vazamentos em flanges com junta em forma de espiral, com vedação de fibras de asbesto comprimidas e grandes vazamentos, adotando os tamanhos de área que correspondem a um vazamento por uma junta corresponde a uma área de 0,25 mm², e para pequenos vazamentos de gaxetas de fibra de asbesto comprimidas, a área de 2,50 mm², em concordância com os modelos citados por Rangel Jr. et al. (2016), sendo, portanto, os valores considerados adequados para o dimensionamento por cálculo ou modelo matemático, sendo os

mesmos modelos, de Macmillan e de Cox, utilizados nestes dois estudos. Otsuka (2011) concluiu que para determinadas situações e substâncias, a norma está subdimensionada e não é adequado fazer generalizações para grupo de substâncias. Foram comparadas as distâncias tendo uma vazão mássica fixa para metano, etileno, acetileno e hidrogênio para gases e para líquidos inflamáveis, formaldeído, gasolina, benzeno, etanol e diesel

Yan et al. (2014) realizaram um estudo para avaliar o comportamento da difusão do tolueno por meio de simulação numérica transiente em espaço limitado, utilizando uma modelagem simples, de um compartimento com tamanho limitado de 1,5 m de largura, altura e profundidade, com um círculo de entrada de tolueno de 0,2 m. A taxa de evaporação da substância foi obtida através de método experimental com as mesmas dimensões do modelo, analisando a diferença de massa ao decorrer do tempo. Foi obtida a taxa de evaporação de 0,00457 g/min para o tolueno, equivalente a $7{,}62.10^{-8}$ kg/s. Em relação aos resultados da simulação numérica realizada, foi observado que há uma formação de nuvem de vapor sobre a poça, que tende depois a se acumular no nível do solo e nas imediações da poça, por ação da gravidade e o aumento de sua evaporação não é constante, e levou ao entendimento de que o vapor se acumula por camadas.

Fingas (2012) realizou a medição de taxa de evaporação de petróleo do tipo ASBM (*Alberta Sweet Mixed Blend*) também utilizando a perda de massa ao longo do tempo, com a colocação de petróleo sobre Placa de Petri de diâmetro padrão de 139 mm sobre uma balança e, nos casos em que houve variação de área, os tamanhos das placas também variaram entre 16 a 206 cm². Nestes experimentos, foram realizadas análises com diferentes espessuras (quantidade de material) na placa de mesmo tamanho, variação da área alterando-se o tamanho da placa, e variação de velocidade do vento, além de serem testadas outras substâncias puras. Em relação a taxa de evaporação, foi obtida uma correlação forte entre a taxa de evaporação e o volume do material evaporado, sugerindo que não há regulação da camada limite de ar, e também não há mudança na taxa de evaporação em função da velocidade do vento. Em comparação com a evaporação da água, que é regulada pela camada limite do ar, o autor relata que o volume de água e a taxa de evaporação não tem correlação, e a taxa de evaporação aumenta com o aumento da velocidade do vento. Foi obtido o valor de taxa de evaporação deste petróleo de 0,075 g/min e

concluiu-se que fatores como velocidade do vento, turbulência, área e tamanho não têm grande influência.

2.1. Revisão das Normas

A norma utilizada como referência a ser seguida para dimensionar as áreas classificadas encontra-se no conjunto de normas ABNT NBR IEC 60079. No entanto, algumas seguradoras utilizam a referência americana, NFPA 497 e também pode ser seguida a norma API 505, da *American Petroleum Institute*, dado que o produto em estudo é o petróleo.

2.1.1. ABNT NBR IEC 60079 – 10- 1:2009

Esta norma faz parte de um conjunto de normas ABNT NBR IEC 60079, ou seja, é a referência brasileira existente, que adotou o conteúdo técnico da norma estrangeira *IEC 60079-10-1:2008*.

A definição de área classificada é “área na qual uma atmosfera explosiva de gás está presente ou é esperada para estar presente em quantidades tais que requeiram precauções especiais para a construção, instalação e utilização de equipamentos”, sendo essa área dividida em zonas definidas de acordo com a frequência de ocorrência e duração de uma atmosfera explosiva (ABNT, 2009).

A norma considera o dimensionamento em operação normal, dentro de seus parâmetros de projeto, incluindo partida e parada e pequenos vazamentos que podem fazer parte da operação normal. Excluem-se as falhas como rupturas, que geram paradas ou reparos urgentes e falhas catastróficas.

Devem ser identificadas as fontes de risco em função de potencial liberação do produto inflamável para a atmosfera. O grau de risco da liberação de vapores inflamáveis pode ser classificado em grau contínuo, primário ou secundário, em função da probabilidade de ocorrência e duração da liberação.

Para análise da taxa de liberação do vapor, levam-se em consideração: geometria da fonte de risco, velocidade de liberação, concentração, volatilidade e temperatura do líquido inflamável.

Além do vazamento do líquido inflamável, para possibilitar a adequada delimitação da atmosfera explosiva, devem ser consideradas também as condições climáticas e topográficas para dimensionar a área classificada, que influenciam na dispersão da atmosfera explosiva. Em termos de topografia, deve-se atentar à presença de depressões e equipamentos que podem bloquear a ação do vento, principalmente em ambientes externos e a velocidade mínima deve ser acima de 2 a 3 m/s para uma dispersão segura da atmosfera inflamável. Para o cálculo de ventilação necessária para dispersão, isto é, taxa em que o ambiente externo dilui a atmosfera explosiva, de forma conservativa, a norma sugere a adoção da velocidade de 0,5 m/s. Ainda para a ventilação, são definidos: tipo de ventilação, se natural ou artificial; grau e disponibilidade da ventilação.

2.1.2. National Fire Protection Association 497

A norma norte-americana da *National Fire Protection Association*, NFPA 497, indica a prática recomendada para a classificação de áreas para instalações elétricas em áreas de processos químicos, por meio de diagramas pré-estabelecidos. Para plantas onde há manuseio, refino e armazenamento de petróleo e derivados a NFPA 497 menciona a norma ANSI/API RP 505, *Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2.* (NFPA 497, 2012) que pode ser mais restrita devido ao manuseio em larga escala, em comparação com instalações que lidam com menores quantidades.

Em sua dissertação, Cruz (2012) sugere o uso desta norma em detrimento ao uso da norma API RP 505, descrita no item c), pois com a aplicação da NFPA 497 houve redução de 20% da área classificada, corroborando com o descrito anteriormente, no qual a API RP 505 pode apresentar-se mais restrita a algumas considerações e abranger um volume maior para uma mesma ocorrência.

A norma descreve 4 passos para realizar o dimensionamento de área classificada.

O primeiro passo consiste em verificar a necessidade do dimensionamento: se há manuseio, armazenamento ou uso de substância inflamável.

O segundo passo é verificar as informações da planta ou da área quanto a histórico de vazamentos, frequência, rotinas operacionais, fluxograma de processo com os parâmetros de operação e propriedades da substância inflamável.

O terceiro passo descreve a necessidade de selecionar os diagramas de classificação de acordo com as considerações de processo.

Por fim, o quarto passo, consiste em verificar se há extensão da área classificada verificando as condições anormais de operação e outras considerações do local avaliado, como topografia e ventilação.

2.1.3. American Petroleum Institute Recommended Practice 505

Esta prática recomendada norte-americana API 505 é uma referência para instalações que atuam com gás natural e petróleo, com o mesmo propósito, inclusive referenciando as normas citadas anteriormente para adequação das instalações elétricas permanentes ou temporárias, em áreas nas quais inflamáveis são produzidos, processados, armazenados e manuseados (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013). Esta referência também utiliza como base as normas da NFPA e a norma da IEC com algumas alterações e considerações focadas nas atividades específicas relacionadas ao petróleo e com exemplos destas estruturas, tais como plataformas, unidades de perfuração, unidades de refino etc. Além desta especificidade, há também a definição de líquidos altamente voláteis, cujas pressões de vapor excedem 276 kPa a 37,8 °C: como etano, eteno, propano, propeno, butano, gás natural liquefeito e misturas destes e requerem um tratamento conservador, devido ao elevado risco quando há liberação destes, próximo ao nível do solo. Os fatores que influenciam na extensão da zona contendo inflamáveis depende da taxa de liberação da substância – geometria, velocidade, concentração, volatilidade e temperatura; do LIE, ventilação do local, condições climáticas e topografia.

Nos Apêndices D e E da API 505, também são apresentadas outras metodologias para análise de volume vazado que podem ser aplicados, porém, expostos de como informativos e não mandatórios ou recomendados.

Tanto a norma ABNT quanto a API mencionam a possibilidade de simulação numérica com CFD, entretanto, não explicitam metodologia ou considerações,

somente a necessidade de conhecimento e bom julgamento de engenharia para esta aplicação.

3. METODOLOGIA

Este estudo aplicará as normas mencionadas para dimensionar a área classificada de dado parque de bombas e aplicação de simulação numérica com o uso de CFD. Serão analisadas as distâncias preconizadas nas normas, primeiramente comparando-as entre si e posteriormente comparando a norma ABNT com o volume da nuvem delimitada por seu Limite Inferior de Explosividade (LIE) obtida utilizando o *software* CFX. Essas distâncias, no sistema tridimensional, formam uma “nuvem” cujo volume será comparado ao volume resultante da aplicação das normas. Dentro desta nuvem, se faz necessária a instalação de equipamentos elétricos certificados especificados em função desta área classificada, dentre outros cuidados adicionais relativos às atividades que possuam algum tipo de fonte de ignição.

3.1. Descrição da área em estudo

A área em estudo é um parque de bombas de uma estação intermediária de bombeamento (Figura 2), no qual há 4 bombas centrífugas principais, que operam para enviar petróleo para a refinaria. O petróleo, transportado por navios, é recebido em terminal aquaviário, onde é armazenado e é feita uma mistura entre os petróleos recebidos, entre leve e pesado, conforme logística de recebimento e demanda da refinaria. Esta mistura de petróleo é bombeada até a unidade em estudo, por um parque de bombas no terminal aquaviário de mesma configuração e mesmos equipamentos que esta estação, e da estação é bombeado para a refinaria.

Figura 2: Parque de bombas (foto tirada em 9 de agosto de 2018).

Segundo o manual de operações do oleoduto, que inclui a estação de bombeamento, a pressão na sucção das bombas é aproximadamente 8 kgf/cm² e a descarga é de aproximadamente 50 kgf/cm². Cada sistema de moto-bombas possui, em sua linha de sucção, um filtro para retenção de impurezas e uma válvula controladora. À jusante da bomba, há válvulas de controle de vazão e retenção, além da conexão das linhas de recirculação, além de todo um sistema de instrumentação.

A Figura 1 ilustrou a posição destes elementos no conjunto motobomba e a Figura 3, a seguir, detalha o desenho utilizado para analisar o parque de bombas, cujo modelo foi simplificado e foi utilizado para as simulações de CFD:

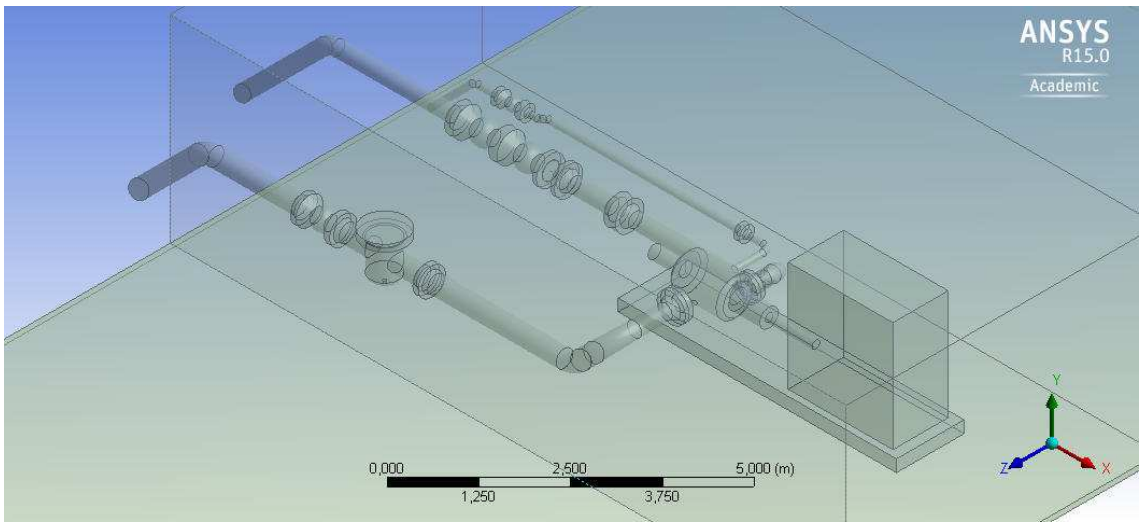


Figura 3: Detalhe de um conjunto motobomba.

3.2. Características do produto

O produto bombeado para a refinaria é uma mistura de petróleo, feita em um terminal aquaviário, no qual realiza-se o recebimento e transferência para a refinaria. O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos que, nas condições normais de temperatura e pressão e considerando uma mistura de cadeias longas, encontra-se em estado líquido (BRASIL, ARAÚJO, & SOUSA, 2011).

A caracterização do petróleo é feita pelas seguintes propriedades físicas: densidade, pressão de vapor, ponto de fluidez e viscosidade. Além destas propriedades que auxiliam na qualificação do petróleo, há também as propriedades químicas utilizadas para avaliar o tipo de petróleo: acidez, estabilidade, presença de contaminantes (THOMAS, ET AL., 2001). Destas características, destaca-se a pressão de vapor, relacionada à evaporação dos hidrocarbonetos, cuja análise se dá conforme o método ASTM D323, apresentando a pressão resultante do equilíbrio vapor e líquido à 37,8 °C. Segundo Thomas et al. (2001) esta característica reflete em questões relacionadas ao manuseio e estocagem do petróleo, e são apresentados valores para o petróleo RGN (30 kPa), Coral (aproximadamente 51 kPa) e Urucu (aproximadamente 75 kPa).

As análises realizadas ao receber o petróleo por navio e na refinaria são de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e água mais sedimentos (*basic sediments and water* – BSW). A análise do petróleo é feita por campo de extração, portanto, há diversos tipos, com características distintas. Os 10 petróleos mais recebidos nos últimos 2 anos pela refinaria em estudo foram dos campos de Marlim, de diversas plataformas, Roncador e Parque das Baleias. As características destes petróleos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Origem do petróleo e características (Fonte: Banco de Dados de Avaliações de Petróleo).

Origem do Petróleo	°API	Densidade	Pressão de vapor (kPa)	Fulgor (°C)
Marlim Sul P56	17,6	0,9450	11,8	---
Roncador P52	28,0	0,8836	32,0	-17,5
Marlim Leste P53	23,4	0,9095	---	---
Marlim Sul P40	23,1	0,9117	28,5	---
Marlim Sul P51	23,4	0,9131	23,4	-7,5
Parque das Baleias P58	28,5	0,8804	---	---
Marlim P47	19,4	0,9340	4,3	---
Marlim P32	19,4	0,9340	4,3	---
Marlim P33	19,9	0,9310	16,6	---
Marlim Leste Niterói	28,3	0,8815	---	---

3.3. Considerações sobre o sistema

Segundo Kletz (2013), as emissões fugitivas contribuem para a presença contínua de uma concentração de dada substância no ambiente. Estas emissões são provenientes de pequenos vazamentos em flanges, gaxetas de vedação de bombas e de válvulas, dentre outras. Para este estudo, os selos de bomba da área representam o maior risco por apresentarem maior índice de vazamento, sendo que este vazamento fica contido em local apropriado, assemelhando-se a uma poça.

Já os flanges considerados neste estudo, apresentam um tipo de vazamento semelhante a um gotejamento sem que o produto atinja o piso, a canaleta ou a contenção – tipo merejamento ou marejamento. O vazamento que gera a classificação de área será referido como “emanação de vapor” e ocorre conforme Figura 4.

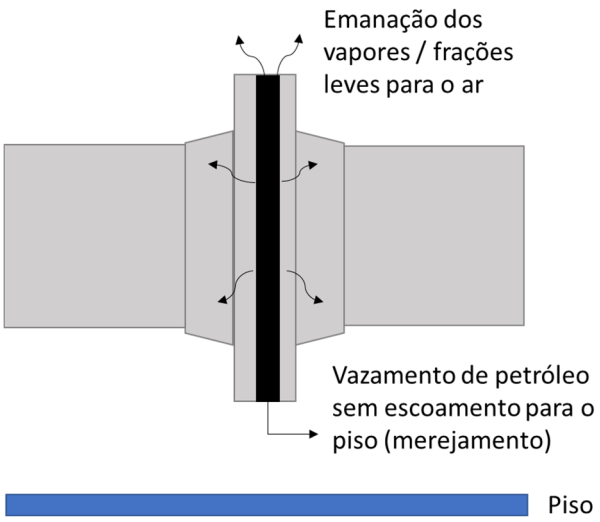


Figura 4: Figura ilustrativa do tipo de vazamento em flange e a emanação de vapores para a atmosfera (Fonte: elaboração própria)

Falhas em bombas podem ser provenientes de grande número de fatores e são consideradas normais pela ABNT NBR IEC 60079. Falhas no selo mecânico podem ter como causa instalação ou reparo incorreto ou falhas de fabricação (KLETZ, 2013). Ainda em relação a vazamentos, Kletz (2013) aponta que em análise em plataforma marítima de petróleo, os vazamentos em selos representaram 8 % do total de vazamentos e, em tubos e acessórios, representaram 73 %.

No sistema em estudo, as solicitações de manutenção corretiva relativas a vazamentos ou falhas de equipamento passaram a ser registradas no sistema em operação a partir de 2005. Na Tabela 2 a seguir, foram compilados os dados das manutenções nas bombas da estação intermediária e do terminal aquaviário, que possuem os mesmos equipamentos, e foi estimado o tempo médio da abertura dos equipamentos, ou seja, tempo de emissão de vapores devido à abertura para manutenção. Foi considerada a parada de 8 horas, no período de 01/06/2005 a 01/01/2017.

Tabela 2: Manutenção corretiva (elaboração própria).

Equipamento	Terminal aquaviário		Estação intermediária		Média do tempo parado por ano consideran do as duas unidades
	Número de manutenções corretivas	Tempo de abertura do equipamento (h/ano)	Número de manutenções corretivas	Tempo de abertura do equipamento (h/ano)	
Bomba A	6	4,14	5	3,45	3,79
Bomba B	13	8,97	5	3,45	6,21
Bomba C	16	11,04	4	2,76	6,90
Bomba D	7	4,83	5	3,45	4,14

Dada à complexidade das características e composição do petróleo, a parte evaporada que gera atmosfera explosiva será uma mistura de gás propano e butano, utilizando quando necessário as características do GLP, que representa uma faixa de aproximadamente 8,5% dos derivados do petróleo produzido pelas refinarias (Mariano, 2005) As frações mais leves compostas por metano e etano (C1 e C2 respectivamente) são mais leves que o ar e se dispersam mais rapidamente que as frações de gases e vapores mais pesados em áreas abertas. Por isso, C1 e C2 são considerados um risco menos significativo para a unidade. Adicionalmente, durante o processo de explotação, é realizada a separação de parte das frações mais leves no processo de desgaseificação.

Portanto, será considerada para a emanação das frações referente a uma proporção de aproximada de 43‰m de propano (C3) e 57‰m de butano (C4), adotando a proporção volumétrica aproximada de 50% de cada componente, pois, de acordo com a ANP (Resolução ANP nº 18/2004) o GLP tem proporção variada, mas sua massa específica líquida não deve ser superior a 550 kg/m³ a 10°C. Este dado é específico para a comercialização em cidades cuja temperatura no inverno é inferior a 10 °C, sendo esta especificação referenciada em legislação brasileira. A Tabela 3 mostra a produção de GLP em algumas refinarias brasileiras.

Tabela 3: Produção de GLP em algumas refinarias (Fonte: adaptado de (Mariano, 2005)).

Refinaria	Porcentagem de produção de GLP
REFAP	5,8%
RECAP	13,6%
REGAP	11,0%
RLAM	8,2%
REVAP	11,5%
REPLAN	7,0%
REPAR	8,0%
REMAN	6,0%
RPBC	8,0%
REDUC	5,8%
Média	8,5%

3.4. Aplicação das Normas

De uma forma geral, as normas iniciam com a identificação de perigos, ou seja, as fontes de risco. Para este estudo, as fontes são os vazamentos onde o volume de petróleo vazado não atinge o solo, ficando ao redor do ponto de vazamento de flanges e selo de bomba, cuja condição não interrompa a operação.

Conforme registros em sistema eletrônico, no sistema em estudo, houve 19 solicitações de manutenção das quatro bombas, no período entre 2005 a 2017, para tratamento de vazamento que fica retido no conjunto de proteção do eixo rotativo, no qual há um escoamento de líquido que forma uma poça em sua base. No entanto, não há um vazamento do tipo jato e/ou com formação de névoa, mas sim, liberação de vapores por efeitos de evaporação e dispersão na atmosfera, tanto no selo da bomba quanto nos flanges de alta pressão.

Portanto, para classificação da fonte será considerada a probabilidade de vazamento de produto, isto é, perda de sua contenção primária, sendo que nestas ocorrências, identificadas por inspeções visuais, uma nota de manutenção é aberta para correção. Tanto os flanges como os selos de bomba são fontes de risco de grau secundário com: *"liberação que não é esperada para ocorrer em operação normal e, se ocorrer, é somente de forma pouco frequente e por curtos períodos"*; assim como

descrito em seu Anexo 1, item A.1.3 (ABNT, 2009). Por conseguinte, a zona ao redor destes pontos será considerada zona 2. Quanto à NFPA 497, devido ao tipo de fonte, observa-se que há a mesma classificação. Logo, em ambas normas estes tipos de equipamentos geram zona 2. Da mesma forma, em ambas as normas, a presença de canaletas onde o vapor pesado possa se depositar, são consideradas zona 1, mas na representação gráfica deste estudo, não foram demarcadas.

3.4.1. Aplicação da ABNT NBR IEC 60079 – 10- 1:2009

A Figura 5 mostra o fluxograma da referida norma aplicado ao parque de bombas.

O fluxograma leva a classificação de zona 2, independente do grau de disponibilidade de ventilação, como mostrado na Figura 6.

Para análise e registro de considerações sobre o material inflamável, utilizou-se a Tabela 4.

Para a análise do Parque de Bombas, como todas as bombas possuem a mesma configuração, à montante com um filtro e válvula de bloqueio e à jusante, uma válvula controladora de pressão e uma válvula de bloqueio, sendo a bomba do tipo centrífuga, com selo mecânico, a Tabela 5 a seguir foi elaborada somente para um conjunto motobomba, que, em planta, utiliza a mesma para todos os conjuntos, e de forma simplificada, pois existe a instrumentação, que também é flangeada, e linhas de recirculação do sistema, no entanto, são menores comparando com os demais acessórios e não foram ilustradas no sistema.

As Tabelas apresentadas a seguir, foram preenchidas para este estudo e atendem a sugestão da norma ABNT, nas páginas 51 e 55 respectivamente:

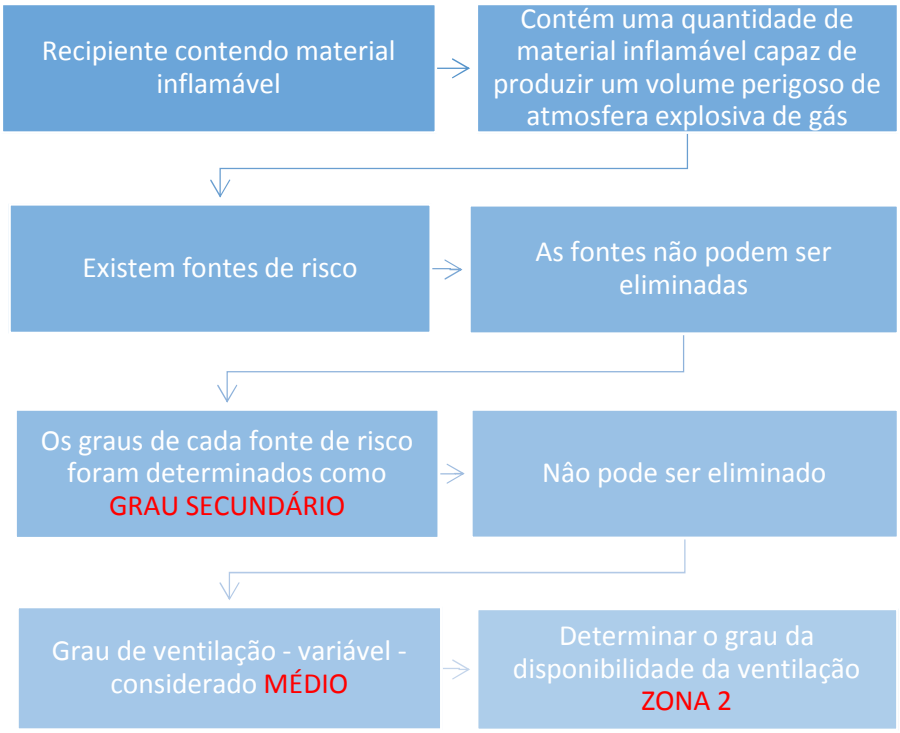


Figura 5: Fluxograma para classificação de área (fonte: adaptação de ABNT NBR IEC 60079-10 (2009)).

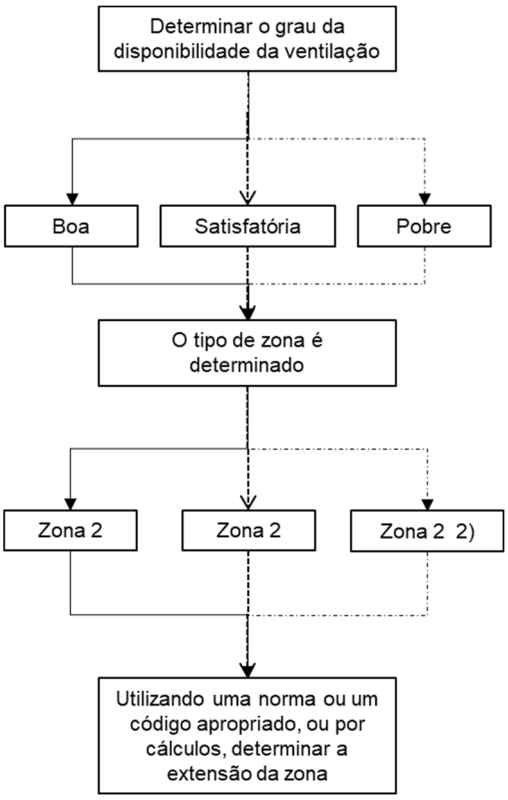


Figura 6: Parte fluxograma adaptado da página 60 da ABNT NBR IEC 60079-10 (2009).

Tabela 4: Tabela para análise dos materiais inflamáveis (fonte: adaptação de ABNT NBR IEC 60079-10 (2009).

Área: Parque de bombas														Planta:
	Material Inflamável			LIE		Volatilidade								
N°	Nome	Composição	Ponto de Fulgor °C *	kg/m³	Vol%	Pressão de vapor a 20°C kPa *	Ponto de Fusão °C	Ponto de Ebulição °C	Índice politrópico de expansão adiabática	Densidade relativa (gás/ar)	Temperatura de Ignição °C	Grupo	Classe de Temperatura	Qualquer outra informação relevante
1	Petróleo API 28 *	Mistura de HC	-17,5	-	-	32,0	-	36-71	-	-	-	IIA	-	Dens. Rel. estado líquido 0,8836
2	Petróleo API 23,4*	Mistura de HC	-7,5	-	-	23,4	-	36-71	-	-	-	IIA	-	Dens. Rel. estado líquido 0,9131
3	CETESB	Mistura de HC	-6,7 - 32	ND	ND	0,3+	-	32 - >400	-	-	-	IIA	-	Dens. Rel. estado líquido 0,7-0,98
4	CENOVUS (*sour*)	Mistura de HC	<-40	-	0,8	0,1-1858,5+	<-40	38-500+	-	2.5 - 5.0	260	IIA	T3	Dens. Rel. estado líquido 0.7-0.95
5	JPMORGAN (*sweet or sour*)	Mistura de HC	< 38	-	1.1	4,13 – 68,9 +	-	-17-538	-	>1	310	IIA	T2	Dens. Rel. estado líquido 0.7 - 1.03

a Normalmente, o valor da pressão de vapor é dado, porém, em sua ausência, o ponto de ebulição pode ser utilizado (5.4.1d). – *"5.5.3 Most petroleum products are placed in Group IIA. However, ethylene production, catalytic reforming, ammonia synthesis, and other processes may involve other groups, particularly Group IIB."* (American Petroleum Institute, 2013)

*Dados obtidos por consulta à equipe da refinaria e do site: http://sites.petrobras.com.br/minisite/reach/downloads/fichas-tecnicas/Ingles/PEL/Petroleum.pdf

** http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=PETR%D3LEO

*** https://www.cenovus.com/contractor/docs/CrudeSour.pdf

***** http://www.jpmorgan.co.jp/jpmpdf/1320691764265.pdf

Tabela 5: Tabela para definição do tipo de zona e extensão (fonte: adaptação de ABNT NBR IEC 60079-10 (2009).

Área: Parque de bombas de petróleo																Planta:
N°	Fonte de Risco		Material Inflamável					Ventilação			Área Classificada					Qualquer outra informação relevante
	Descrição	Localização	Grau de Liberação[a]	Referência[b]	Temperatura e Pressão de Operação		Estado[c]	Tipo[d]	Grau[e]	Disponibilidade	Tipo de Zona 0-1-2	Extensão da zona (m)		Referência		
					°C	kPa						Vertical	Horizontal			
1	Válvula de bloqueio da sucção	Ver figura	S	1	20	784,5	L	N	-	-	2	1	1	Exemplo 4		-
2	Filtro	Ver figura	S	1	20	784,5	L	N	-	-	2	1	1	Exemplo 4		-
3	Selo da bomba	Ver figura	S	1	20	4903,3	L	N	-	-	2	1	3	Exemplo 1		-
4	Válvula de controle de vazão	Ver figura	S	1	20	4903,3	L	N	-	-	2	1	1	Exemplo 4		-
	Válvula de bloqueio de descarga	Ver figura	S	1	20	4903,3	L	N	-	-	2	1	1	Exemplo 4		-

[a] C – Contínuo; P – Primário; S – Secundário.
[b] Indicar o número do item da Lista de características dos materiais inflamáveis apresentada na Parte I.
[c] G – Gás; L – Líquido; GL – Gás liquefeito; S – Sólido.
[d] N – Natural; A – Artificial.
[e] Ver ABNT NBR IEC 60079-10-1 – Anexo B.
PMO – entrada: 20kgf/cm² e saída 70kgf/cm² - 1961,3 e 6864,6 kPa
Velocidade dos ventos – não há informações disponíveis para a localidade

Conforme a Tabela 6 adaptada da norma ABNT, quanto ao grau de ventilação, por se tratar de local aberto, a zona só se alterará para o caso de grau de ventilação baixo, o que não ocorre em áreas abertas, segundo determinado pela própria norma:

"*A taxa de dispersão de gás ou vapor na atmosfera aumenta com a velocidade do vento, mas existe uma velocidade mínima de 2 m/s a 3 m/s, requerida para iniciar uma difusão turbulenta; abaixo disto, ocorre a acumulação do gás ou vapor e a distância para uma dispersão segura é aumentada consideravelmente... uma velocidade do vento de 0,5 m/s é considerada como sendo apropriada para determinar a taxa em que a ventilação em um ambiente externo dilui uma liberação inflamável. Este valor inferior de velocidade do vento é apropriado para este propósito, de forma a manter uma abordagem conservativa." (ITEM 5.4.5, alínea A e Nota 1 páginas 10 e 11)*

Tabela 6: Caracterização da zona para grau da fonte de risco e ventilação adaptada da norma (fonte: ABNT (2009)).

Grau de risco da fonte	Grau de Ventilação			
	Alto		Médio	Baixo
	Disponibilidade de Ventilação			
	Boa / Satisfatória	Pobre	Boa/ Satisfatória / Pobre	Boa/ Satisfatória / Pobre
Secundário	Zona 2 – zona teórica que em condições normais tem extensão desprezível	Zona 2	Zona 2	Zona 1 ou Zona 0 se considerada emissão contínua e local não ventilado

No entanto, para a aplicação desta norma, por tratar-se de área aberta, sem equipamentos ou obstáculos maiores que os próprios equipamentos que restrinjam a passagem dos ventos, o grau de ventilação pode ser considerado alto ou mesmo médio e a disponibilidade de ventos boa ou satisfatória. Como, por análise subjetiva, não é possível desprezar a extensão da área classificada indicada que em condições normais, com grau de risco da fonte secundário e grau de ventilação boa ou satisfatória, possui extensão desprezível, conforme Tabela 6, será considerada a classificação de zona 2. Os exemplos utilizados são os exemplos 1 e 4, citados na Tabela 5, ilustrados na Figura 7 e Figura 8, respectivamente:

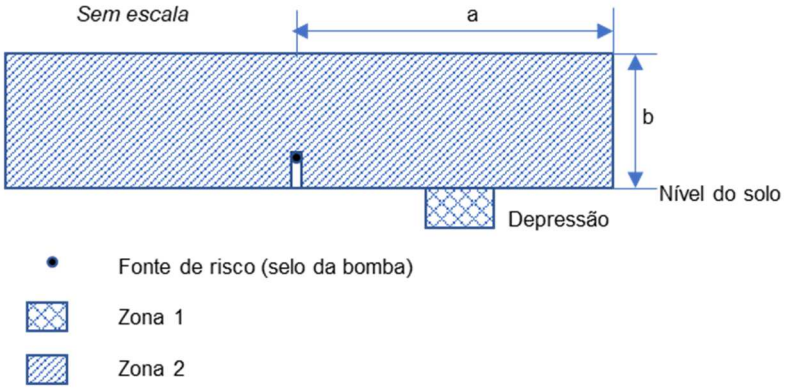
Exemplo n°1 – bomba industrial normal com selo mecânico (diafragma), montada ao nível do solo, em ambiente externo, bombeando líquido inflamável:

Principais fatores que influenciam o tipo e a extensão das zonas
Planta e processo

Ventilação	Geral	Depressão
Tipo	Natural	Natural
Grau	Médio	Baixo
Disponibilidade	Boa	Boa

Fonte de risco	Grau de risco
Selo mecânico da bomba	Secundário

Produto	
Ponto de Fulgor	Abaixo da temperatura ambiente e de processo
Densidade do vapor	Mais pesado que o ar



Levando-se em consideração os parâmetros relevantes, os dados indicados a seguir são valores típicos que seriam estimados para uma bomba com capacidade de 50m³/h operando a baixa pressão:

a = 3m horizontalmente

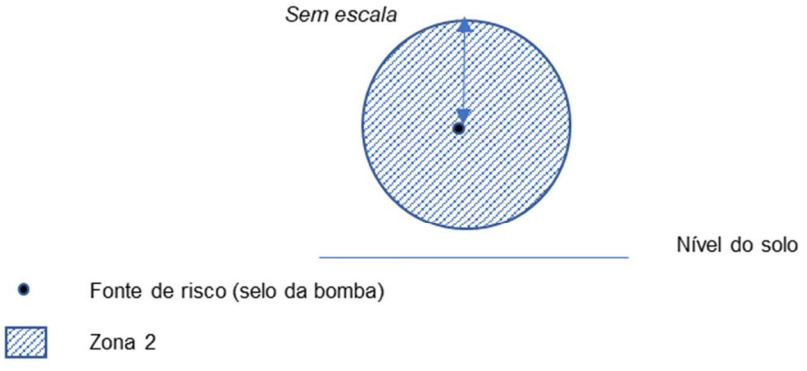
b = 1m a partir do nível do solo e até 1m acima da fonte de risco

Figura 7: Exemplo 1 adaptado da norma (ABNT, 2009).

Exemplo n°4 – Válvula de controle, instalada num sistema de tubulação fechado transportando gás inflamável inflamável:

Principais fatores que influenciam o tipo e a extensão das zonas
Planta e processo

Ventilação	
Tipo	Natural
Grau	Médio
Disponibilidade	Boa
Fonte de risco	Grau de risco
Selo do eixo da válvula...	Secundário
Produto	
Gás.....	Propano
Densidade do gás	Mais pesado que o ar



Levando-se em consideração os parâmetros relevantes, os dados indicados a seguir são valores típicos que seriam estimados para este exemplo:

a = 1m em todas as direções

Figura 8: Exemplo 4 adaptado da norma (ABNT, 2009).

No item 4.1 será apresentado o resultado das aplicações das normas.

3.4.2. Aplicação da Norma NFPA 497

No item 2.1.2 foram descritos brevemente os passos para aplicação da norma NFPA 497. De forma aplicada, tem-se como resultado a caracterização a seguir.

O primeiro passo consiste em verificar a necessidade de classificação de área: como trata-se de um parque para bombeamento de petróleo, existe esta necessidade.

O segundo passo lista uma série de perguntas, cujas respostas para os questionamentos sobre manutenção da área são expostas a seguir.

Em relação a ocorrência de vazamentos, já ocorreram vazamentos de petróleo no sistema em estudo, existindo os registros de necessidade de manutenção. A frequência de vazamentos é baixa, entretanto, a NFPA não estabelece um critério objetivo, sendo este item subjetivo.

Os vazamentos ocorrem em situações anormais, e não em situações normais exceto pelo vazamento pelo selo da bomba, pois é aceitável que a bomba opere com um pequeno vazamento contido até que seja possível a parada para manutenção.

Os equipamentos encontram-se em boas condições, entretanto, a instalação pode ser considerada antiga, instalada por volta de 1976 e sem alterações significativas nos equipamentos.

A manutenção da área pode resultar em formação de atmosfera inflamável devido à abertura dos equipamentos que contém petróleo além da rotina de drenagem de linhas, trocas de filtros, abertura de equipamentos entre outros, que também resultam em formação de atmosfera inflamável.

Há fluxogramas de processos nos quais são indicadas a pressão e temperatura de operação, taxas de vazão. O Plano Diretor da unidade mostra a localização dos equipamentos e as instalações que podem interferir na dispersão dos vapores e gases. A informação da direção do vento prevalecente não está no mapa e a unidade não possui esta informação.

As propriedades do petróleo não se encontram na tabela 4.4.2 das páginas 10 a 14 da norma NFPA, na qual se encontra uma lista substâncias químicas combustíveis selecionadas. Novamente, utiliza-se a prerrogativa da API 505, item 5.5.3 para definição do grupo do petróleo sendo que a maioria dos petróleos se enquadram no grupo IIA.

O terceiro passo consiste em correlacionar as informações anteriores com quantidades, pressões, temperaturas e vazões, temos para os equipamentos, utilizando os critérios da NFP 472 que se referem a características de processo dos equipamentos, mostradas na Tabela 7. A Tabela 8 apresenta a caracterização dos equipamentos quanto à magnitude relativa aos equipamentos e indica também a caracterização a densidade do combustível liberado e a posição da fonte.

Tabela 7: Magnitudes relativas ao equipamento e tubulação do processo com materiais combustíveis (fonte: adaptado de NFPA (2012)).

Equipamento do processo	Unidade	Pequeno (Baixo)	Moderado	Grande (Alto)
Tamanho	gal	<5000	5000-25000	>25000
Pressão	psi	<100	100-500	>500
Vazão	gpm	<100	100-500	>500

Tabela 8: Aplicação da Tabela 7 para este estudo (fonte: elaboração própria).

Equipamento	(1) Tamanho	(2) Pressão	(3) Vazão	(4) Densidade	(5) Posição da fonte	(6) Tipo de processo
Filtro	Pequeno	Máxima operacional: 20kgf/cm² - alto Usual:8kgf/cm²	Máxima operacional: 2.200m³/h alto	Mais pesado que o ar	Acima do piso	Parque de bomba – laterais abertas, coberto com telhado a altura de 5m.
Válvula de bloqueio	Pequeno			Mais pesado que o ar	Acima do piso	
Bomba	Pequeno	Máxima operacional: 50kgf/cm² - alto		Mais pesado que o ar	Acima do piso	
Válvula Controladora	Pequeno			Mais pesado que o ar	Acima do piso	
Válvula de bloqueio	Pequeno			Mais pesado que o ar	Acima do piso	

Nas situações nas quais ocorre a manutenção, a pressão é próxima da pressão atmosférica e não há vazão, os equipamentos são bloqueados para evitar perdas de produto e riscos de acidentes.

Para cada fonte de vazamento, um exemplo da norma foi escolhido, sendo que para eventuais incrementos na extensão da área, foram consideradas as questões do item 5.8.4.2 da NFPA 497:

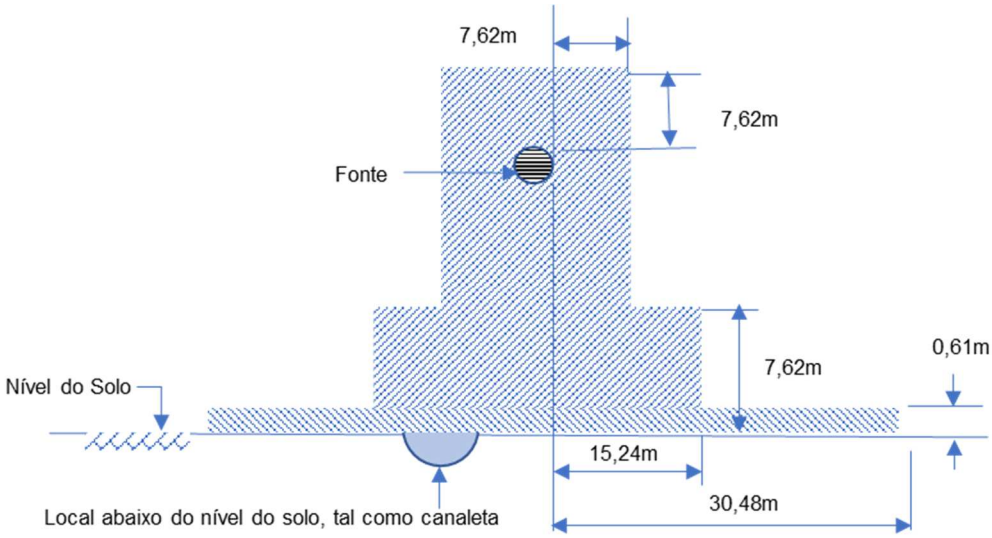
(1) Há possibilidade de ocorrência de atmosfera explosiva devido à abertura dos equipamentos para a manutenção

(2) Os pontos de vazamento existentes foram indicados na planta: são flanges de válvulas e filtro, selo mecânico da bomba. As válvulas de alívio (PSV) estão localizadas fora do parque de bombas

(3) Existem canaletas ao redor de cada sistema motobomba, portanto será levado em consideração a presença de atmosfera explosiva nas canaletas.

(4) A taxa de dispersão da substância não foi calculada. Não há dados de direção dos ventos, no entanto o local possui grandes variações de temperatura e é um local aberto com circulação de ar praticamente livre. A altura da cobertura, de 5m não interfere na análise a ser realizada por meio das figuras propostas.

Por se tratar de área aberta, não há estruturas ou interferências laterais a serem consideradas para facilitar a delimitação da área classificada. As figuras na NFPA que melhor representam os pontos de emanação de vapores para as condições operacionais são mostradas nas Figura 9 e Figura 10:



Material: Líquido inflamável	Pequeno / Baixo	Moderado	Grande / Alto
Tamanho do equipamento do processo			x
Pressão		x	x
Vazão			x

Zona 1

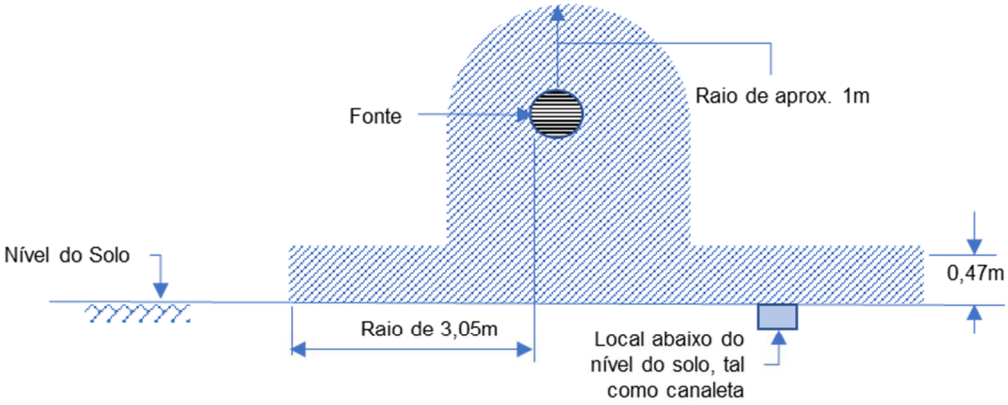
Zona 2

Zona 2 adicional. Utilizar precaução extra quando puder ocorrer grande liberação de produto voláteis

Figura 9: Adaptação da Figura da página 43 da NFPA 497(fonte: NFPA (2012)).

Entretanto, considerando a condição da evaporação de petróleo, que historicamente, apresenta vazamento nas condições para classificação de área somente através de merejamento, faz-se a analogia a uma liberação de vapores de poça, à pressão atmosférica. E outra condição possível de emissão dos vapores, quando da abertura de equipamento, que só ocorre após parada e bloqueio do sistema

de bombeamento, também pode-se considerar a pressão baixa, e a vazão baixa, passando a ser utilizada a seguinte figura:



Material: Líquido inflamável	Pequeno / Baixo	Moderado	Grande / Alto
Tamanho do equipamento do processo	x	x	
Pressão	x	x	
Vazão	x	x	

Zona 1
Zona 2

Figura 10: Adaptação da figura da página 40 da NFPA 497(fonte: NFPA (2012))

Nota-se que os valores são praticamente os mesmos da aplicação da norma ABNT IEC.

3.4.3. Aplicação da Recomendação API 505

Por ter como referência a norma IEC, há poucas considerações a serem feitas quanto a esta recomendação. A aplicação para a determinação da designação da zona é feita como a IEC. A extensão da zona leva em consideração:

(1) Localização

(2) Parâmetros físico-químicos do produto:

- Taxa de liberação do vapor, em função da geometria da fonte, a velocidade de liberação (geometria e pressão), concentração e caso de misturas, volatilidade, temperatura do líquido,
- Limite Inferior de Explosividade – quanto maior, maior a extensão da atmosfera explosiva

- Densidade relativa do vapor- quanto maior, maior poderá ser a extensão horizontal próxima ao nível do solo,
- Ventilação e velocidade do vento – quanto maior, menor a extensão da área classificada. Nos casos de liberação de substâncias a alta velocidade pode ocorrer auto diluição, condição na qual a velocidade dos ventos não influencia na extensão da área, caso contrário, a velocidade do vento contribuirá para a redução da área.
- Outros parâmetros a serem considerados: condições climáticas e topografia.

Os efeitos dos parâmetros que são analisados dependem da fonte de liberação. Neste caso, como foi considerado liberação de vapores similar a poça, influenciarão a temperatura do líquido, a pressão de vapor a esta temperatura e a dimensão da superfície de evaporação.

Quanto à frequência da manutenção do equipamento, a ocorrência de abertura e liberação de vapores pode alterar uma classificação de área. Dado que a leva em consideração somente as manutenções corretivas, somando-se as correções preventivas, obtém-se um resultado, de acordo com a Tabela 9, de Grau de Liberação Primário e conforme Tabela 10, de caracterização como zona 1. No entanto, como será visto a seguir, as figuras que referenciam a situação descrita para o dimensionamento de área, Figura 11 e Figura 12, não consideram este tipo de emissão atmosférica como zona 1, há somente o dimensionamento para a zona 2.

Tabela 9: Adaptação da Tabela 2 da API 505 da relação entre o grau de liberação e a presença de atmosfera inflamável (fonte: API 505 (2013)).

Grau de Liberação	Presença da Mistura Inflamável
Contínuo	1000 ou mais horas/ano
Primário	10 < horas/ano < 1000
Secundário	Menos que 10 horas/ano

Tabela 10: Adaptação da tabela 3 da API 505 da relação entre a classificação de área e a presença de atmosfera inflamável (fonte: API 505 (2013)).

Zona	Presença da Mistura Inflamável
0	1000 ou mais horas/ano (10%)
1	10 < horas/ano < 1000 (0,1% - 10%)
2	Menos que 10 horas/ano (0,01% - 0,1%)
Não classificada	Menos que 1 hora/ano (0,01%)

O Capítulo 9 da API 505 descreve as práticas recomendadas para determinar o grau e extensão de áreas classificadas em refinarias de petróleo, sendo uma análise de uma coletânea de práticas e dados pesquisados em refinarias, portanto, são consideradas recomendações conservativas. Focando no caso do parque de bombas, as figuras que melhor representam os pontos de emanação são as figuras da página 37 desta norma, adaptadas na Figura 11 e Figura 12, a seguir, que indicam as distâncias da fonte: horizontal de15 m, vertical de 7,5 m, e áreas expandidas de Zona 2 adicionais de mais 15 m, ou seja, 30 m da fonte nos casos de grandes liberações de produtos:

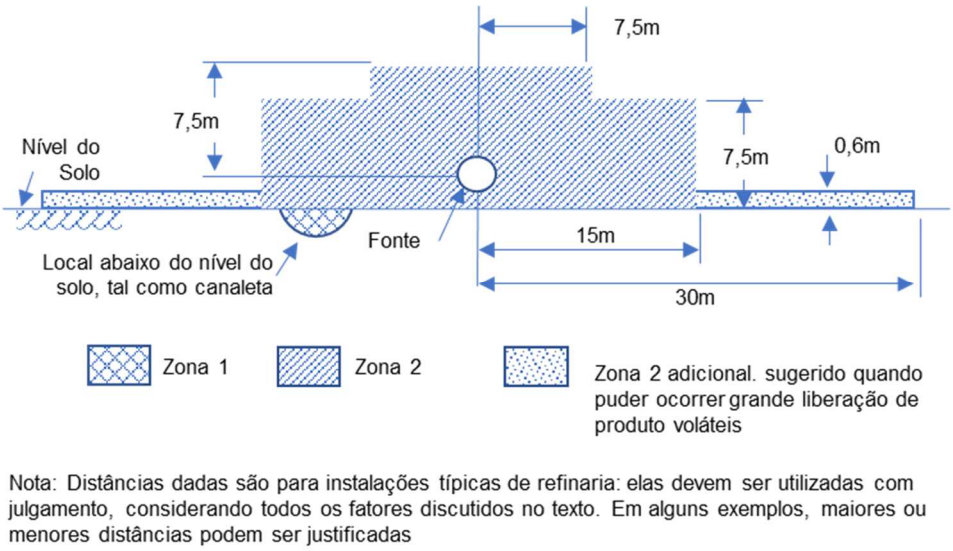


Figura 11: Adaptação da figura 20 da API 505 (fonte: API 505 (2013)).

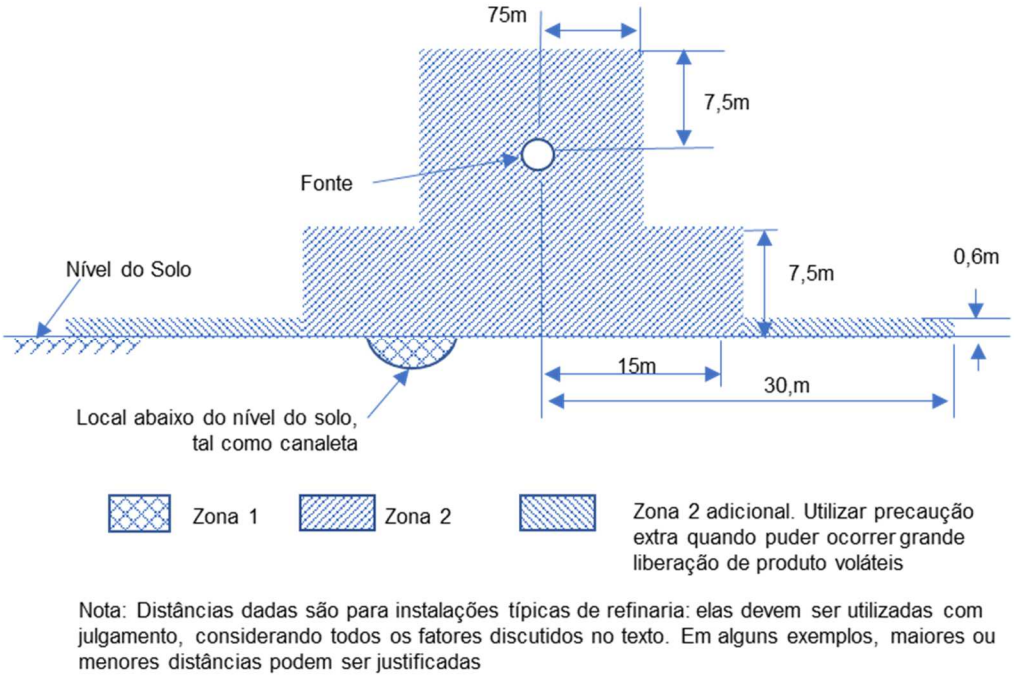


Figura 12: Adaptação da figura 21 da API 505 (fonte: API 505 (2013)).

Nota-se que há semelhança com a representação 5.10.1(h) da NFPA, apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ao considerar a alta pressão de operação do equipamento.

No capítulo 10 da norma API 505, que trata de locais de perfuração e produção *onshore* e *offshore*, nos equipamentos de processamento e armazenamento de petróleo ou gás, a área classificada ao redor da bomba ou compressor, que estão localizados em área aberta, possui a configuração mostrada na Figura 13:

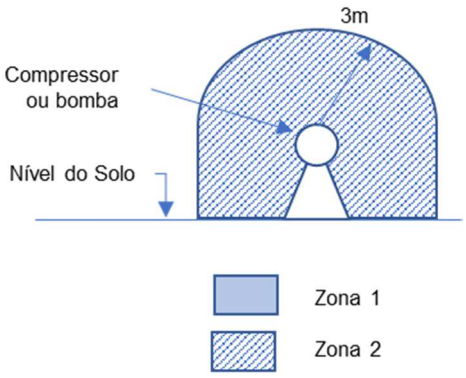


Figura 13: Adaptação da figura de classificação de área para bombas *onshore* e *offshore* (fonte: API 505 (2013)).

Uma forma alternativa de definir a extensão da área classificada é apresentada no Apêndice D da API 505, de modo informativo. O método para dimensionamento de áreas classificadas tem base na volatilidade e na taxa de liberação do produto, utilizando o conceito de raio do perigo com base nestes dois parâmetros, válido para locais abertos sendo, portanto, aplicável a este estudo.

Considerando o petróleo como categoria 2, conforme Tabela 4, analisando para o petróleo JP Morgan com pressão de vapor menor ou igual a 70 kPa (equivalente a 24,7 psia) a temperatura de operação de 20°C, e considerando as duas situações já citadas de merejamento ou abertura de equipamento durante manutenção, há uma baixa velocidade de liberação de produto, inferior a 10 gal/min (0,63 l/s), ou mesmo considerando a taxa de evaporação do petróleo de $1{,}25.10^{-6}$ kg/s (FINGAS, 2012) que é o que efetivamente gera um volume com possibilidade de explosão. Como o petróleo é uma mistura, há dificuldade de determinar a extensão da dispersão e, além disso, os dados normalmente são de substâncias puras e não para misturas. A norma sugere o uso desta metodologia por meio da Figura 14, em função da pressão de vapor, temperatura do fluido e taxa mássica de liberação do produto.

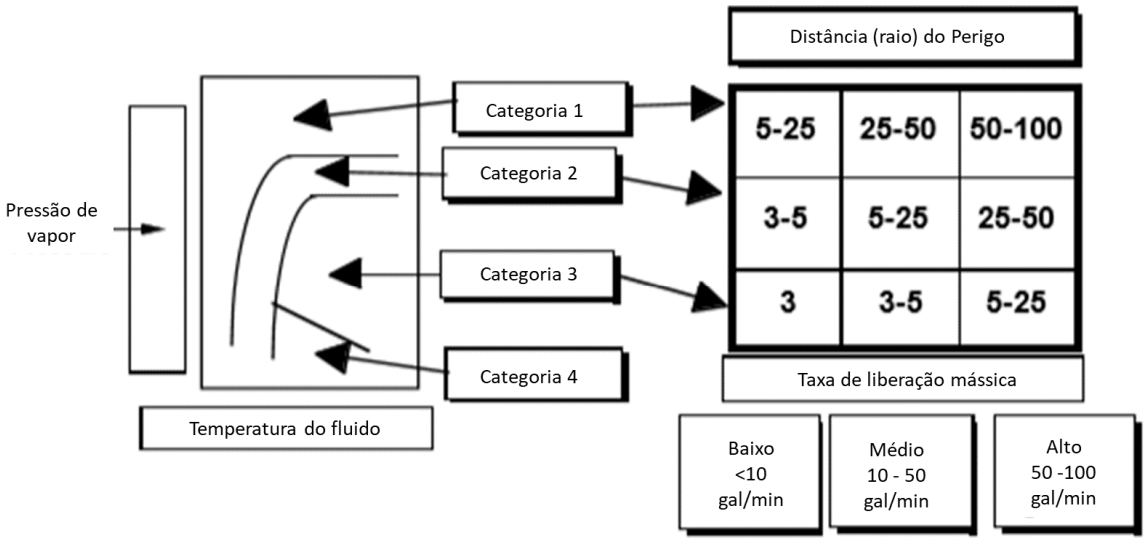


Figura 14: Adaptação da figura D-2 da matriz de taxa de liberação para determinação do raio de perigo da API 505 (fonte: API 505 (2013)).

Aplicando os dados mencionados anteriormente, o raio será de 3 a 5 pés, ou seja, 0,9 a 1,5 m ao redor da fonte. No entanto, caso fosse considerado 5 a 25 pés, a

extensão daria uma margem muito maior para erro, já que esta faixa não tem um critério do uso destes valores.

Quanto à determinação das bombas, como não há vazamento direto de vapores, conforme relatado na unidade, e há o vazamento do selo de bomba, de forma a se acumular como poça, não será considerado o uso desta metodologia. A Tabela D-1 apresenta um raio de 30m para bombas que operam a alta pressão e alta vazão, como é o caso dos equipamentos do parque de bombas.

Para os flanges existentes e válvulas flangeadas, a metodologia define um raio de 3 pés, ou seja, 0,9 m. Como observado nas tabelas de manutenção, a probabilidade de vazamento é baixa nos flanges e válvulas de sucção e maiores na descarga da bomba, podendo ser aplicada a tabela D-4 que define um raio de 10 pés, equivalente a 3 m para estes elementos. Portanto, os valores, de maneira geral coincidem com os valores já verificados neste estudo.

O Apêndice E da API 505 apresenta um procedimento para classificação de área. O procedimento é similar e, em suma, mostra o passo a passo que deve ser seguido para a classificação de área. O procedimento consiste nos seguintes passos:

- Passo 1 – Necessidade de classificação de área em função de:

  - Presença de líquido inflamável, à temperatura acima de seu ponto de fulgor.

- Passo 2 – Tarefa de classificação

  -Avaliar o tipo de zona em função do grau ou continuidade de presença de atmosfera explosiva.

  -Avaliar a frequência de ocorrência de vazamentos, manutenção ou reparos.

  - Avaliar falhas dos processos que podem gerar falhar elétricas e causar ignição, simultaneamente causando liberação de vapor e gerando falha elétrica.

  -Avaliar o local quanto à ventilação

- Passo 3 - Extensão da área

  -Avaliar os itens que tratam sobre extensão da área classificada conforme outros itens especificados anteriormente.

- Passo 4: Determinação do Grupo

  - Este item referencia o item 5.5 da API 505 para determinar o grupo da substância, para referências quanto à proteção ou tipo de segurança adequado ao sistema elétrico.

Este apêndice resume a aplicação para chegar a um resultado de classificação de área. Ressalta-se a importância de manter a documentação da informação, evidenciando as considerações feitas para a classificação da área.

3.5. Aplicação de Fluidodinâmica Computacional – CFD

Cormier et al. (2009) constata que o uso de CFD para análise de consequências de cenários específicos tem aumentado, no entanto, detalhes e a complexidade de cada cenário dificultam a criação de diretrizes ou padrões para este tipo de análise. Devido a esta especificidade, há dificuldade em encontrar estudos até mesmo similares, pois cada estudo tem as suas considerações e sua caracterização para dada situação. Neste trabalho, empregou-se o pacote comercial de CFD da Ansys.

3.5.1. Considerações

Uma análise pode apresentar algumas incertezas, em relação a geometria e a forma de liberação ou ao comportamento das substâncias ou da mistura de substâncias, entre outros fatores. A atribuição de valores conservadores a estas incertezas leva a uma estimativa conservadora, o que conduz a um dimensionamento do risco e de suas consequências superestimado (CROWL & LOUVAR, 2015). Para a realização da modelagem por fluidodinâmica computacional de dispersão de vapores do petróleo, tendo em vista este cuidado de se manter parâmetros mais realistas dentro das possibilidades, foram feitas as seguintes considerações:

- Os principais pontos de emanação de vapores escolhidos foram o selo mecânico da bomba e os flanges das válvulas de retenção e controladora de vazão

nas linhas de descarga, em decorrência da pressão operacional ser superior à linha de sucção e pela frequência a ocorrência de vazamentos no selo da bomba descritos no item 3.1 e 3.3.

- O mecanismo de dispersão de gás foi a difusão, ocasionado por vazamento dos flanges dos equipamentos e selo de bomba, e consequente evaporação das frações leves que compõem o petróleo que vazou, que em condições normais de temperatura e pressão encontram-se em estado gasoso.

- Será considerado como produto evaporado para a atmosfera as frações leves mais densas que o ar que, em condições normais de temperatura e pressão, encontram-se no estado gasoso. Portanto, uma mistura de propano e butano na proporção descrita no item 3.2, será utilizada para a análise da formação de atmosfera explosiva dado seu risco de acumulação e permanência nas proximidades onde são consideradas as emissões. Apesar da composição da evaporação incluir outros gases, alguns mais leves, como o metano e etano, e alguns contaminantes como o gás sulfídrico, considerou-se de maior risco a composição de GLP.

3.5.1.1. Taxa de evaporação do petróleo

A taxa de evaporação de petróleo, ou seja, o quanto de líquido é evaporado para o ar, não segue o mesmo mecanismo da água, que é regulada pela camada limite de ar na interface do líquido. Inicialmente, supôs-se que a evaporação de petróleo se comportasse com os mesmos princípios que a água: quando a camada limite apresenta saturação de vapor, a taxa de evaporação se reduz, indicando a redução da força motriz da transferência de massa (FINGAS, 2012). Conforme experimento, descrito no item 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, o Petróleo ASMB, de densidade 0,839 g/ml, apresenta um comportamento distinto quanto à evaporação, não apresentando influência os fatores: velocidade do vento, turbulência, área e volume, mas sim o tempo da exposição e a temperatura.

A transferência de massa na camada limite não será considerada, será adotada a taxa obtida por Fingas (2012), que determina em seus estudos a taxa de evaporação de 0,075 g/min, equivalente a $1{,}25.10^{-6}$ kg/s

3.5.1.2. Coeficientes de difusão no ar

Para a análise da dispersão da emanação no ar, os termos de difusividade cinemática empregados neste estudo foram pesquisados no artigo de Elliot e Watts (1972), no qual obtiveram experimentalmente os valores de coeficientes de difusão e compararam com o valor calculado por forças intermoleculares, conforme Tabela 11. Para a substância de interesse a este estudo serão adotados os valores experimentais:

Tabela 11: Coeficientes de difusão a 298,2 K (Fonte: (a) (MATSUNAGA, HORI, & NAGASHIMA, 2007) , (b) (BARR & WATTS, 1972) e (c) (ELLIOTT & WATTS, 1972)).

		Coeficientes de Difusão (cm^2/s)	
		Experimental	Calculado
Propano	*(a)*	0,115	0,108
	(b)	0,1144+_0,0015	0,1147
Butano	*(c)*	0,1021+_0,0013	0,0981

3.5.2. Inflamabilidade

Os estudos sobre o acidente ocorrido em Qindao, China, realizados por Zhu et al. (2015), forneceram resultados experimentais sobre a inflamabilidade do petróleo à pressão de 1 atm e 10°C, apresentados na Tabela 12 e em diferentes temperaturas, que resultaram nas faixas descritas na Tabela 13. Os resultados demonstram que o faixa de inflamabilidade aumenta com o aumento da temperatura.

Tabela 12 Adaptação dos Registros de LIE (ou LEL – *Lower Explosion Limit*) e LSE (ou UEL – *Upper Explosion Limit)* experimentais do petróleo (ZHU, QIAN, LIU, HUANG, & YUA, 2015).

EXPERIMENTO Nº	LEL %	UEL%	RESULTADOS
1	2,43	8,83	Explodiu
2	2,12	9,31	Explodiu
3	2,02	9,60	Explodiu
4	1,90	9,73	Explodiu
5	1,80	9,82	Explodiu
6	1,71	9,90	Explodiu
7	1,62	9,92	Explodiu
8	1,51	10,13	Não explodiu
9	1,53	10,14	Não explodiu
10	1,54	10,11	Não explodiu

Tabela 13 Adaptação dos registros de LIE e LSE e concentração limitante do oxigênio experimentais do petróleo a diferentes temperaturas (ZHU, QIAN, LIU, HUANG, & YUA, 2015).

TEMPERATURA INICIAL °C	LEL %	UEL%	CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO LIMITANTE %
10	1,62	9,92	13,15
15	1,57	10,01	13,12
45	1,51	10,12	13,02

Como o vapor será tratado como uma mistura de propano e butano, Bozek & Rowe (2010) sugerem que sejam feitos ajustes para classificação de área quando se trata de misturas, tendo como premissas: o vazamento do líquido não pode ser em forma de spray ou névoa, ou seja, sem conter partículas líquidas e considerando que a mistura continue sendo uma mistura após a emanação no ambiente. Sendo estas premissas coincidentes com o trabalho em questão, a análise da mistura será então realizada. As características indicadas pelos autores e de interesse para a classificação são a densidade, os Limites Inferior e Superior de Explosividade (LIE e LSE), a inflamabilidade da mistura e a temperatura de autoignição.

A densidade dos dois componentes é conhecida, sendo ambos mais densos que o ar, portanto, a densidade da mistura também acompanha esta característica, não sendo necessário o cálculo. O MESG (*maximum experimental safe gaps*) e a temperatura de autoignição são informações importantes para a caracterização no

que tange a definição dos tipos de proteção necessárias para os equipamentos elétricos, e a inflamabilidade da mistura aplica-se em correntes gasosas com baixa concentração de inflamáveis ou deve ser medido em aparelhos adequados no caso de uma corrente líquida, portanto, não serão verificados. O LSE raramente é um valor necessário para a classificação de área, sendo de maior importância a verificação do LIE, por ser a concentração mínima requerida de um inflamável para que haja um *flash* em contato com uma fonte de ignição. (BOZEK & ROWE, 2010)

O ajuste para a mistura, portanto, foi dado pela Equação 1, referente ao cálculo da densidade relativa de mistura (BOZEK & ROWE, 2010):

$$\mathrm{RD_{air}} = \frac{\sum_i^n M_i\, x_i}{28.96} \qquad (1)$$

Onde:

RD_{air} Densidade relativa da mistura comparada ao ar

M_i Peso molar de cada constituinte

X_i fração molar correspondente

Obteve-se o valor de 1,8 para a densidade relativa.

Para o cálculo do limite inferior de inflamabilidade de mistura utilizou-se a equação 2, sendo LFL (*Lower Flammable Limit*) o LIE (BOZEK & ROWE, 2010):

$$\%\mathrm{LFL_{mix}} = \frac{1}{\sum_i (\frac{x_{iflam}}{\%\mathrm{LFL_i}})} \qquad (2)$$

Onde:

$\%LFL_{mix}$ %LIE estimada da mistura ao ar

$\%LFL_i$ %LIE de cada constituinte

X_{iflam} fração molar correspondente em uma base inflamável

Obteve-se um LIE de 1,9%v, valor entre os LIE do propano, de 2,1% e do butano, 1,8%.

Também foram calculadas as concentrações molares referentes ao LIE, uma vez que é uma porcentagem volumétrica, e também foi considerada o valor

equivalente em porcentagem mássica, considerando que a porcentagem volumétrica representa a porcentagem molar dado que o sistema está sob a mesma condição de temperatura e pressão, 25°C e 1 atm. Os valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Limites de inflamabilidade porcentagem mássica, concentração mássica e molar
Fonte: elaboração própria (dados %v de Crowl & Louvar (2015)).

LIE	%V	%M	CONCENTRAÇÃO LIE (kg/m³)
C_3H_8	2,10%	3,19%	0,037
C_4H_{10}	1,80%	3,60%	0,042

3.5.2.1. Escoamento e condições climáticas

Para uma análise conservadora de um incidente de processo, prevendo o cenário mais desfavorável, conforme descrito por Crowl & Louvar (2015) e em caso de ausência de dados do local, a modelagem deve utilizar uma velocidade do vento de 1,5 m/s, para o uso do modelo de Pasquill-Gifford, para modelagens de dispersão de plumas.

Foi analisado também o número de Reynolds. Para a velocidade de vento de 1m/s, cuja dimensão do maior elemento é a bomba, de 70 cm de diâmetro, e considerando a viscosidade de ar 1,8 kg/(m.s) e a densidade do ar 1,225 kg/m³, o número de Reynolds (Re) resulta em um valor de 4.10^4. Segundo Bimbato (2012), quando Reynolds é alto, nesta ordem de grandeza obtida, existe uma turbulência atrás dos corpos cilíndricos em relação ao ponto onde bate o vento. Quando Reynolds é inferior a 1, há predominância de forças viscosas no arrasto e não há turbulência à jusante do corpo cilíndrico, indicando escoamento laminar ao redor da tubulação. A norma IEC 60079 (ABNT, 2009) por sua vez, menciona que a pior condição para o dimensionamento de área classificada é uma condição de ausência de vento.

Pode-se observar que dos artigos pesquisados, todos utilizam na modelagem de dispersão de gases inflamáveis ou vapores o modelo de turbulência k-ε, considerando somente a difusão de vapor de tolueno a 300 K e sem vento (YAN, LIANG, & SHEN, 2014).

Portanto, optou-se em realizar um teste na condição de velocidade 1m/s, por ausência de dados atmosféricos na região próxima, adotando-se o modelo turbulento e outra situação, com a velocidade de vento de 2.10^{-5} m/s, consequentemente, Re inferior a 1, para simular o regime laminar. Outra consideração foi em relação à face

de incidência de vento, na qual optou-se pela direção sul-norte e sentido norte, ou seja, a entrada do vento ocorre pela face que equivale ao sul.

3.5.2.2. Vazamento / Emanação de Vapores

O vazamento, utilizando o conceito da análise de risco para classificação de área, é considerado uma situação emergencial, na qual ocorre a parada imediata do sistema de bombeamento. Uma situação normal ou anormal, que não requeira esta ação ocorre quando se percebe o vazamento de petróleo na forma líquida em selo da bomba, que é uma situação mais comum, e nos flanges, onde o vazamento não escoa e o produto fica ao redor dos pontos de vazamento no equipamento, no qual posteriormente, ocorre sua evaporação.

Observa-se que parte dos flanges do sistema de bombeamento encontra-se a montante da bomba, que estão relacionados a filtro e válvula de controle, que operam em pressão próxima a 8 kgf/cm² ou inferior, cujo vazamento de líquido tem menor probabilidade de ocorrer comparado à pressão à jusante, de 50 kgf/cm², onde há flanges das válvulas de controle e retenção. Também existem os flanges dos sistemas de instrumentação, que não aparecem no modelo simplificado do sistema moto-bomba, mas que foram considerados no entorno do corpo da bomba, juntamente com a área da bomba, aumentando a superfície de entrada do vapor no volume de controle.

Este estudo se diferencia dos demais artigos mencionados por suas considerações quanto ao entendimento de não utilizar um vazamento com alta velocidade e alta turbulência, mas sim, considerando como principal contribuinte, a difusão dos vapores emanados no volume de controle, com baixa velocidade do vento e a evaporação das frações mais leves do petróleo.

3.5.3. A Geometria Estudada

A geometria empregada foi exportada de um desenho já existente, com algumas simplificações em relação ao que é observado em foto. Ainda assim, foi necessário um tratamento utilizando o *Design Modeler*, da Ansys, a fim de criar um volume de controle da atmosfera ao redor do sistema motobomba, além de realizar operações de limpeza e simplificação da geometria.

Em função da pressão na chegada da estação e das falhas ocorridas em que houve um vazamento de produto por flanges, não foi considerada a passagem pelo filtro existente na linha de sucção das bombas. Somente o selo das bombas e os flanges da válvula controladora de vazão na linha de descarga da bomba, que estão sujeitos a pressão maior que na linha de sucção, foram os pontos de vazamento considerados. Nestes pontos, foi considerado que houve a transferência de massa do estado líquido para a atmosfera devido à evaporação, já que, conceitualmente, um acidente com um jato de produto não deve ser considerado como operação normal e consequentemente, não deve ser levado em conta para o dimensionamento da área classificada. Entretanto, para este estudo, não será simulada a transferência de massa do estado líquido para o vapor, sendo considerada uma taxa de evaporação na simulação numérica.

O volume de controle estudado é ilustrado na Figura 15 e as regiões de vazamento: bomba e flanges à jusante da bomba são ilustradas na Figura 16. A área definida para a emanação de vapores, denominada *LEAK*, possui 4,38 m² de superfície e, em relação a ordem de grandeza da evaporação, causa pouca alteração no fluxo mássico.

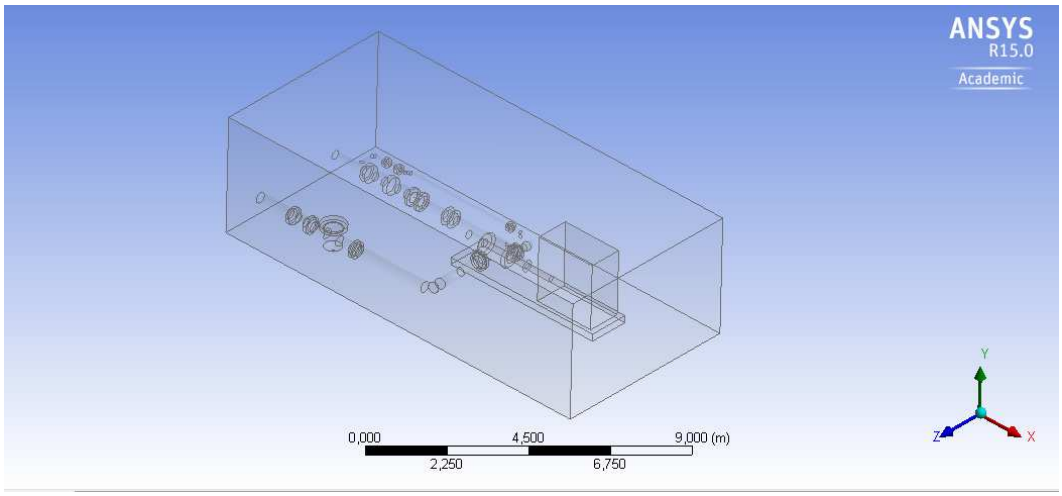


Figura 15: Ilustração do volume de controle (Fonte: elaboração própria).

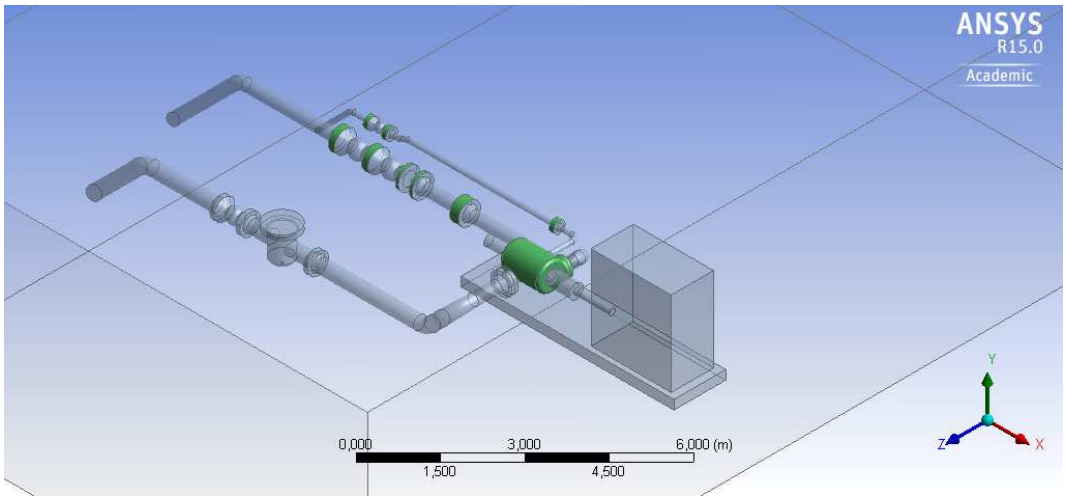


Figura 16: Superfícies onde ocorre vazamento de líquido e posterior emanação de vapores, destacadas em verde (*LEAK*) (Fonte: elaboração própria).

3.5.4. Geração da Malha

Para definição da malha adequadamente discretizada, foram feitos dois processos distintos partindo de uma malha inicial, de menor número de elementos. Optou-se por uma malha tetraédrica devido à complexidade e detalhes do volume de controle, com o algoritmo *patch conforming,* no qual a malha se conforma aos limites das faces.

Para melhor discretização da área de interesse, próxima aos vazamentos, utilizou-se a função *inflation* nas faces nomeadas como *LEAK*, que representam as faces onde a mistura de gases entra no volume de controle. Esta função permite a criação de uma camada de prismas próximos aos locais de interesse. Foram refinados os elementos de controles globais: *relevance center*, encontrado dentro da função *sizing*, define a relevância de forma automática (quanto maior a relevância, mais refinada a malha), em todas as direções, *smoothing,* que altera posições de nós e elementos de forma a melhorar a qualidade da malha e *span angle center*, referente ao refino do ângulo de curvaturas, obtendo-se os resultados conforme Tabela 15.

A qualidade da malha gerada foi analisada pela qualidade ortogonal e pela deformação dos elementos gerados, que impactam na qualidade do resultado da simulação e em sua velocidade. Os valores obtidos para estes dois parâmetros são considerados aceitáveis para realização da simulação.

Tabela 15: Geração de malha com alteração de funções. (Fonte: elaboração própria)

Função		Elementos	Nós	Qualidade ortogonal	Deformação
Relevance Center	Coarse	1.363.022	251.431	0,852	0,242
Smoothing	Low				
Span angle	Coarse (70°)				
Relevance Center	Medium	2.762.103	510.416	0,855	0,238
Smoothing	Medium				
Span angle	Coarse (55°)				
Relevance Center	Fine	4.557.815	848.094	0,853	0,240
Smoothing	Low				
Span angle	Coarse (55°)				
Relevance Center	Fine	5.275.685	977.626	0,856	0,237
Smoothing	High				
Span angle	Fine (18°)				

A outra forma de refinar a malha foi reduzindo o tamanho máximo dos elementos e das faces de cada elemento, resultando desta forma no exposto na Tabela 16:

Tabela 16: Geração de malha com redução de tamanho de face e elemento. (Fonte: elaboração própria)

Dimensão máxima (m)		Elementos	Nós	Qualidade ortogonal	Deformação
Face	0,73840	1.363.022	251.431	0,852	0,242
Elemento	1,47680				
Face	0,1	1.999.506	371.760	0,853	0,238
Elemento	0,2				
Face	0,08	2.682.667	495.818	0,8545	0,235
Elemento	0,15				
Face	0,06	4.945.622	894.458	0,857	0,229
Elemento	0,1				

3.5.5. Teste de Malha

Primeiramente para analisar a adequação da malha, utilizou-se o critério de qualidade ortogonal da malha (*orthogonal quality*), e a deformação dos elementos (*skewness*), já descritos nas tabelas dos itens anteriores, sendo possível iniciar a simulação.

Para definir qual seria o tamanho de malha que teria um resultado próximo à malha mais refinada, porém, que demandasse menos recurso computacional, foram feitas simulações com as 7 malhas geradas e a concentração molar de propano foi

comparada em uma mesma linha (Figura 17) composta por 50 pontos igualmente espaçados entre si. Os resultados, primeiramente divididos em dois grupos e depois, comparados entre si.

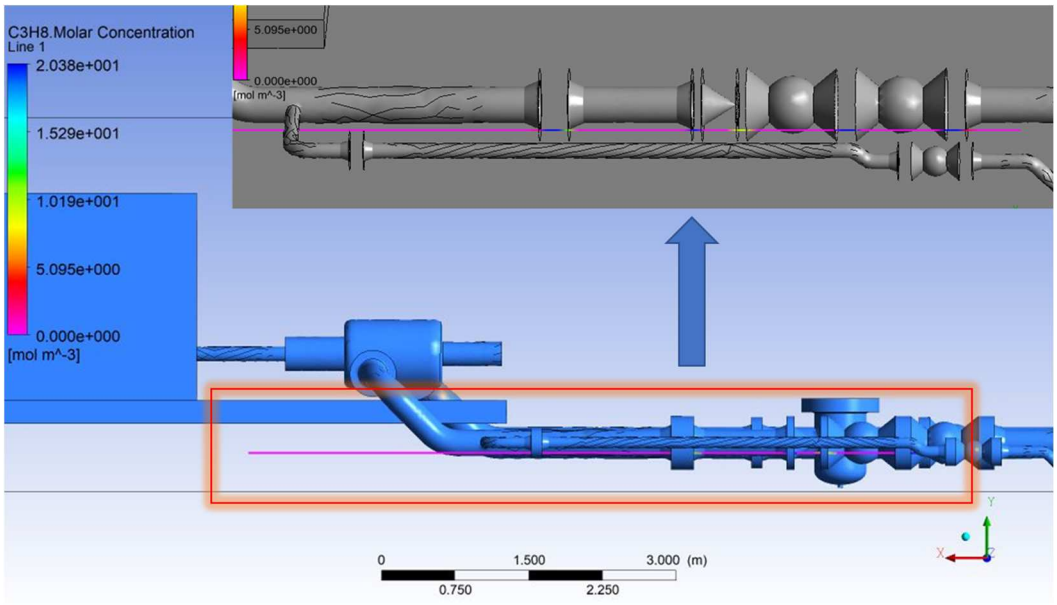


Figura 17: Localização da linha utilizada para o teste de malha.

A Figura 18 apresenta a comparação da concentração molar de propano nas diferentes malhas obtidas com a alteração dos parâmetros da Tabela 15.

A Figura 19, por sua vez, mostra a comparação das concentrações molares quando é feita a redução dos tamanhos de face e elementos, com base na Tabela 16.

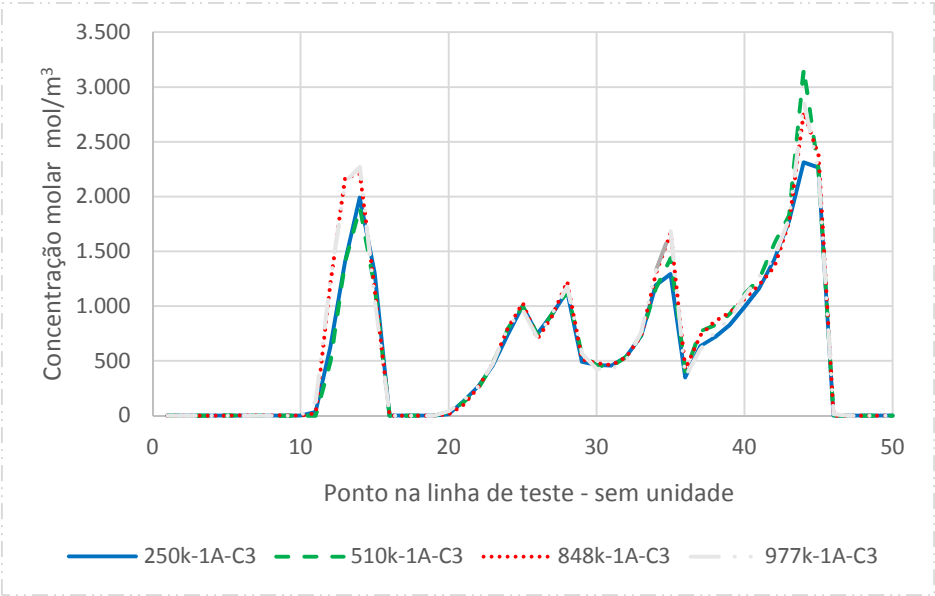


Figura 18: Comparação da concentração molar de propano em mesmas condições de simulação nas diferentes malhas da Tabela 15.

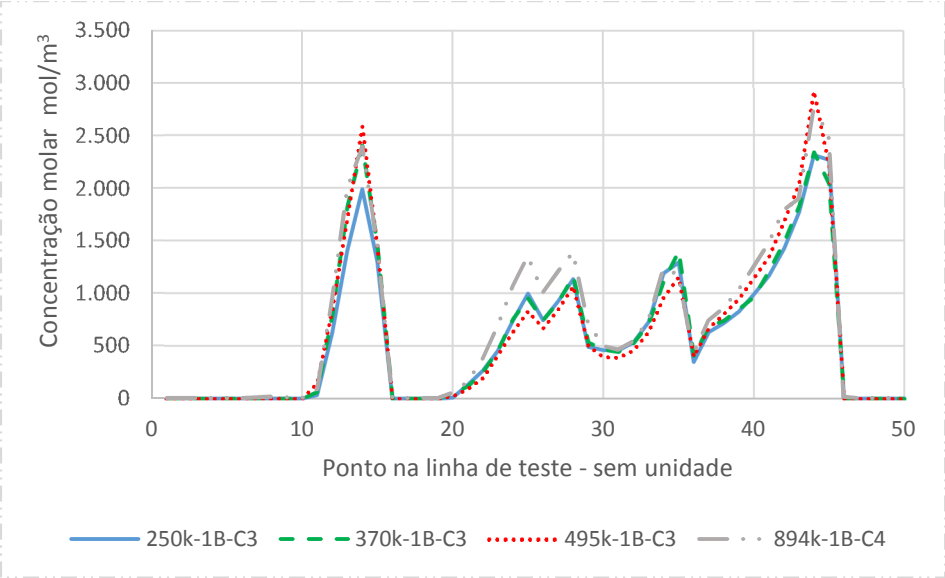


Figura 19: Comparação da concentração molar de propano em mesmas condições de simulação nas diferentes malhas da Tabela 16.

Pode-se perceber que na Figura 18 os pontos de 977mil nós e de 848 mil nós ficaram mais próximos em comparação às duas malhas de maior número de elementos. Portanto, foi descartada a malha de 977mil nós e a comparação de resultados entre os diferentes tipos de geração de malha foi feita conforme Figura 20, no qual foram elencadas as malhas de 848 mil nós e 510 mil nós da Figura 18 e as duas malhas com maior quantidade de nós, 894 mil e 495 mil da Figura 19.

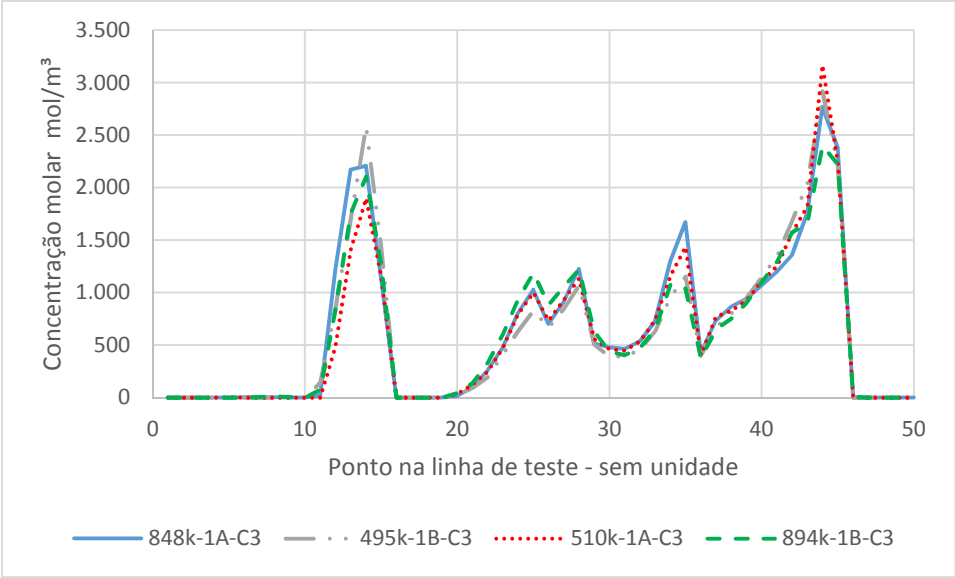


Figura 20: Comparação da concentração molar de propano considerando métodos de geração de malhas diferentes.

Após análise, optou-se por utilizar a malha de 510 mil nós, pois foi gerada de maneira a discretizar a área de interesse nas proximidades dos pontos de vazamento, além de apresentar valores de concentração molar de propano mais próximo às malhas de maior quantidade de nós. A seguir é feita uma comparação das malhas de 495 mil nós e 510 mil nós, observando-se as Figura 21, Figura 22Figura 23Figura 24.

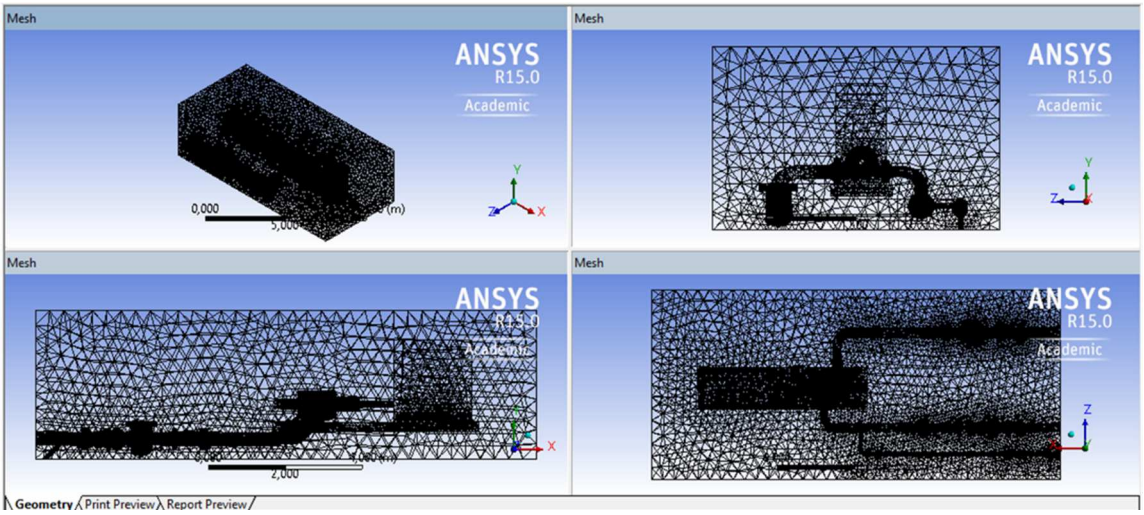


Figura 21: Vistas da malha de 510mil nós.

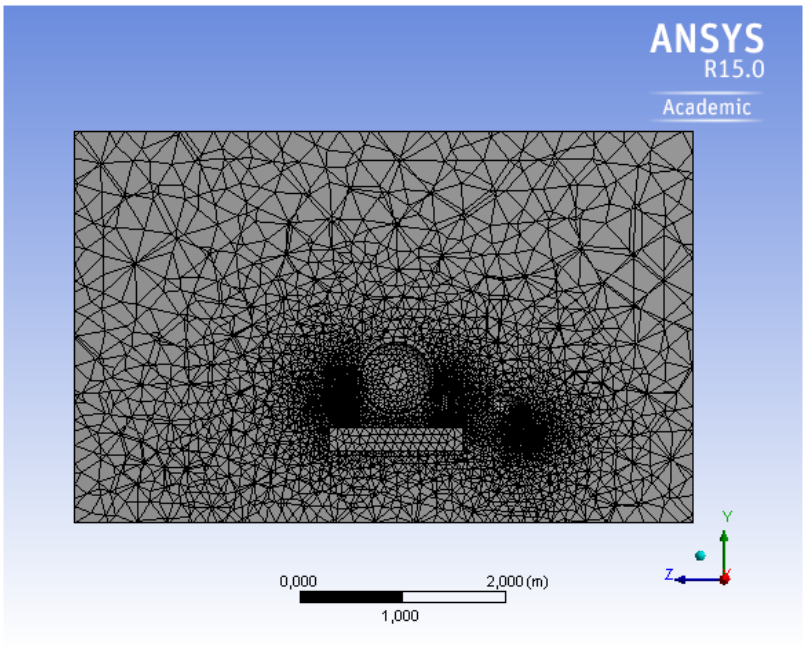


Figura 22: Corte no plano YZ da malha de 510mil nós.

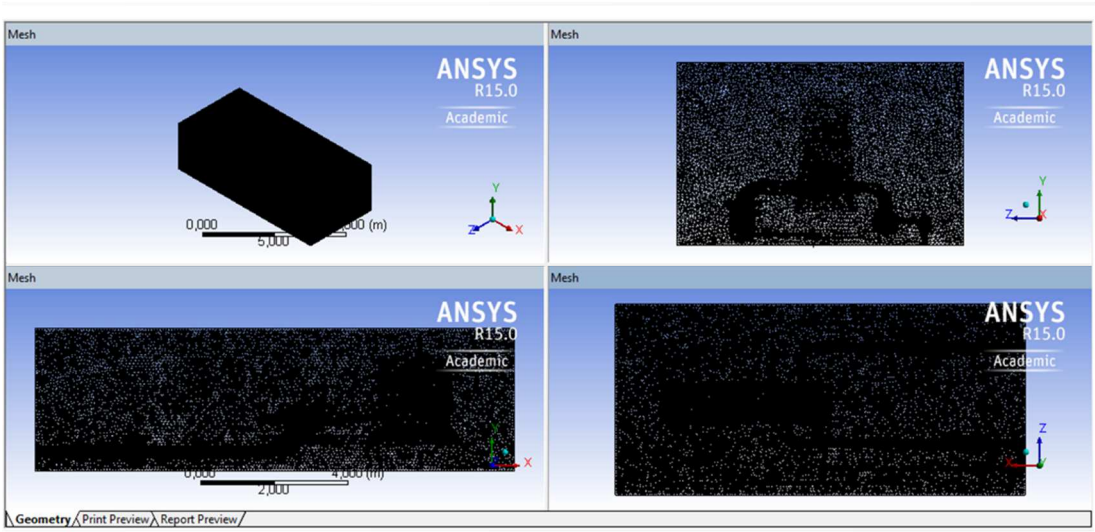


Figura 23: Vistas da malha de 495 mil nós.

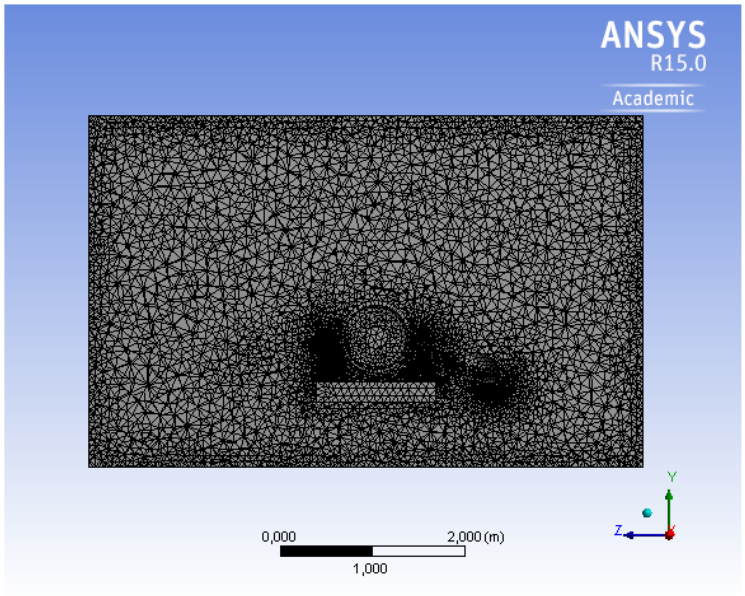


Figura 24: Corte no plano YZ da malha de 495mil nós.

3.5.6. CFX

A configuração inicial e as condições de contorno são críticas para a precisão ou assertividade da modelagem (CORMIER, QI, YUN, ZHANG & MANNAN, 2009). O CFX, da Ansys, resolve as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS) discretizadas baseado no método dos volumes finitos.

Para facilitar a análise, criou-se uma mistura de propano, butano e ar a 25°C e nomeada como “vapor”. Para a análise do balanço de massa e energia deste sistema, algumas condições de contorno são definidas no software. As entradas do sistema são denominadas *inlets*, a saída do sistema, *outlet*; as faces que tem interação com o comportamento do fluido, que geram tensão de cisalhamento, tal como um obstáculo, denominado *wall*, e as faces que podem ser consideradas sem a tensão de cisalhamento são *free slip wall*.

Foram definidos os pontos de emanação de vapores como *inlets*. Foi estabelecido para o vento o sentido do sul para norte, sendo a face sul um *inlet*, e a face norte, *outlet,* conforme observado na Figura 25. As áreas de parede sólida, da estrutura da moto-bomba, foram configuradas como *wall* e a as demais faces da atmosfera, definidas como *free slip wall*.

A simulação ocorreu em estado estacionário, a fim de determinar um volume onde houvesse condições de inflamabilidade da evaporação misturada ao ar. A Tabela 17 resume as condições estabelecidas para a simulação no CFX.

Tabela 17: Condições definidas para a simulação no CFX

Local	Considerações
Domínio: atmosfera ao redor do equipamento	• Pressão: 1atm. • Temperatura: 25°C. • Ação da gravidade: 9,81 m/s² no sentido oposto ao eixo y • Densidade do ar: 1,255 kg/m³. • Sem presença de inflamáveis.
Entrada: vapor	• Mistura de 43% de propano e 57% de butano. • Difusividade cinemática no ar (item 3.5.1.2): - Propano: 0,11 cm²/s. - Butano: 0,10 cm²/s para o butano. • Taxa de evaporação: $1{,}25.10^{-6}$ kg/s (item 3.5.1.1).
Entrada: vento pela face sul	• Velocidade do vento: - Em regime laminar: 2.10^{-5} m/s. - Em regime turbulento: 1 m/s. • Sem presença de inflamáveis.

Foi estabelecido o resíduo quadrático médio (*root mean square* – RMS) de $1x10^{-4}$ como critério de convergência. A configuração geral é apresentada na Figura 26.

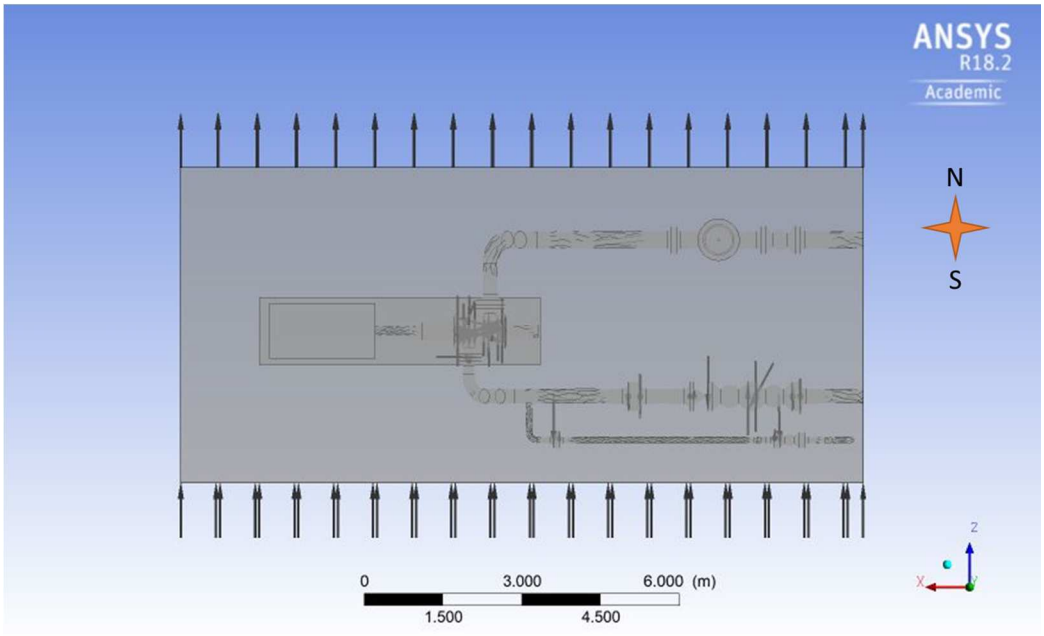


Figura 25: Indicação dos pontos cardeais em relação ao modelo no CFX.

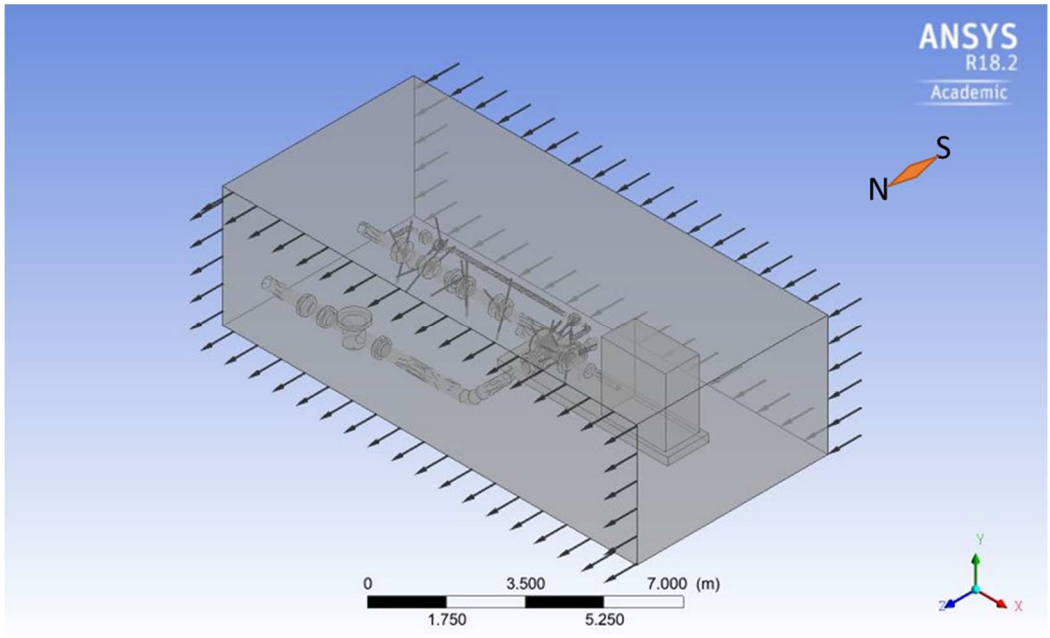


Figura 26: Ilustração da configuração geral no CFX.

4. RESULTADOS

Os resultados das simulações numéricas foram avaliados analisando-se a distância da fonte de emissão de vapores até o ponto onde há risco de ignição na presença de uma fonte de energia. Estes resultados foram comparados com os resultantes da aplicação das normas.

4.1. Resultado das aplicações das normas para a classificação de áreas

Pode-se notar que as figuras padrão para bombas tem o mesmo dimensionamento, uma distância de 3 m que foi colocada como um quadrado, conforme as aplicações das 3 normas, considerado como zona 2, e há uma variação, na vertical, na qual a ABNT tem menor dimensão que as demais referências internacionais. Nestas, o aumento do dimensionamento pode ocorrer em função das condições operacionais de pressão e vazão. Entretanto, serão mantidos os dimensionamentos menos conservativos no caso das normas NFPA e API, onde observa-se uma convergência entre as normas conforme Tabela 18, dado que o objetivo principal não é a comparação entre as normas.

Tabela 18: Aplicação dos critérios menos conservadores das normas internacionais (Fonte: elaboração própria)

LOCAL	ABNT	NFPA	API
Ao redor da bomba	3m	3m	3m
Ao redor dos flanges	1m	1m	-

Como resultado das aplicações destas temos a figura da classificação de áreas, e exportando as imagens para o *Design Modeler*, para facilitar a comparação após modelagem, temos a configuração das áreas, como pode ser observado por diferentes ângulos de visão, nas Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30:

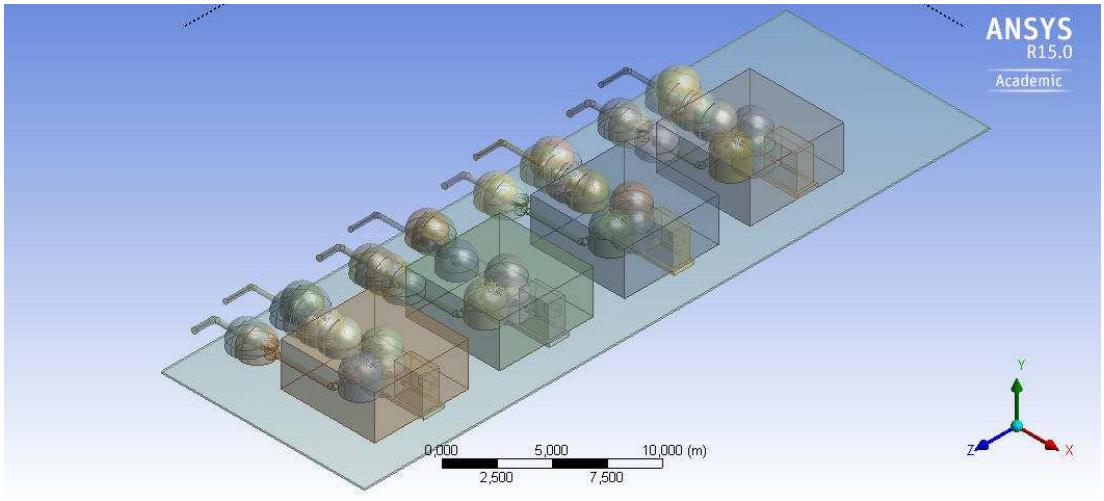


Figura 27: Vista isométrica da área classificada (fonte: elaboração própria).

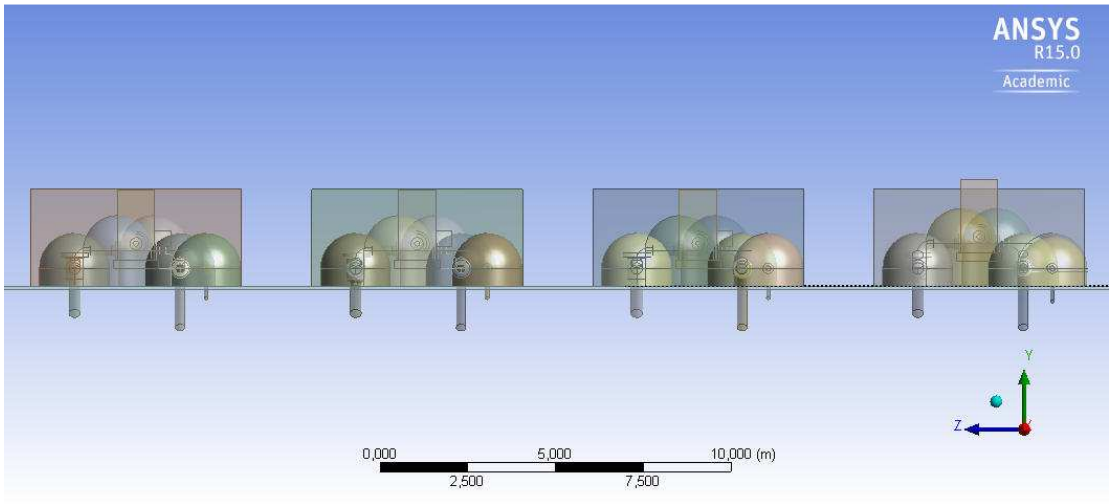


Figura 28: Vista do Plano YZ da área classificada (fonte: elaboração própria).

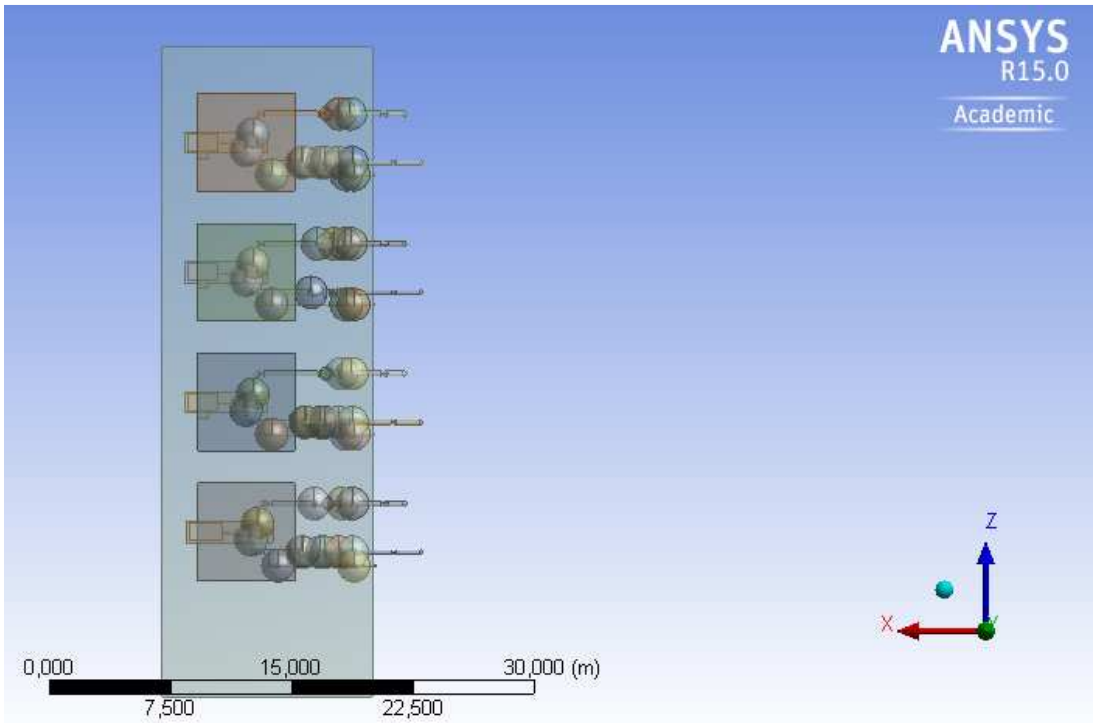


Figura 29: Vista do plano XZ da área classificada (fonte: elaboração própria).

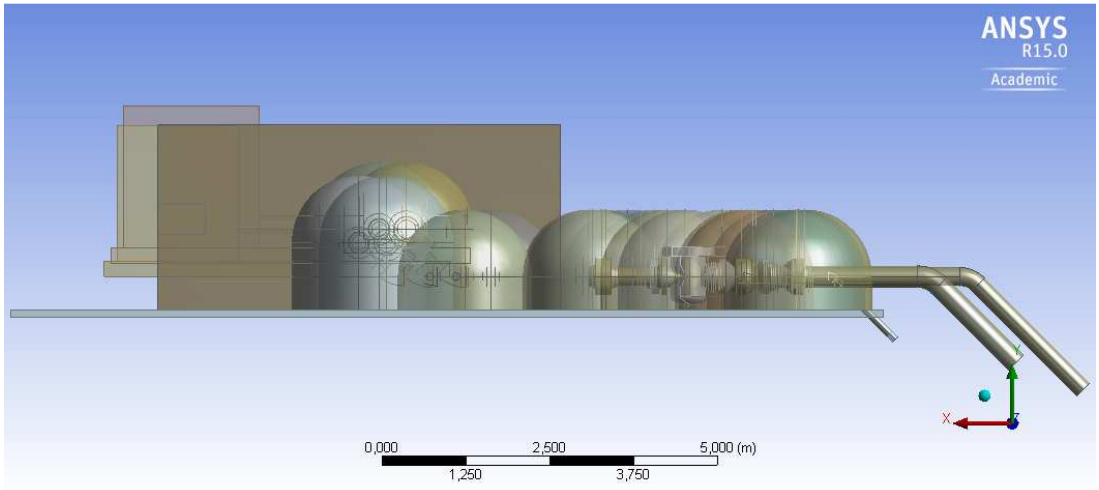


Figura 30: Vista do Plano XY da área classificada (fonte: elaboração própria).

4.2. Resultado da simulação numérica

Pode-se notar pelos monitores que o critério de convergência $1x10^{-4}$ foi alcançado para o fluxo mássico (P-*mass*), ficando próximo de $1x10^{-3}$ para as demais variáveis de momento, e para o regime laminar, o RMS aproximou-se de $1x10^{-3}$.

Tendo em vista que somente as proximidades das faces referentes ao vazamento tem maior relevância, também foi observado o comportamento do resíduo máximo, no entanto, não foi adotado como critério de convergência. Pode-se notar semelhança no comportamento, mas os valores de resíduo máximo são mais elevados, em 10 vezes aproximadamente para todas as variáveis, comparando com o RMS.

Para fração mássica, foram observados resultados com mesmo comportamento, no qual o RMS no regime laminar aproximou-se de $1x10^{-3}$ enquanto no regime turbulento, o RMS foi inferior a $1x10^{-4}$.

As figuras a seguir mostram, em diferentes planos: longitudinal à bomba (Figura 31 a Figura 33), longitudinal aos flanges (Figura 34 a Figura 36) e transversal à bomba (Figura 37 a Figura 39), o perfil de fração mássica de propano (Figura 31,Figura 34 e Figura 37), butano (Figura 32, Figura 35 e Figura 38) e do ar (Figura 33, Figura 36 e Figura 39) para o regime laminar e turbulento.

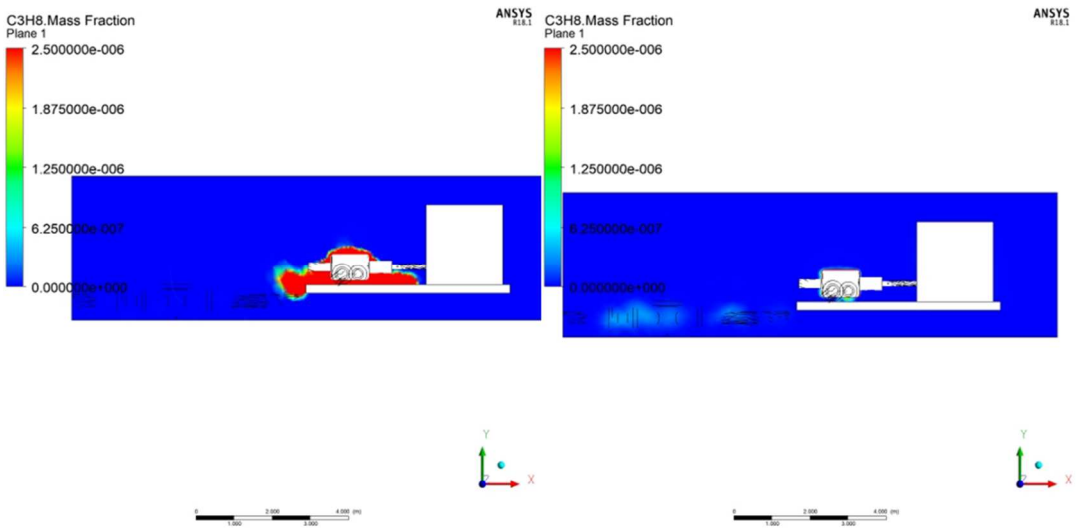


Figura 31: Perfil de fração mássica de propano do regime laminar à esquerda e do regime turbulento à direita, longitudinal à bomba.

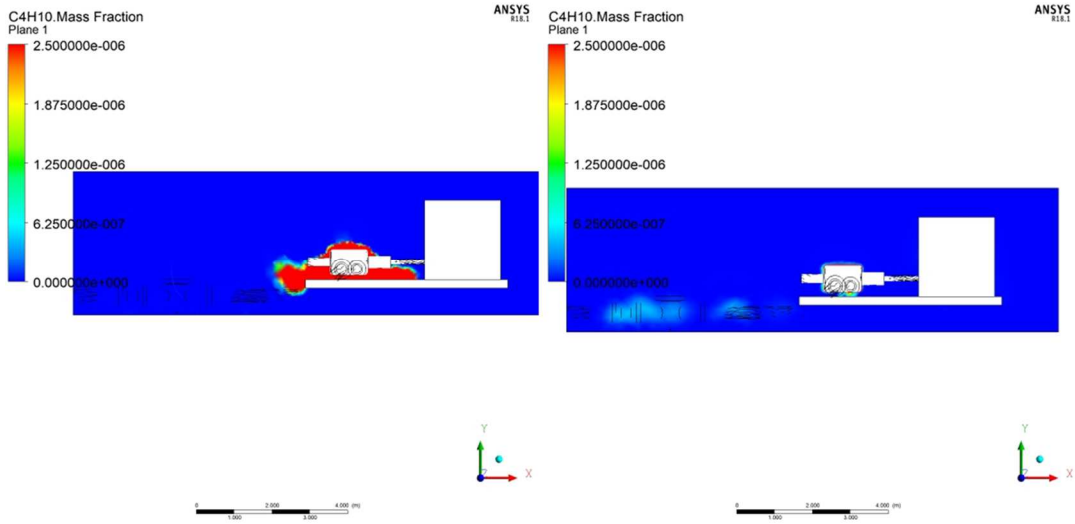


Figura 32: Perfil de fração mássica de butano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal à bomba.

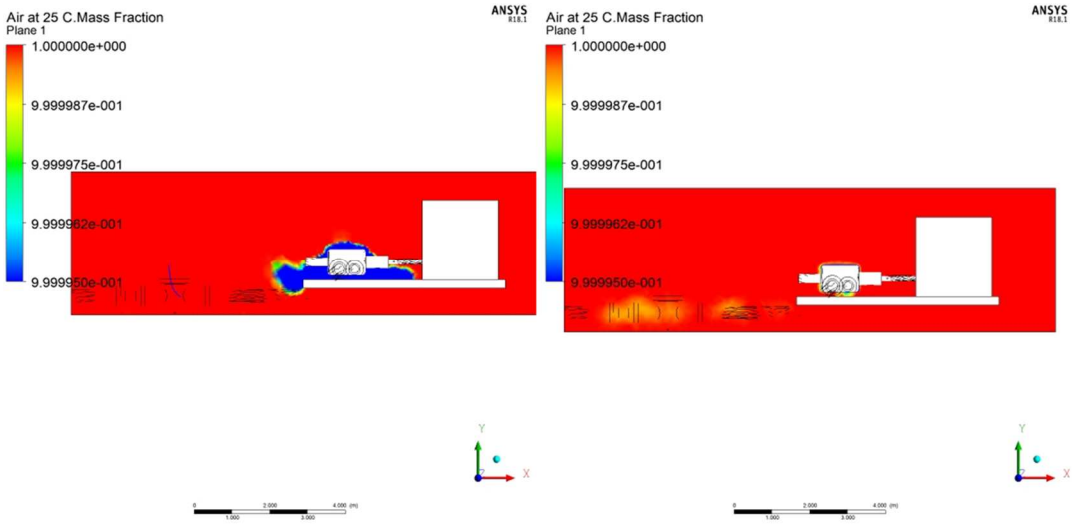


Figura 33: Perfil de fração mássica do ar no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal à bomba.

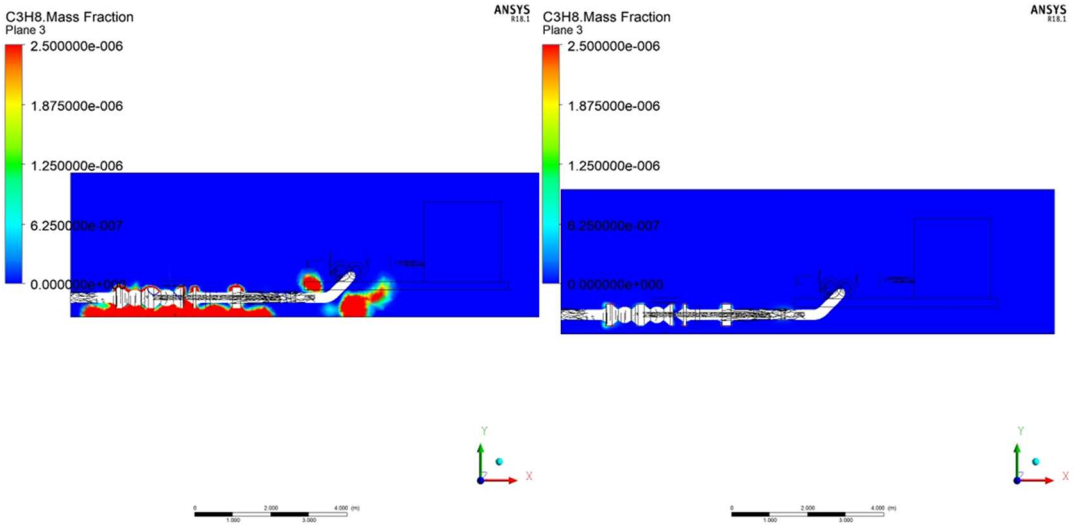


Figura 34: Perfil de fração mássica de propano do regime laminar à esquerda e do regime turbulento à direita, longitudinal aos flanges.

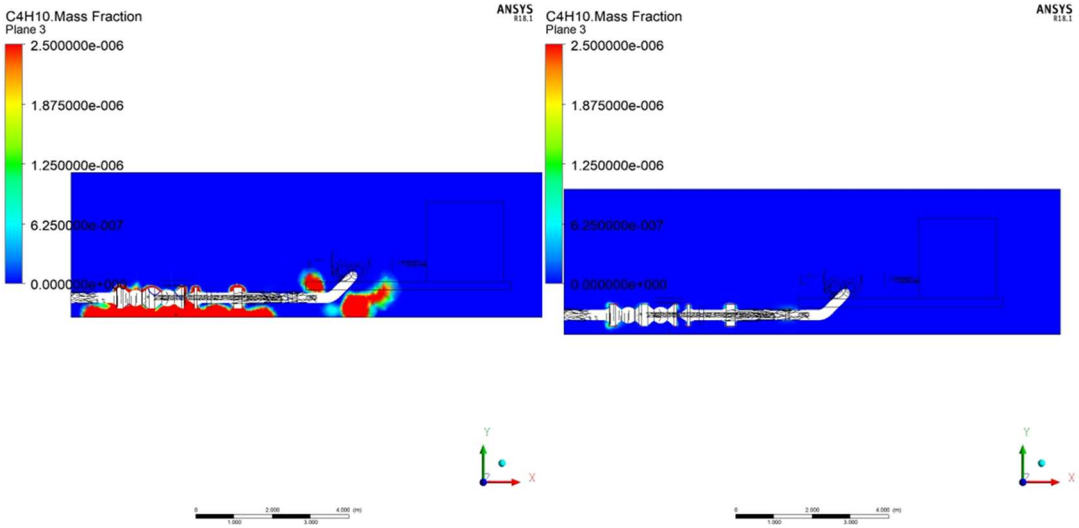


Figura 35: Perfil de fração mássica de butano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal aos flanges.

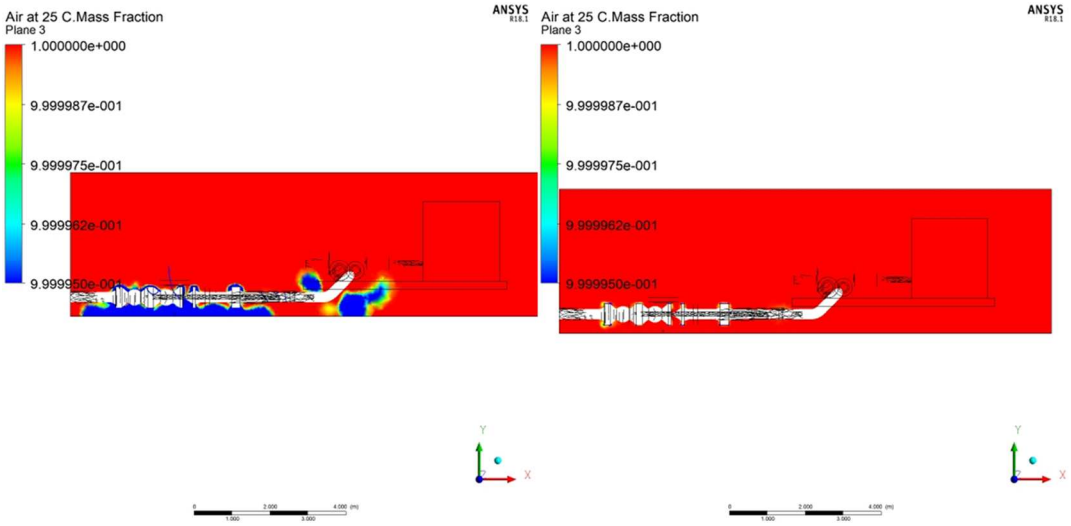


Figura 36: Perfil de fração mássica do ar no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, longitudinal aos flanges.

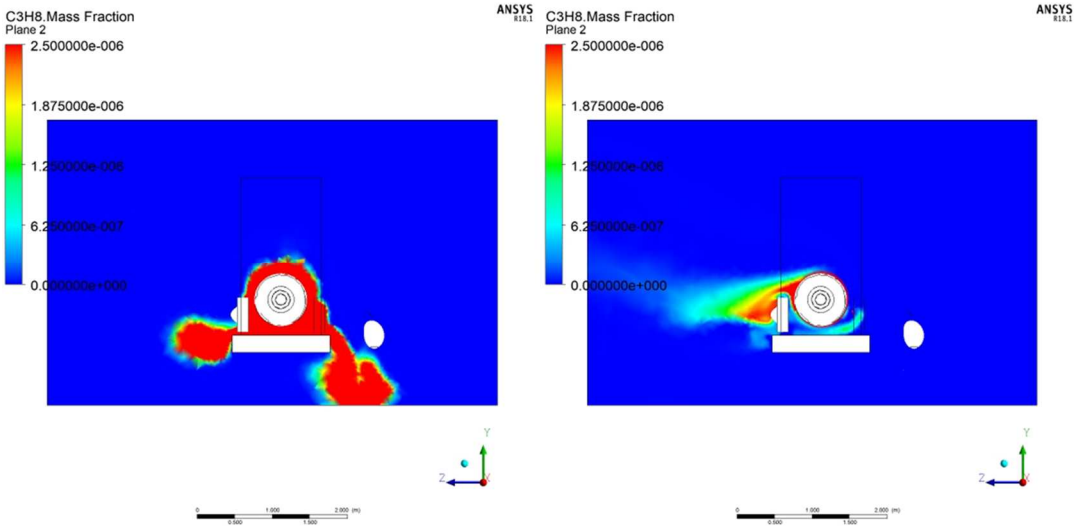


Figura 37: Perfil de fração mássica de propano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, transversal à bomba.

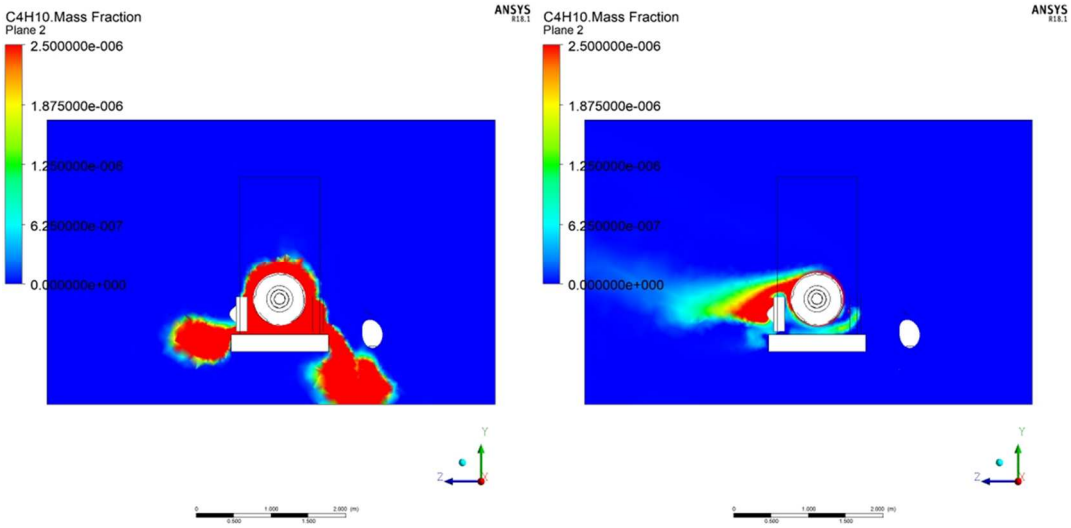


Figura 38: Perfil de fração mássica de butano no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, transversal à bomba.

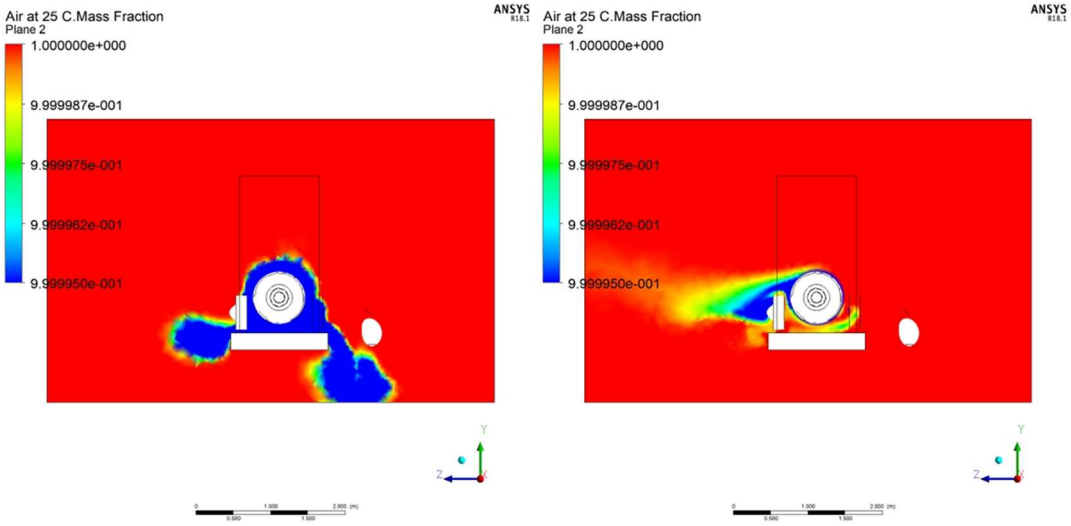


Figura 39: Perfil de fração mássica do ar no regime laminar à esquerda e no regime turbulento à direita, transversal à bomba...

Os resultados da modelagem são mostrados a seguir, tendo em vista a fração molar de cada substância, ou seja, do propano e do butano independentemente, no seu limite inferior de explosividade, isto é, na menor concentração em que pode ocorrer uma ignição, caso uma fonte de energia esteja localizada nesta distância. Também é mostrada a superfície correspondente à fração molar de ar de 0.981, dado que a mistura dos gases tem um LIE calculado de 1,9%. As Figuras a seguir ilustram estes resultados obtidos com diferentes visualizações de *isosurface* nos regimes laminar (Figura 40 a Figura 43) e turbulento (Figuras Figura 44 a Figura 47) na

concentração do LIE do propano (Figura 40 e Figura 44), LIE do butano (Figura 41 e Figura 45) e LIE da mistura (Figura 42, Figura 43, Figura 46 e Figura 47). Por estas figuras, não se nota diferença entre a distância do ponto de concentração do LIE entre os regimes laminar e turbulento.

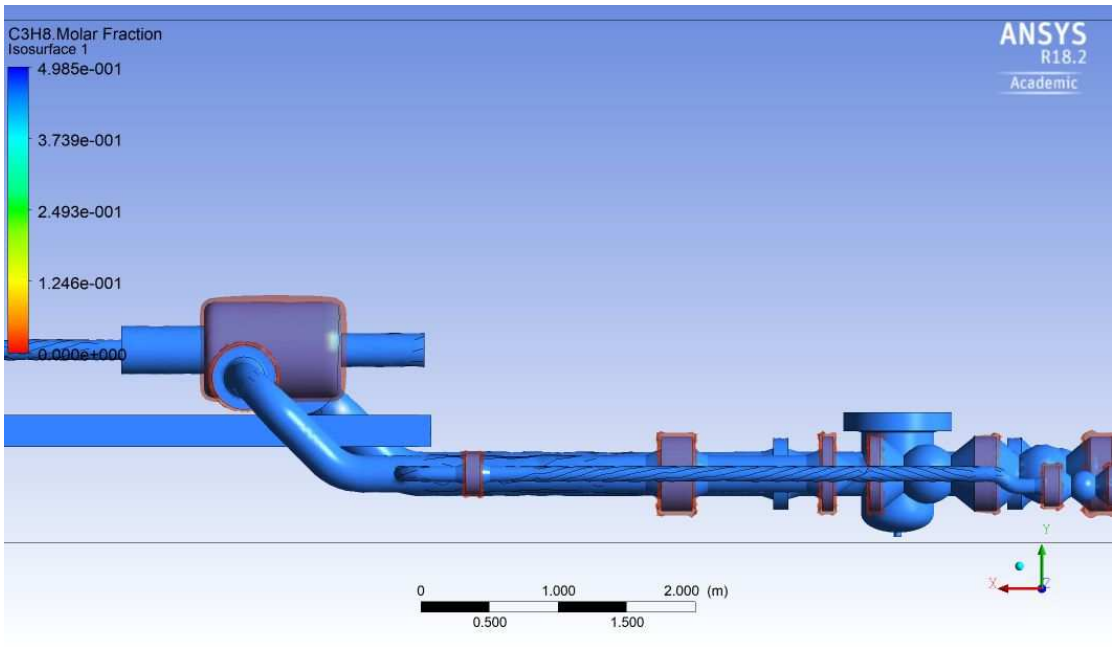


Figura 40: Regime Laminar – *isosurface* para LIE do C3.

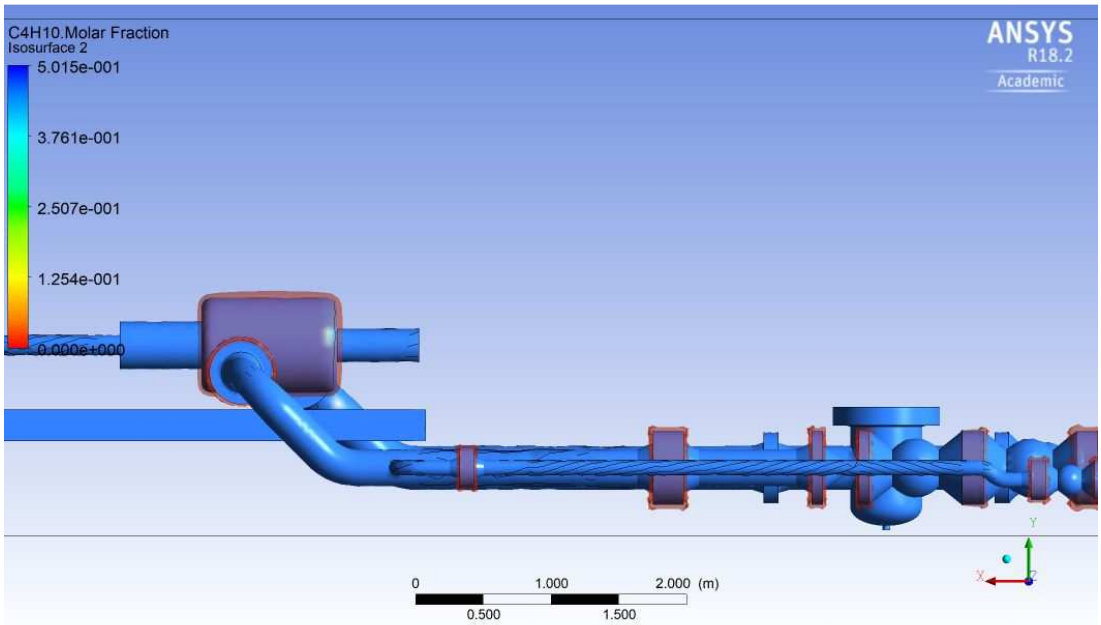


Figura 41: Regime Laminar - *isosurface* para LIE do C4.

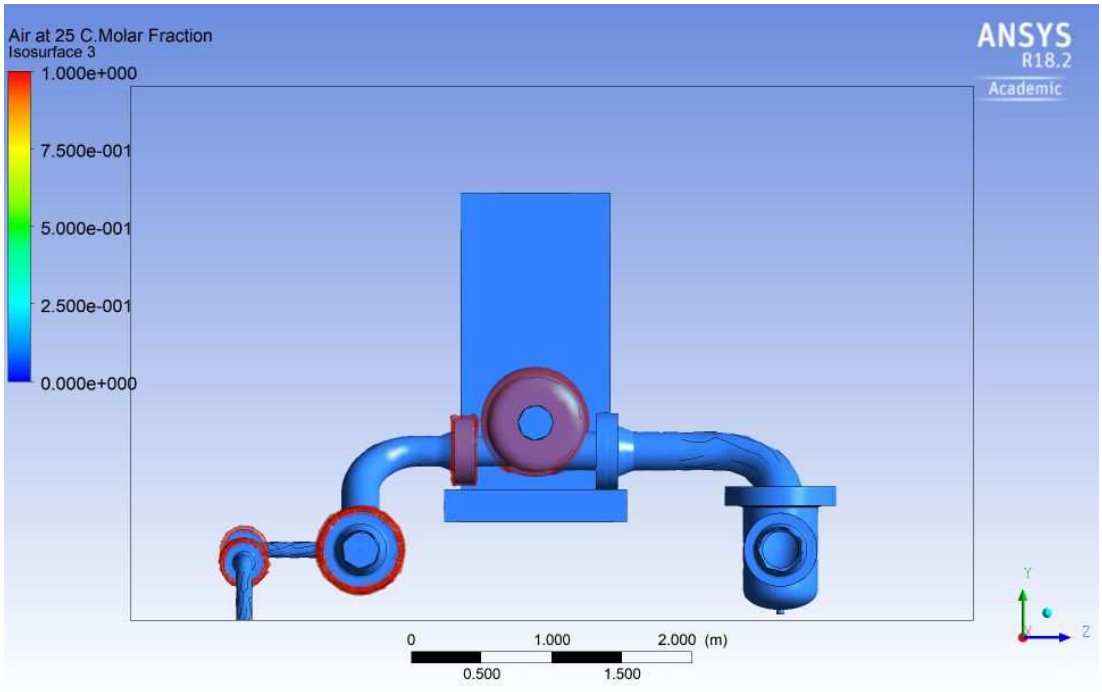


Figura 42: Regime Laminar – *isosurface* da fração molar de ar no valor 0,981.

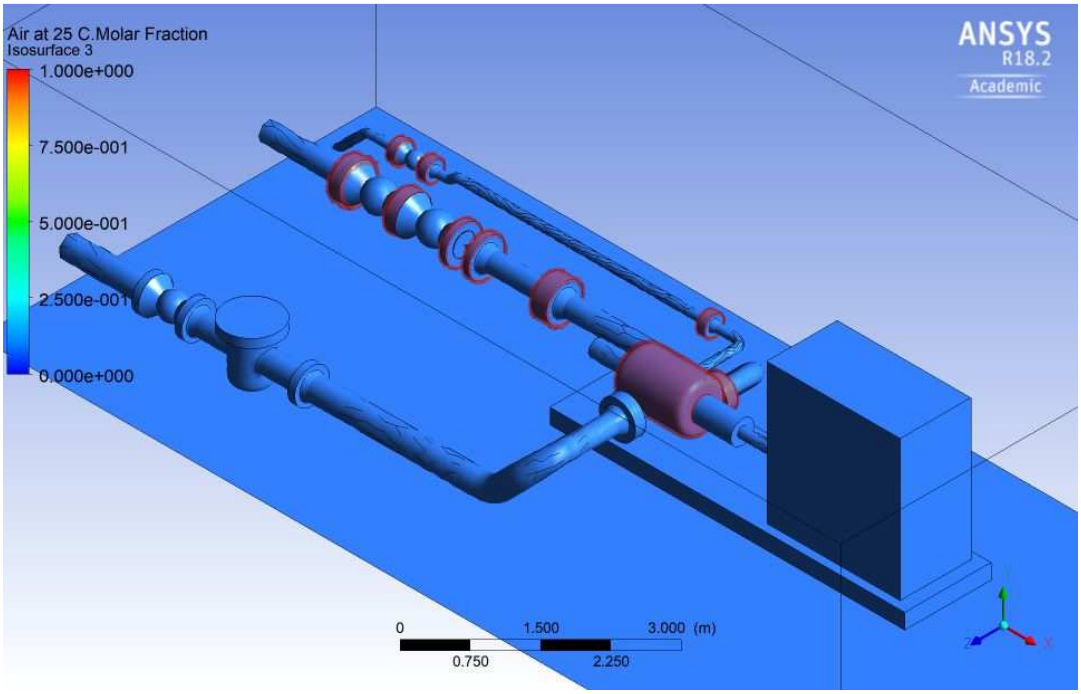


Figura 43: Regime Laminar - *isosurface* para LIE da mistura C3 e C4.

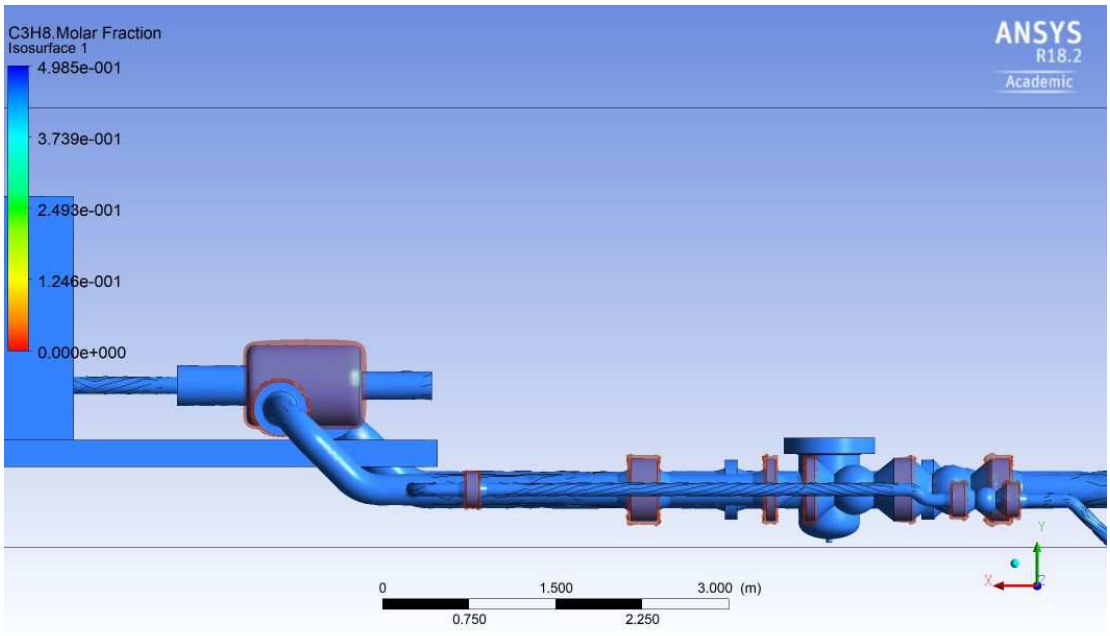


Figura 44: Regime Turbulento - *isosurface* para LIE do C3.

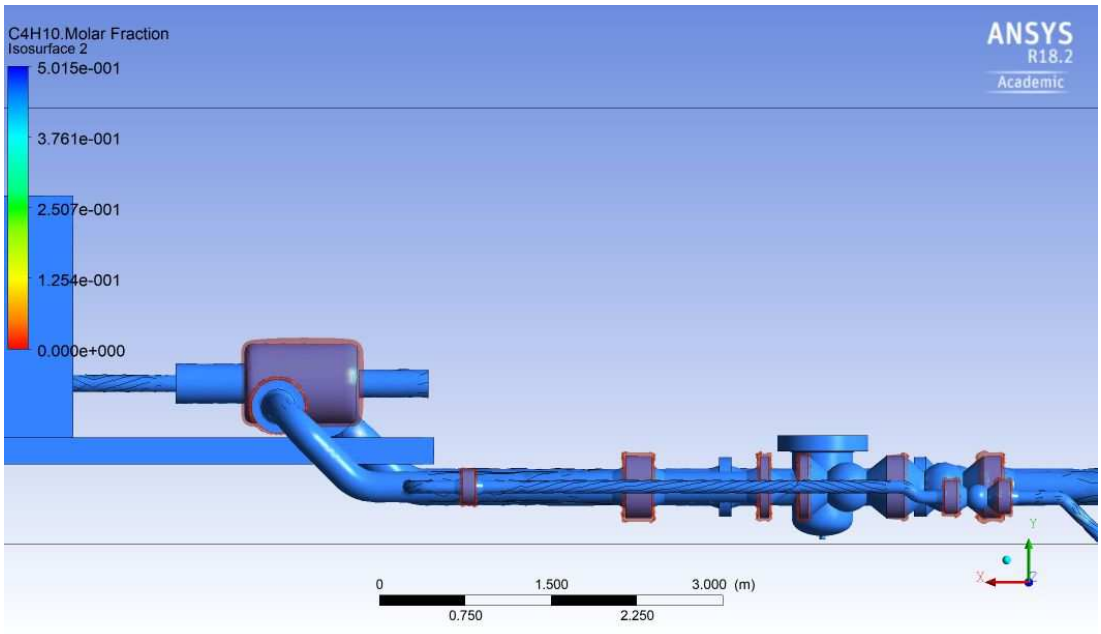


Figura 45: Regime Turbulento - *isosurface* para LIE do C4.

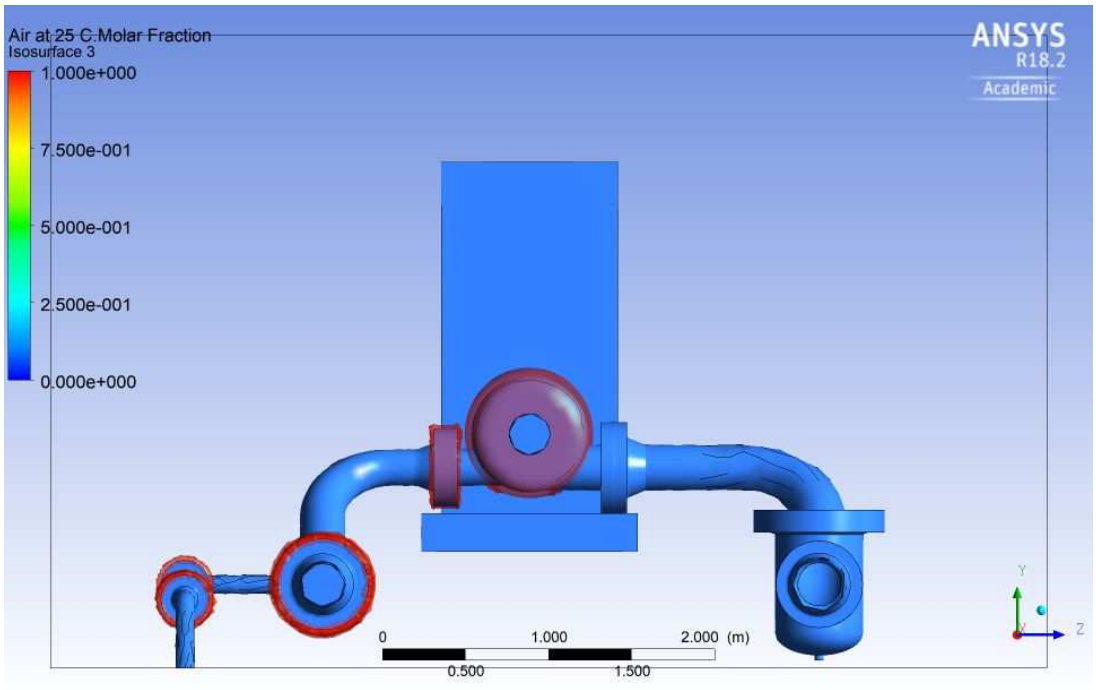


Figura 46: Regime Turbulento - *isosurface* da fração molar de ar no valor 0,981.

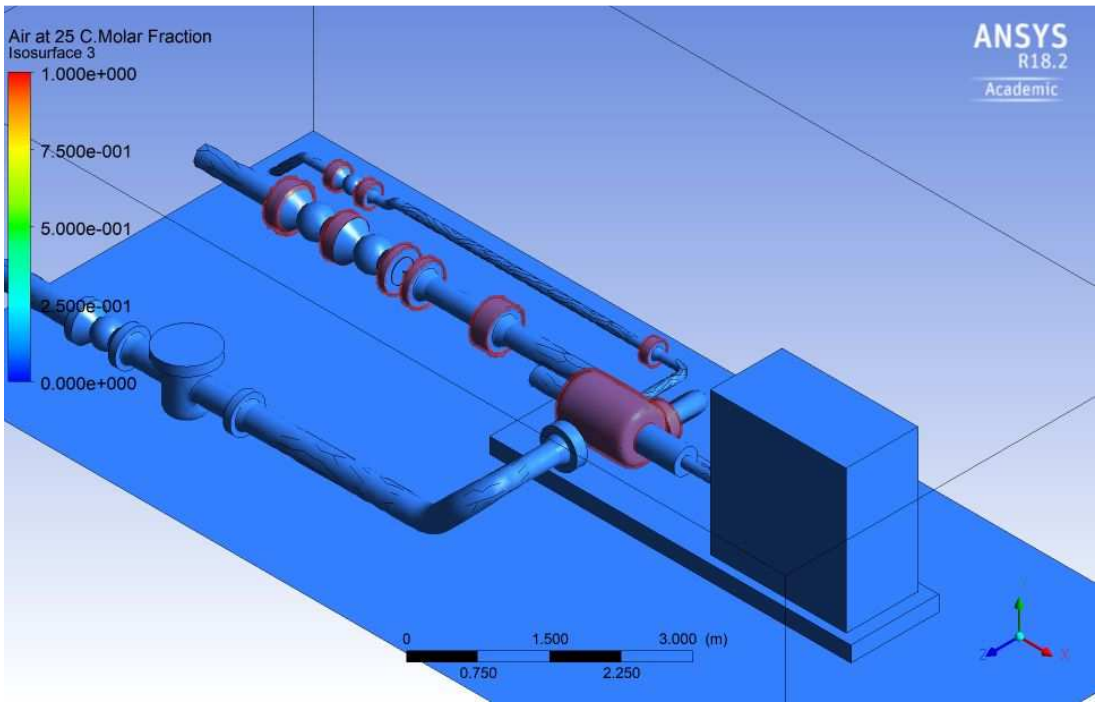


Figura 47: Regime Turbulento- *isosurface* para LIE da mistura C3 e C4.

Por não haver uma dissipação além do volume de controle dimensionado, não foi realizado o trabalho para o parque de bombas.

4.3. Comparação dos Resultados

Como descrito anteriormente no item de comparação entre as normas, foi definida a utilização do dimensionamento menos conservador, levando ao uso das Figuras Figura 48 a Figura 51, que ilustram o dimensionamento somente para uma bomba, para facilitar a comparação com o resultado da simulação numérica.

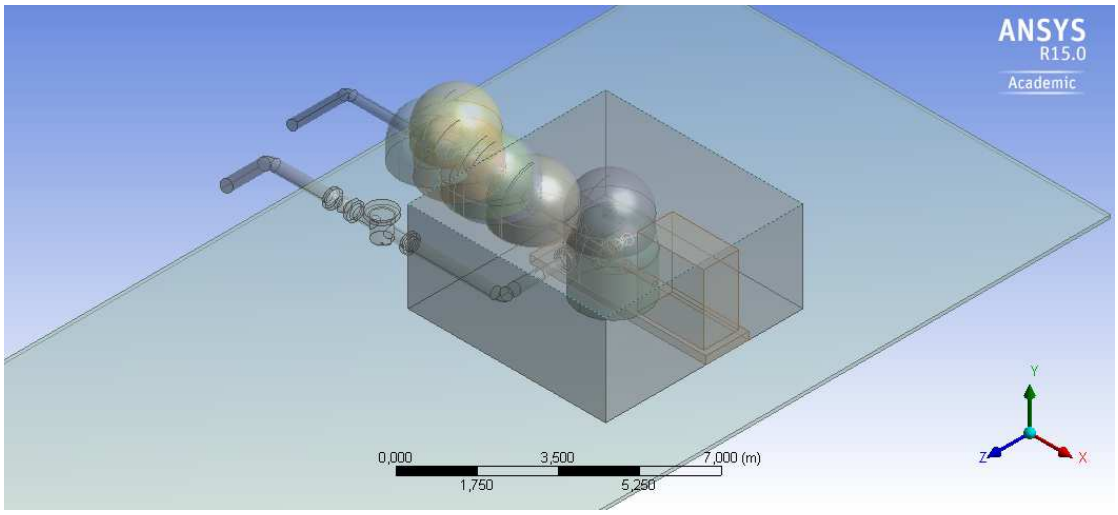


Figura 48: Vista do dimensionamento da área da bomba.

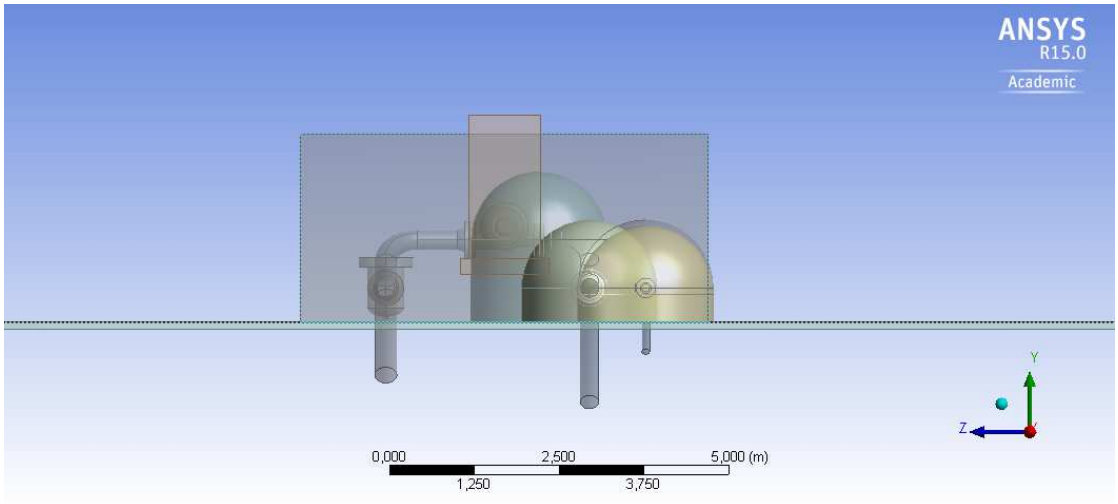


Figura 49: Vista do dimensionamento da área da bomba corte YZ.

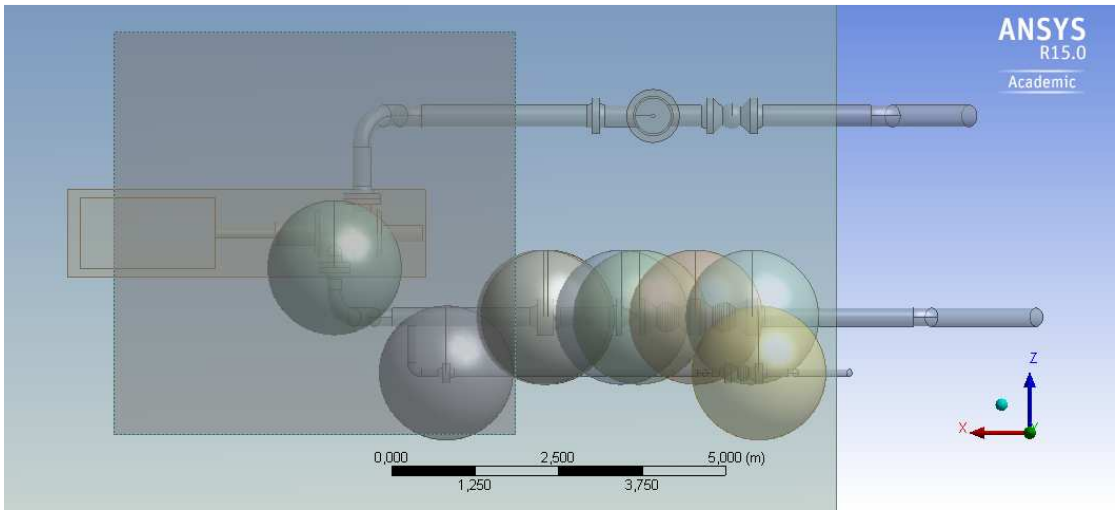


Figura 50: Vista do dimensionamento da área da bomba corte XZ.

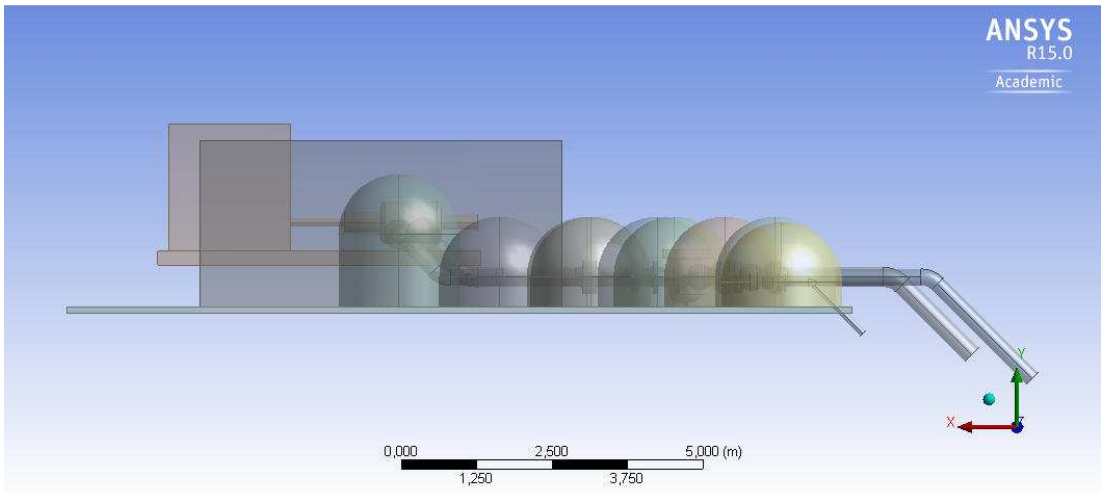


Figura 51: Vista do dimensionamento da área da bomba corte XY.

Na comparação entre regime turbulento e laminar notou-se pouca diferença entre o que seria a classificação de área, devido às dimensões de *isosurface* reduzidas, conforme observado nas Figura 52 e Figura 53.

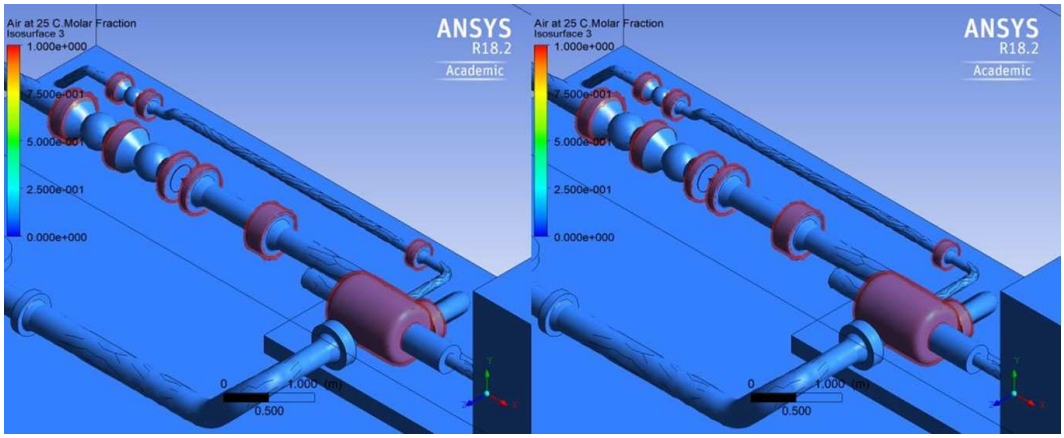


Figura 52: Comparação dos dimensionamentos obtidos no regime laminar à esquerda e turbulento à direita.

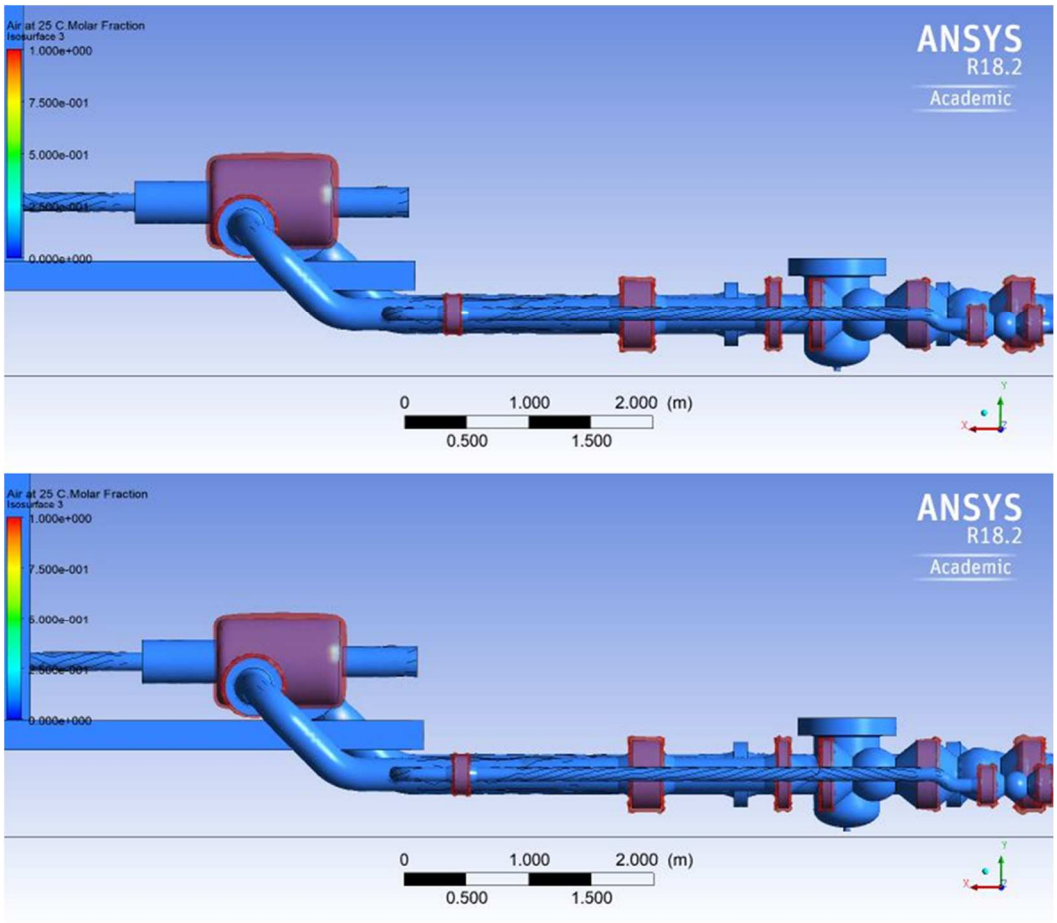


Figura 53: Comparação dos dimensionamentos obtidos no regime laminar acima e turbulento abaixo.

Foram apresentados os valores de concentração molar do ar considerando o valor de LIE do petróleo apresentado por Zhu et. al (2015), dado que não foi possível

obter esta informação por análise do petróleo utilizado no local, no entanto, também observa-se pouca diferença entre os valores.

Em relação à nuvem inflamável obtida pela simulação, observa-se um valor inferior a 1 metro nas condições de vento muito abaixo do que é relatado sobre as condições normais do local, inferior a 20 cm.

Comparando estes resultados com a aplicação da norma, nota-se diferença substancial de tamanho, sendo a área delimitada pela norma superior à obtida pelo uso de CFD. A Figura 54 tem como foco comparar a delimitação das áreas nas válvulas e a Figura 55 apresenta a diferença da área de risco ao redor da bomba. A Figura 56 mostra a vista geral das duas aplicações.

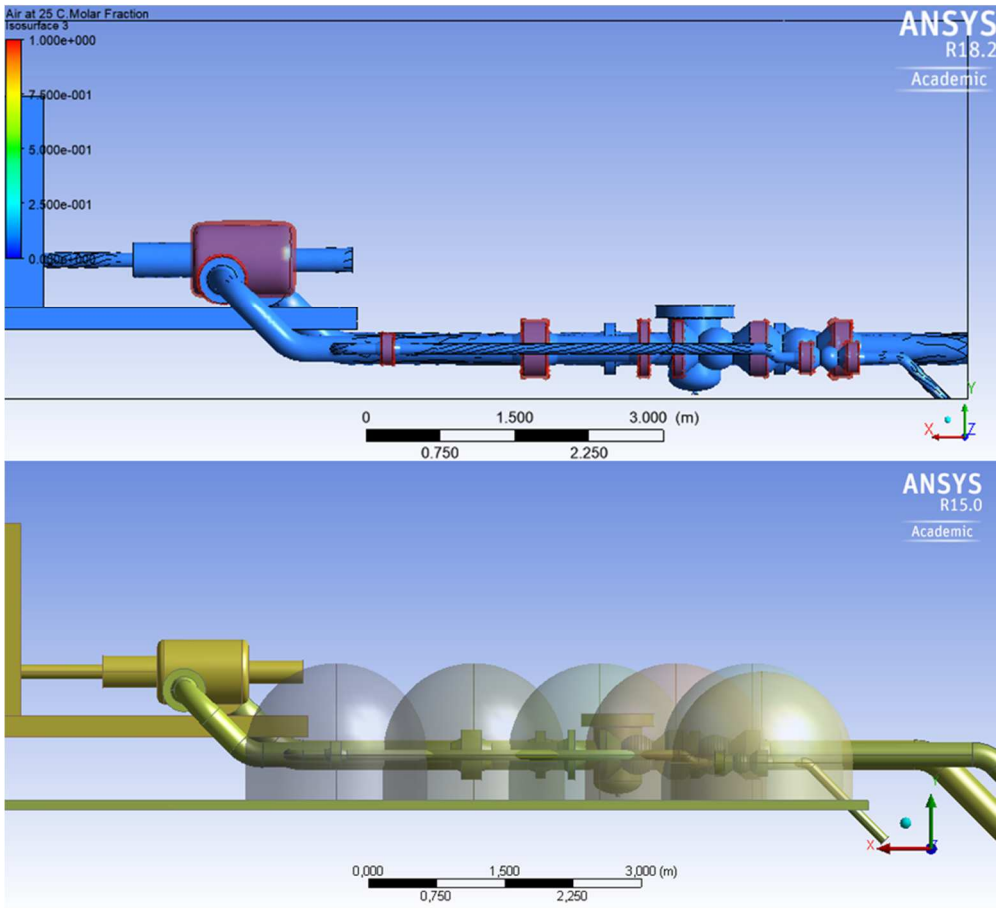


Figura 54: Comparação dos dimensionamentos com foco nas válvulas.

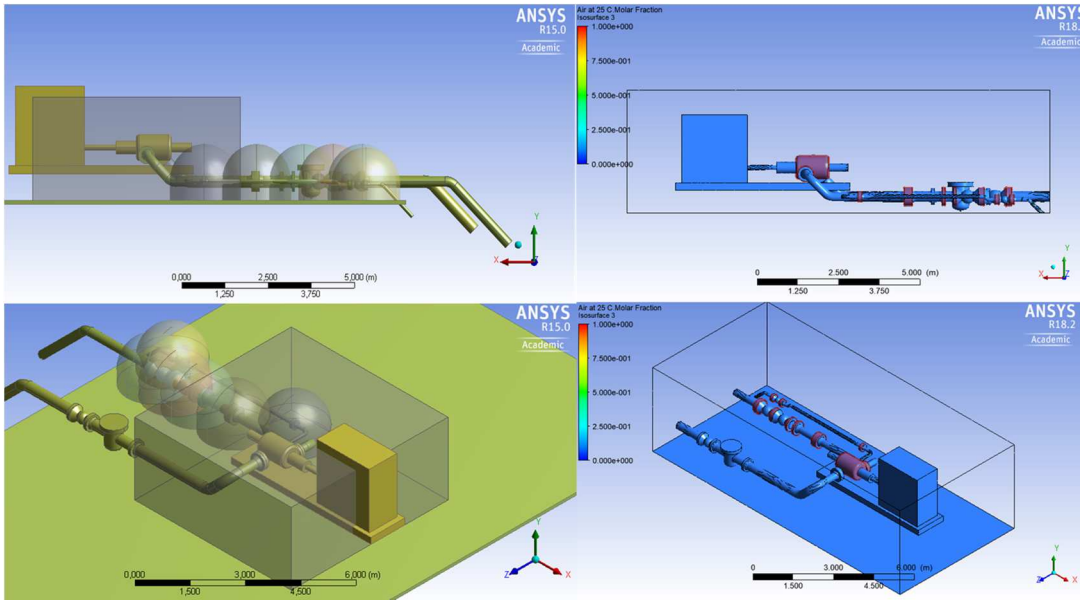


Figura 55: Comparação dos dimensionamentos com foco na bomba.

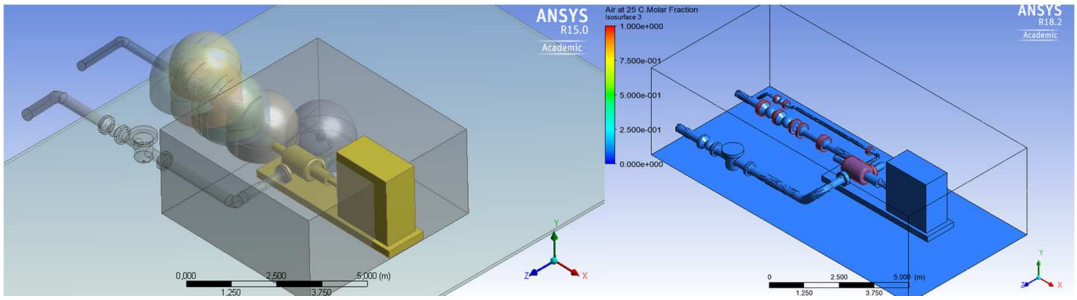


Figura 56: Comparação dos dimensionamentos obtidos com a aplicação da norma à direita e com CFD à esquerda- vista geral.

Tendo em vista este resultado, e analisando-o com a possibilidade de detecção da nuvem com concentração equivalente a 50% do LIE da mistura, ou seja, na distância onde a *isosurface* da fração molar de ar é 0,9905, como feito em estudo de volume vazado com esta concentração, realizado pela HSL (2005), nota-se ainda pouca diferença de volume da área classificada, conforme Figura 57.

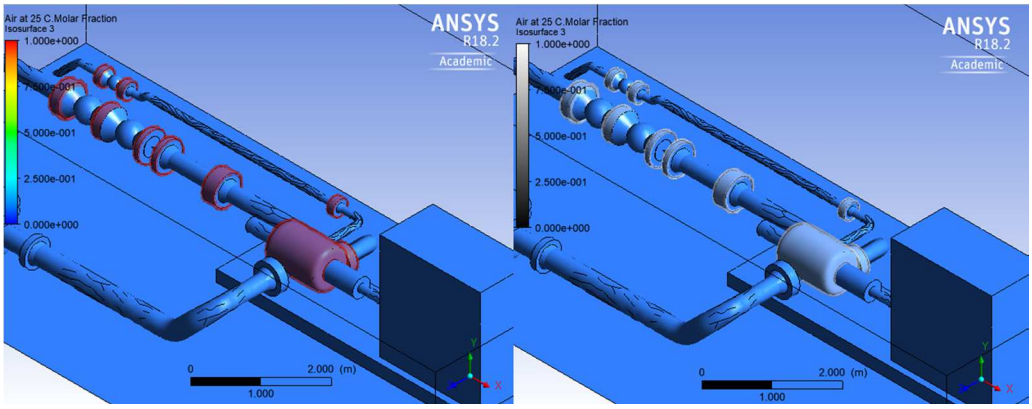


Figura 57: Nuvem delimitada pelo LIE da mistura à esquerda e 50% do LIE da mistura à direita.

Efetuando-se um ajuste da taxa de evaporação para a área de emanação de vapores de 100 cm² do experimento de Fingas (2012), ajustado para $6{,}25.10^{-4}$ kg/s, não houve grande diferença no resultado. Comparando-se o volume da nuvem com concentração de LIE da mistura na *isosurface*, não há diferença perceptível com a taxa adotada anteriormente, no entanto, ao analisar a nuvem de concentração de 50% do LIE, observa-se a formação de um acúmulo, ou seja, um aumento da nuvem em direção ao piso, conforme Figura 58.

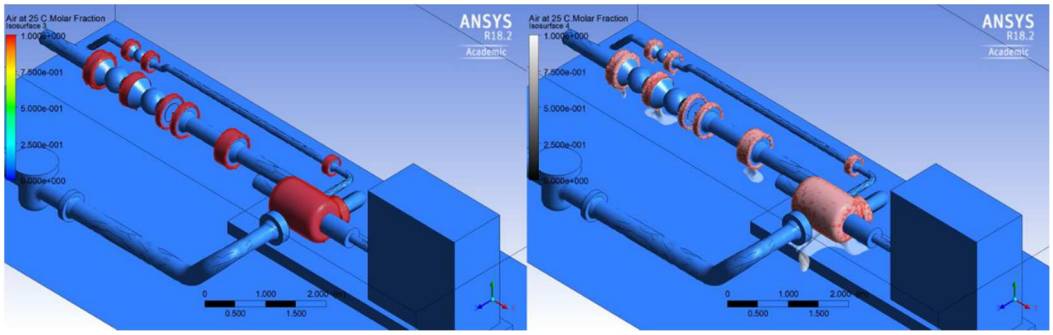


Figura 58: Regime laminar com maior de taxa de evaporação – nuvem delimitada pelo LIE da mistura à esquerda e 50% do LIE da mistura à direita

Analisando os resultados obtidos com a literatura pesquisada, pode-se observar que os resultados são coerentes com alguns autores. Segundo Erthal (2004) áreas adequadamente ventiladas com substâncias inflamáveis contidas em tubulações fechadas onde estão incluídos apenas flanges, medidores e acessórios de tubulação não são considerados como áreas classificadas. Os resultados obtidos pela modelagem condizem com esta afirmação. Entretanto, a NORMA ABNT NBR IEC 60079-10-1 em seu Anexo A item A.1.3 página 14 leva em consideração flanges,

conexões e acessórios de tubulação como fontes de risco que fornecem grau secundário de liberação, gerando uma área classificada de zona 2, superior ao volume da simulação numérica. O volume gerado de atmosfera explosiva pode também ser uma área classificada de extensão negligenciável. Considerando a Tabela 6 do item 3.4.1, da norma ABNT, há coerência nesta consideração por tratar-se de local ventilado e sem obstáculos, com fontes secundárias de liberação. Entretanto, a mesma consideração não pode ser feita para as demais normas, NFPA 497 e API 505.

A diferença entre os resultados obtidos pela aplicação da norma e por CFD também pode estar relacionada aos resultados referentes ao superdimensionamento do volume hipotético de vazamento, mencionado por Benintendi, (2010) e pelo estudo realizado por Health & Safety Laboratory (2005), dado que suas conclusões indicam que a norma leva ao superdimensionamento do vazamento hipotético quando aplicado o cálculo, apesar de também sugerir a aplicação de CFD para esta estimativa (ABNT, 2009)..

Otsuka (2011) realizou o cálculo de vazão mássica para que, em concordância com o dimensionamento da norma, com distância de 3 m, a concentração neste ponto atinja o LIE. Como exemplo, a vazão mássica de formaldeído obtida foi $2{,}8.10^{-1}$ kg/s numa situação de produto dentro de tanque com respiro, sob pressão atmosférica, ao passo que a evaporação do petróleo considerada, estudada por Fingas (2012) foi da ordem de 10^{-6} kg/s. Neste caso, nota-se grande diferença de taxa de evaporação (vazão mássica) para a atmosfera para atingir a mínima proporção para ocorrer ignição. No entanto, mesmo considerando o valor do fluxo mássico, ou seja, a quantidade de massa por tempo que é transferida para atmosfera por área, considerando a área estudada por Fingas (2012), de 100 cm², e multiplicando pelo total da área definida para a emanação dos vapores, tem-se uma taxa de ordem de grandeza de 10^{-4} kg/s e na simulação com este valor, pouca diferença foi notada em termos de extensão da nuvem inflamável no valor de LIE. O fluxo mássico, portanto, deve ser ajustado pois, em função da área, o resultado pode ser uma nuvem inflamável com maior tamanho. Porém, um ponto a ser destacado é a velocidade do vento, que foi estabelecida de forma muito inferior aos modelos de estabilidade atmosférica, com maior possibilidade de dissipação da nuvem.

Desta forma, concorda-se com Rangel Jr. et al. (2016) no sentido que métodos para determinação de taxa de liberação de substâncias e o dimensionamento da

extensão estão sujeitos à discussões; entretanto, seus estudos levaram ao subdimensionamento em relação à norma NFPA 497. Os modelos não consideraram a ação da gravidade, mudança de estado físico ou velocidade do vento, apesar de terem sido ajustados conforme densidade e pressão no modelo de jato cônico subsônico.

De forma similar a Rangel Jr e Otsuka, Pfuetzenreiter et al. (não informado) realizou simulação similar, com o uso de isopentano, hexano, hidrogênio e GLP, à temperatura de 30 °C e com variação de pressão, concluindo que uso de modelos matemáticos podem aumentar a confiabilidade em função das condições de operação, pois as normas estão subdimensionadas. Nos estudos destes autores, observa-se que os cálculos utilizados para quantificar o vazamento não seguem criteriosamente o conceito das normas pois mencionam tamanho de furo do vazamento, que já pode ser considerada uma situação de emergência, e não uma operação normal ou anormal e, consequentemente, não seria levado em consideração para a instalação de equipamentos elétricos certificados para áreas classificadas. Somente pode ocorrer o escape em operação anormal quando o fluido em questão está no estado gasoso, diferente do vazamento de líquidos tem outras influências como a evaporação e a difusão no ar.

Em relação as normas utilizadas, apesar de Tommasini et al. (2014) constatar diferença na aplicação das normas, neste estudo, as considerações pouco alteraram o dimensionamento de áreas classificadas sugeridos pelas três normas quando levado em consideração os critérios menos conservadores.

Ainda em relação à comparação entre os volumes, ressalta-se que a simulação numérica não leva em consideração a probabilidade de ocorrência da atmosfera explosiva ou seu grau de liberação. Para a simulação, considera-se a emanação dos vapores de forma contínua. Em relação ao que preconiza a NFPA sobre a abertura do equipamento, não é possível realizar a comparação, pois a emanação nestes casos é um valor superior à simulação numérica e instantânea.

5. CONCLUSÕES

Pode-se observar conforme o item anterior que há semelhança entre a aplicação das três normas mencionadas, visto que elas estabelecem o dimensionamento baseado em distâncias fixas e análise subjetiva de risco. Porém, comparando-os com os resultados da simulação de CFD, uma ponderação pode ser feita: a aplicação das normas, em suas considerações menos conservadoras, ainda que o critério seja uma análise subjetiva, apresentou um superdimensionamento de áreas classificadas na proposta deste estudo. Isto confere segurança aos projetos de instalações elétricas gerando controles e proteções adequados, visando a segurança das instalações e a prevenção de acidentes.

No entanto, isto gera um aumento no custo do projeto dado que equipamentos certificados para áreas classificadas oneram este custo. Esta mesma conclusão pode ocorrer em outras instalações ou situações. É essencial analisar cuidadosamente o risco de cada situação de forma a manter a segurança das operações, mas também tornar projetos mais interessante economicamente. O dimensionamento adequado de áreas classificadas pode reduzir custos em locais de dimensões restritas, por exemplo, pela redução da necessidade de instalações elétricas certificadas.

Além disso, o uso de CFD neste estudo demonstrou ser uma ferramenta adequada para análise de risco e quantificação para uma melhor proposição de medidas preventivas, e consequentemente, uma ferramenta que poderá auxiliar na tomada de decisão quanto ao projeto das instalações, desde que feitas as considerações razoáveis e adequadas.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização de simulações de evaporação de poça de substâncias inflamáveis simples, com modelo de geometria que possibilite uma comparação entre malhas tetraédricas e hexaédricas, para que seja realizada uma comparação que leve a conclusões mais precisas quanto ao dimensionamento de áreas classificadas.

Também se recomenda uma melhor análise dos modelos utilizados, adequando para cada situação, por exemplo, como seria a liberação dos gases inflamáveis ou a formação de vapores a partir de líquidos em poça ou pressurizado para posteriormente confrontar os modelos existentes com as simulações de CFD.

7. BIBLIOGRAFIA

ABNT. (2009). ABNT NBR IEC 60079-10-1. *ABNT NBR IEC 60079-10-1 Atmosferas explosiva Parte 10-1: Classificação de áreas — Atmosferas explosivas de gás*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

American Petroleum Institute. (agosto de 2013). API RP 505. *Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2*. Washington D.C. : API Publishing Services.

ANP. (2004). *Resolução ANP nº 18/2004.* Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-e-derivados2

Atkinson, G., & Coldrick, S. (2012). *Vapour cloud formation Experiments and modelling.* London: HSE Books.

Barr, R. F., & Watts, H. (janeiro de 1972). Diffusion of some organic and inorganic compounds in air. *J. Chem. Eng. Data 17 (1)*, pp. 45-46.

Benintendi, R. (2010). Turbulent jet modelling for hazardous area classification. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 23*, pp. 373-378.

Benintendi, R. (2011). Laminar jet modelling for hazardous area classification. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24* , pp. 123-130.

Bimbato, A. M. (24 de Agosto de 2012). Estudo de Escoamentos Turbulentos em torno de um Corpo Rombudo de Superfície Hidraulicamente Lisa ou Rugosa Utilizando o Método de Vórtices Discretos. Itajubá, Minas Gerais.

Bozek, A., & Rowe, V. (Setembro/Outubro de 2010). Flammable Mixture Analysis for Hazardous Area Classification . *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS VOL. 46, NO. 5*, pp. 1827-1835.

Bozek, A., Anhalt, J., & Chin, J. (JANUARY/FEBRUARY de 2015). The Use of Infrared Emission Detection and Fugitive Emission Quantification Technologies as a Basis for Hazardous Area Classification Design. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 51, NO. 1*, pp. 142-147.

Brasil, N., Araújo, M., & Sousa, E. (2011). *Processamento de Petróleo e Gás.* Rio de Janeiro: LTC.

Cant, R., Dawes, W., & Savill, A. (2004). Advanced Cfd And Modeling Of Accidental Explosions. *Annual Review od Fluid Mechanics 36*, pp. 97–119.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2014). *GUIDELINES FOR DETERMINING THE PROBABILITY OF IGNITION OF A RELEASED FLAMMABLE MASS.* New York, NY: Wiley.

Cormier, B. R., Qi, R., Yun, G., Zhang, Y., & Mannan, M. S. (2009). Application of computational fluid dynamics for LNG vapor dispersion modeling: A study of key parameters. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22*, pp. 332–352.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2015). *SEGURANÇA DE PROCESSOS QUÍMICOS Fundamentos e Aplicações 3.ed.* Rio de Janeiro: LTC.

Cruz, S. R. (2012). ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIALMENTE EXPLOSIVAS EM UNIDADES DE REFINO DE PETRÓLEO. *Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.* Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Elliott, R. W., & Watts, H. (1972). Diffusion of some Hydrocarbons in Air: a Regularity in the Diffusion Coefficients of a Homologous Series. *Canadian Journal of Chemistry V.50*, pp. 31-34.

Erthal, L. (2004). ATMOSFERAS POTENCIALMENTE EXPLOSIVAS: UM ESTUDO DE CASO COMO CONTRIBUIÇÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS NA ATIVIDADE DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO, QUÍMICA E PETROQUÍMICA. *Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre. Área de concentração: Gestão de Segurança do Trabalho.* Niteroi, Rio de Janeiro.

Erthal, L. (março de 2015). Avaliação e estudo do potencial da energia de fontes de risco de ferramentas manuais em ambientes de áreas classificadas no segmento de óleo e gás. *Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro,Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2015*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Fingas, M. F. (abril de 2012). Studies on the Evaporation Regulation Mechanisms of Crude Oil and Petroleum Products . *Advances in Chemical Engineering and Science* , pp. 246-256.

Fingas, M. F. (julho de 2013). Modeling Oil and Petroleum Evaporation. *Journal of Petroleum Science Research (JPSR) Volume 2 Issue 3*, pp. 104-115.

Fleck, A. B. (Março de 2008). DISPERSÃO DE GASES INFLAMÁVEIS EM PLATAFORMA OFFSHORE: LOCALIZAÇÃO DE DETECTORES. *Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.* Rio de Janeiro, Rio de janeiro.

Gomes, E. G. (Julho de 2012). DISPERSÃO DE GASES INFLAMÁVEIS EM UNIDADES DE PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO: AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE DETECTORES POR FLUIDODINÂNICA COMPUTACIONAL. *Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte integrante dos requisitos necesários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)* . Rio de janeiro, Rio de Janeiro.

Health & Safety Laboratory. (maio de 2005). *CFD Modelling of Low Pressure Jets for Area Classification HSL/2005/11.* Fonte: Health and Safety Executive: http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2005/hsl0511.pdf

Health & Safety Laboratory. (2008). Area classification for secondary releases from low pressure natural gas systems - Research Report 630. Buxton, Derbyshire, Reino Unido.

Kletz, T. (2013). *O QUE HOUVE DE ERRADO? Casos de Desastres em Plantas de Processo e como Eles Poderiam Ter sido Evitados 5.ed.* Rio de Janeiro: Interciência.

Konishi, T. (2005). Experimental and CFD Investigations on Compartment Explosion with Ignition and Fuel Sources Located in Different Compartment. *FIRE SAFETY SCIENCE–PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, pp. 1354-1363.

Mannan, M. S. (2009). A TECHNICAL ANALYSIS OF THE BUNCEFIELD EXPLOSION AND FIRE. *SYMPOSIUM SERIES NO. 155 Hazards XXI* , pp. 662-673.

Mariano, J. B. (2005). *Impactos Ambientais do Refino do Petróleo.* Rio de Janeiro: Interciência.

Matsunaga, N., Hori, M., & Nagashima, A. (2007). Gaseous Diffusion Coefficients of Propane and Propylene into Air, Nitrogen and Oxygen. *Netsu Bussei Vol. 21 No. 3* , pp. 143-148 .

MTE - NR 20. (29 de 09 de 2015). *Norma Regulamentadora Nº 20 - Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis.* Fonte: Ministério do Trabalho: http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-20-seguranca-e-saude-no-trabalho-com-inflamaveis-e-combustiveis

Nagaosa, R. S. (2014). A new numerical formulation of gas leakage and spread into a residential space in terms of hazard analysis. *Journal of Hazardous Materials 271*, pp. 266-274.

National Fire Protection Association. (2 de janeiro de 2012). NFPA 497. *Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas*. Quincy, Massachusetts, EUA: NFPA.

Otsuka, A. H. (28 de novembro de 2011). Análise Quantitativa da Extensão de Áreas Classificadas. *Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Sergipe, como requisitosà obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.* São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

Pfuetzenreiter, A. A., Costa, J. A., & Schlegel, C. (não informado). *Artigos HERCO.* Fonte: Site da HERCO Consultoria de Riscos: http://herco.com.br/pt-br/artigos/

Rangel Jr., E., Luiz, A. M., & Filho, H. L. (JAN/FEB de 2016). Performing reliable hazardous-area-classification studies. *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 28-39.

Thomas, J. E., Triggia, A. A., Correia, C., Verotti Filho, C., Xavier, J., Machado, J., . . . Barragan, R. (2001). *Fundamentos de engenahria de petróleo.* (Petrobras, Ed.) Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Interciência.

Tommasini, R. (2013). The classification of hazardous areas where explosive gas atmospheres may be present. *Safety Science 58*, pp. 53–58.

Tommasini, R., & Pons, E. (MARCH/APRIL de 2012). Classification of Hazardous Areas Produced by Maintenance Interventions on N.G. Distribution Networks and in the Presence of Open Surface of Flammable Liquid. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 48, NO. 2*, pp. 593-602.

Tommasini, R., Pons, E., & Palamara, F. (Outubro de 2014). Area Classification for Explosive Atmospheres: Comparison Between European and North American Approaches. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS vol. 50 n. 5*, pp. 3128-3134.

Vazquez-Román, R., Díaz-Ovalle, C., Quiroz-Perez, E., & Mannan, M. S. (2016). A CFD-based approach for gas detectors allocation. *ournal of Loss Prevention in the Process Industries 44*, pp. 633-641.

Webber, D., Ivings, M., & Santon, R. (2011). Ventilation theory and dispersion modelling applied to hazardous area classification. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24*, pp. 612-621.

Yan, J.-b., Liang, D., & Shen, H. (2014). Numerical Simulation of Toluene Vapor Diffusion in Limited Space. *Procedia Engineering 71* , pp. 188 – 193.

Zhu, Y., Qian, X.-m., Liu, Z.-y., Huang, P., & Yua, M.-q. (2015). Analysis and assessment of the Qingdao crude oil vapor explosion accident: Lessons learnt. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 33*, pp. 289-303.